

Владимирский государственный университет

Л. В. ГРУНСКАЯ Д. А. МАЛЫШЕВА

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

**Учебное пособие по физике
для иностранных студентов**

Владимир 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

Л. В. ГРУНСКАЯ Д. А. МАЛЫШЕВА

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Учебное пособие по физике
для иностранных студентов

Электронное издание



Владимир 2025

ISBN 978-5-9984-2191-4
© ВлГУ, 2025

УДК 536.7+539.1
ББК 22.36+22.317

Авторы: Л. В. Грунская (введение; программа по физике; основные материалы лекционного курса; тесты для рейтинг-контроля; вопросы для рейтинг-контроля; вопросы, входящие в экзаменационные билеты; основные формулы молекулярной физики и термодинамики; заключение; рекомендательный библиографический список), Д. А. Малышева (примеры решения задач по физике и задачи для самостоятельного решения)

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор
профессор кафедры физики и прикладной математики
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
О. Я. Бутковский

Кандидат технических наук, доцент
доцент Высшей школы промышленно-гражданского
и дорожного строительства
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого
О. В. Маковецкая-Абрамова

Издается по решению редакционно-издательского совета ВлГУ

Грунская, Л. В. Молекулярная физика и термодинамика [Электронный ресурс] : учеб. пособие по физике для иностр. студентов / Л. В. Грунская, Д. А. Малышева ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2025. – 128 с. – ISBN 978-5-9984-2191-4. – Электрон. дан. (2,98 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Содержит теоретические и практические материалы, посвященные раскрытию физического смысла основных законов и понятий молекулярной физики и термодинамики, а также контрольные вопросы и задания для самостоятельного выполнения.

Предназначено для иностранных студентов вузов инженерно-технических специальностей всех форм обучения, изучающих дисциплину «Физика».

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Ил. 36. Табл. 5. Библиогр.: 20 назв.

ISBN 978-5-9984-2191-4

© ВлГУ, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ	6
I. ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА	8
<i>МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА</i>	<i>8</i>
Тема 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА	8
<i>Домашнее задание</i>	<i>13</i>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>13</i>
Тема 2. ЭЛЕМЕНТЫ КЛАССИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ	14
<i>Домашнее задание</i>	<i>19</i>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>20</i>
Тема 3. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ.....	21
<i>Домашнее задание</i>	<i>27</i>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>28</i>
Тема 4. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ	29
<i>Домашнее задание</i>	<i>34</i>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>35</i>
Тема 5. ЖИДКОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА.....	36
<i>Домашнее задание</i>	<i>42</i>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>43</i>
Тема 6. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ	44
<i>Домашнее задание</i>	<i>51</i>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>51</i>
<i>ТЕРМОДИНАМИКА.....</i>	<i>52</i>
Тема 7. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ	52
<i>Домашнее задание</i>	<i>57</i>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>58</i>
Тема 8. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ	59
<i>Домашнее задание</i>	<i>63</i>
<i>Контрольные вопросы.....</i>	<i>63</i>

II. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ И ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ	64
Тема 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА	64
Примеры решения задач	67
Задачи для самостоятельного решения	71
Тема 2. ЭЛЕМЕНТЫ КЛАССИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ	75
Примеры решения задач	76
Задачи для самостоятельного решения	80
Тема 3. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ.....	82
Примеры решения задач	83
Задачи для самостоятельного решения	84
Тема 4. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ	86
Примеры решения задач	87
Задачи для самостоятельного решения	91
Тема 5. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ	93
Примеры решения задач	94
Задачи для самостоятельного решения	100
Тема 6. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ	104
Примеры решения задач	106
Задачи для самостоятельного решения	111
ТЕСТЫ ДЛЯ РЕЙТИНГ-КОНТРОЛЯ	114
ВОПРОСЫ ДЛЯ РЕЙТИНГ-КОНТРОЛЯ.....	119
Рейтинг-контроль № 1	119
Рейтинг-контроль № 2	120
ВОПРОСЫ, ВХОДЯЩИЕ В ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ БИЛЕТЫ	121
ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	125
РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	126

ВВЕДЕНИЕ

В учебном пособии представлены основные законы молекулярной физики и термодинамики с примерами решения задач, а также задачи для самостоятельного решения.

Доступ к полному курсу лекций по разделу «Молекулярная физика и термодинамика» можно получить по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf> [3].

Издание позволит иностранным студентам, изучающим курс физики в университете, получить достаточно полное представление о стоящих перед ними учебных задачах. Лекционный материал содержит более детальное изложение основных законов и физических понятий, сопровождается расширенным описанием рисунков для полного понимания иностранными студентами содержания учебного материала.

В лекционной части пособия представлены следующие вопросы: молекулярно-кинетическая теория идеального газа; элементы классической статистики; реальные газы; фазовые переходы; жидкое состояние вещества; элементы физической кинетики; первое и второе начала термодинамики.

В практической части пособия рассмотрены примеры решения задач по физике и представлены задачи для самостоятельного решения по разделам: молекулярно-кинетическая теория идеального газа; элементы классической статистики; реальные газы; элементы физической кинетики; первое и второе начала термодинамики. В начале каждой темы представлены основные формулы и определения.

В конце издания приведены тесты по разделу «Молекулярная физика и термодинамика», выполнение которых позволит студентам быть готовыми к рейтинговым и экзаменационным заданиям; даны основные вопросы, входящие в экзаменационные билеты; представлен блок основных, базовых формул, знание и понимание которых необходимо для изучения курса.

В рекомендательном библиографическом списке представлены издания по общей физике для студентов высших учебных заведений.

ПРОГРАММА ПО ФИЗИКЕ

Раздел «Молекулярная физика и термодинамика»

1. Молекулярно-кинетическая теория идеального газа. Основные положения молекулярно-кинетической теории вещества. Микро- и макросостояния системы. Макроскопические параметры. Понятие идеального газа. Молекулярно-кинетическое толкование температуры. Число степеней свободы молекулы. Внутренняя энергия идеального газа. Закон равнораспределения энергии. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева).

2. Элементы классической статистики. Динамические и статистические закономерности в физике. Статистический метод исследования системы. Фазовое пространство, фазовая точка, фазовая ячейка. Понятие о функции распределения. Статистическое усреднение. Флуктуация и вероятность. Распределение Максвелла. Распределение молекул по абсолютным значениям скорости. Средние скорости молекул. Эффузия газа и молекулярные пучки. Распределение Больцмана. Барометрическая формула. Распределение Максвелла – Больцмана. Распределение Гиббса.

3. Реальные газы. Силы межмолекулярного взаимодействия в газах. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы реального газа. Метастабильные состояния. Критическое состояние. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля – Томсона. Сжижение газов и получение низких температур.

4. Свойства жидкостей. Характеристика жидкого состояния. Объемные свойства жидкостей. Строение жидкостей. Ближний порядок. Поверхностное натяжение. Силы, возникающие на кривой поверхности жидкости. Формула Лапласа. Условия равновесия на границе двух сред. Краевой угол. Смачивание. Капиллярные явления.

5. Свойства твердых тел. Амфорные и кристаллические тела. Упругая и пластическая деформация. Закон Гука. Кристаллическая решетка. Дальний порядок. Дефекты в кристаллах.

6. Фазовые равновесия и фазовые переходы. Фазы вещества. Условия равновесия фаз. Испарение и конденсация. Плавление и кристаллизация. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса. Фазовая диаграмма (диаграмма состояния). Тройная точка. Полиморфизм. Фазовые переходы первого и второго рода.

7. Элементы теории столкновений. Понятие столкновения. Упругое и неупругое столкновения. Прицельное расстояние. Рассеяние частиц. Эффективное сечение рассеяния. Средняя длина свободного пробега. Принцип детального равновесия.

8. Элементы физической кинетики. Понятие о физической кинетике. Неравновесные системы. Время релаксации. Явления переноса. Диффузия. Коэффициент диффузии. Теплопроводность. Температуропроводность. Коэффициент теплопроводности. Вязкость (внутреннее трение). Коэффициент вязкости. Динамическая и кинематическая вязкость.

9. Первое начало термодинамики. Статистический и термодинамический методы. Термодинамическая система. Термодинамический процесс. Основные термодинамические понятия: внутренняя энергия, работа, теплота. Формулировки первого начала термодинамики. Уравнение первого начала термодинамики. Теплємкость. Зависимость теплємкости идеального газа от вида процесса. Формула Майера. Работа, совершаемая газом при изопроцессах. Энтальпия (тепловая функция). Адиабатический процесс. Теплємкость твердых тел. Недостаточность классической теории теплємкостей газов.

10. Второе начало термодинамики. Равновесные и неравновесные состояния системы. Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс (цикл). Формулировки второго начала термодинамики. Цикл Карно и его КПД для идеального газа. Тепловые двигатели и холодильные машины. Максимальный КПД теплового двигателя. Энтропия. Статистический вес (термодинамическая вероятность). Закон возрастания энтропии. Термодинамические потенциалы и условия равновесия. Статистическое толкование второго начала термодинамики.

I. ОСНОВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

Тема 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

План

1. Понятие идеального газа.
2. Степени свободы молекул.
3. Средняя энергия одной молекулы.
4. Внутренняя энергия идеального газа. Теплоемкость газов.
5. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа.
6. Уравнение состояния идеального газа.
7. Температура техническая и термодинамическая.

Тема 1 посвящена основным свойствам идеального газа. Наиболее близок по своим свойствам к идеальному газу сильно разреженный газ. Идеальный газ характеризуют: микро- и макропараметры, степени свободы молекул, средняя энергия одной молекулы. В теме дается понятие внутренней энергии идеального газа и подробно анализируются виды теплоемкостей газов; представлены основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ) идеального газа и уравнение состояния идеального газа. Важно различать эти два уравнения по их смысловому содержанию. Уравнение состояния идеального газа связано с основными параметрами идеального газа – температурой, давлением, объемом, которые и характеризуют состояние газа в конкретный момент времени. Основное уравнение МКТ идеального газа дает нам формулу давления идеального газа через среднюю кинетическую энергию молекул газа. Анализируются два вида температур – техническая и термодинамическая.

Необходимо выполнять все пункты домашнего задания. Это позволит наиболее качественно усвоить лекционный материал.

1. Понятие идеального газа

Идеальный газ – сильно разреженный газ.

Свойства идеального газа:

- движение молекул хаотичное;
- все направления движения равновероятны;
- собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда;
- между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия (взаимодействие между молекулами такого газа становится пренебрежимо слабым при малых плотностях газа).

Макропараметры идеального газа и микропараметры:

1) макропараметры описывают поведение системы в целом: давление P (средний импульс всех ударов молекул о стенки сосуда); температуру T (среднюю кинетическую энергию движения всех молекул в данном объеме газа); объем V ;

2) микропараметры идеального газа: масса одной молекулы m_0 ; скорость движения молекулы v_0 ; координаты молекулы (x, y, z) .

2. Степени свободы молекул

Степени свободы молекул (i) – это минимальное число независимых переменных, которыми определяется состояние системы.

Существуют следующие степени свободы:

- *поступательные* – это координаты центра масс молекулы (x, y, z) ;
- *вращательные* – соответствуют углам, составляющим ось вращения молекулы с тремя осями координат (φ, Θ, ψ) , и определяют ориентацию молекулы в пространстве;
- *колебательные* – отражают характер связи атомов в молекулах (осцилляции).

Потенциальную энергию, приходящуюся на одну колебательную степень свободы молекулы, рассчитывают по формуле

$$\frac{1}{2}kT.$$

Кинетическая энергия, приходящаяся на одну поступательную, вращательную и колебательную степени свободы молекулы, равна

$$\frac{1}{2}kT.$$

3. Средняя энергия одной молекулы

Средняя энергия молекулы определяется как

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{колеб}},$$

где i – сумма числа поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы; $k = \frac{R}{N_A}$ – постоянная Больцмана (R – универсальная газовая постоянная; N_A – число Авогадро, равное количеству молекул в одном моле любого газа).

4. Внутренняя энергия идеального газа. Теплоемкость газов

Внутренняя энергия тела – кинетическая и потенциальная энергия всех атомов и молекул тела; потенциальная энергия взаимодействия атомов в молекулах; внутриядерная энергия. Внутреннюю энергию одного моля идеального газа найдем, умножив число Авогадро на среднюю энергию одной молекулы

$$U_{\mu} = N_A \langle \varepsilon \rangle = N_A \frac{i}{2} kT,$$

где k – число Авогадро; T – температура.

Зная, что газовая постоянная $R = N_A k$, получим

$$U_{\mu} = \frac{i}{2} RT.$$

Как было отмечено ранее: «Под **удельной теплоемкостью** какого-либо вещества подразумевают физическую величину, численно равную количеству тепла, которое надо сообщить единице массы этого вещества, чтобы поднять его температуру на 1 °С. Наряду с удельной теплоемкостью вводится понятие **молярной теплоемкости** – физической величины, численно равной количеству тепла, которое надо сообщить одному молю этого вещества, чтобы поднять его температуру на 1 °С» [3, с. 8].

Молярная теплоемкость при постоянном объеме $V = \text{const}$

$$C_v = \frac{i}{2} RT.$$

Теплоемкость при постоянном давлении

$$C_p = C_v + R,$$

$$C_p = \frac{i}{2} R T + R = \frac{i+2}{2} R.$$

Отношение теплоемкостей при постоянном давлении и при постоянном объеме называют **показателем адиабаты**, он зависит только от числа степеней свободы молекул, из которых состоит газ

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}.$$

5. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа

Основное уравнение МКТ идеального газа

$$p = \frac{2}{3} n(E_k),$$

где p – давление газа; n – концентрация молекул.

Средняя кинетическая энергия одной молекулы газа

$$E_k = \frac{m \langle v^2 \rangle}{2}.$$

Уравнение связывает макропараметры P и T с микропараметрами: m – массой молекулы данного газа и v – скоростью отдельных молекул газа.

Как было отмечено ранее: «Физический смысл уравнения: давление, оказываемое газом на стенки сосуда, прямо пропорционально числу молекул в единице объема и средней кинетической энергии поступательного движения одной молекулы» [3, с. 10].

6. Уравнение состояния идеального газа

Уравнение состояния идеального газа – это уравнение, связывающее температуру, давление и объем. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева) для массы газа m

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

где μ – молярная масса газа, которая равна массе одного моля газа.

Моль любого газа занимает объем 22,4 литра.

Универсальная газовая постоянная R равна $8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.
Количество вещества ν равно $\frac{m}{\mu}$.

Температура, давление и объем – параметры, определяющие состояние идеального газа.

Второй вид уравнения состояния идеального газа имеет вид

$$P = nkT,$$

где n – число молекул в единице объема; k – постоянная Больцмана; T – температура по шкале Кельвина.

Внутренняя энергия моля идеального газа будет равна

$$U_{\mu} = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT,$$

где μ – молярная масса газа.

(См. [Хаотичность движения в газе – 1](#); [Модель броуновского движения](#).)

7. Температура техническая и термодинамическая

Как было отмечено ранее: «В технике используется температура, отсчитанная по шкале Цельсия. Единица измерения – градус Цельсия. В физике пользуются термодинамической температурой, которая определяется как средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну молекулу газа. Единица термодинамической температуры – кельвин (К)» [3, с. 12].

0°C соответствует $-273,15 \text{ К}$ (0 градусов по шкале Кельвина).

Соотношение между шкалой температур по Кельвину и Цельсию $T = (t^{\circ}\text{C} + 273,15) \text{ К}$.

Лекционные демонстрации по разделу «Молекулярно-кинетическая теория идеального газа», разработанные на кафедре общей и прикладной физики ВлГУ, представлены в работе А. Ф. Галкина, Л. В. Грунковой, В. В. Дорожкова (URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307>) [1]. В изучении курса общей физики по разделу «Молекулярно-кинетическая теория идеального газа» будет полезен видеокурс В. И. Гервидса (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA>) [2].

Домашнее задание

1. Скачайте полную версию лекции № 1 по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf>.
2. Переведите полную версию лекции на китайский язык. Внимательно изучите материал.
3. Изучите краткий материал, который был записан в лекционной аудитории по теме 1.
4. В начале следующей лекции в аудитории вы будете письменно отвечать на контрольные вопросы по теме 1. Используйте материал полной и краткой версий лекции.
5. Переведите на китайский язык материал темы 2, который будет разбираться на следующей лекции. Принесите на следующую лекцию два варианта темы 2 – оригинал на русском языке и перевод на китайский язык.

Контрольные вопросы

1. Какой газ называют идеальным?
2. Что называют числом степеней свободы механической системы? Какие существуют степени свободы молекул?
3. Чему равно число i для одноатомной, двухатомной и многоатомной молекул?
4. Что утверждает закон распределения кинетической энергии по степеням свободы молекул?
5. Запишите формулу средней энергии одной молекулы и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
6. Что такое температура с точки зрения МКТ?
7. Что такое давление идеального газа с точки зрения МКТ?
8. Запишите основное уравнение МКТ и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
9. Назовите микро- и макропараметры системы.
10. Запишите уравнение состояния идеального газа и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
11. Поясните соотношение между технической и термодинамической температурами.
12. Что такое число Авогадро?
13. Что такое молярная масса газа?
14. Какие бывают виды теплоемкостей газа?

Тема 2. ЭЛЕМЕНТЫ КЛАССИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

План

1. Среднестатистические характеристики.
2. Закон распределения Максвелла.
3. Распределение Больцмана. Барометрическая формула.
4. Наиболее важные законы распределения, используемые для анализа характера распределения физических величин.

Тема 2 посвящена ряду среднестатистических характеристик. Изучая газы, мы сталкиваемся с объектами, содержащими большое количество элементов (молекул). Анализ подобных систем возможен с привлечением среднестатистических параметров: среднего значения, среднеквадратичного значения, дисперсии. Закон распределения Максвелла анализирует закономерности распределения молекул по скоростям в заданном объеме газа. Закон распределения Больцмана представляет собой распределение молекул газа по высоте относительно поверхности Земли.

1. Среднестатистические характеристики

Среднее значение величины x

$$\langle x \rangle = \int x f(x) dx,$$

где $f(x)$ – **функция плотности вероятности**, или функция распределения вероятности.

На рис. 1.1 представлен график закона распределения.

Например, среднее значение скорости молекул

$$\langle v \rangle = \int v f(v) dv.$$

Среднеквадратичное значение величины x

$$\langle x \rangle^2 = \int x^2 f(x) dx.$$

Физический процесс рассматривается в виде суммы статической, т. е. не зависящей от времени, составляющей и динамической, или флуктуационной, составляющей.

Статическая составляющая – среднее значение величины

$$\langle x \rangle = \int x f(x) dx.$$

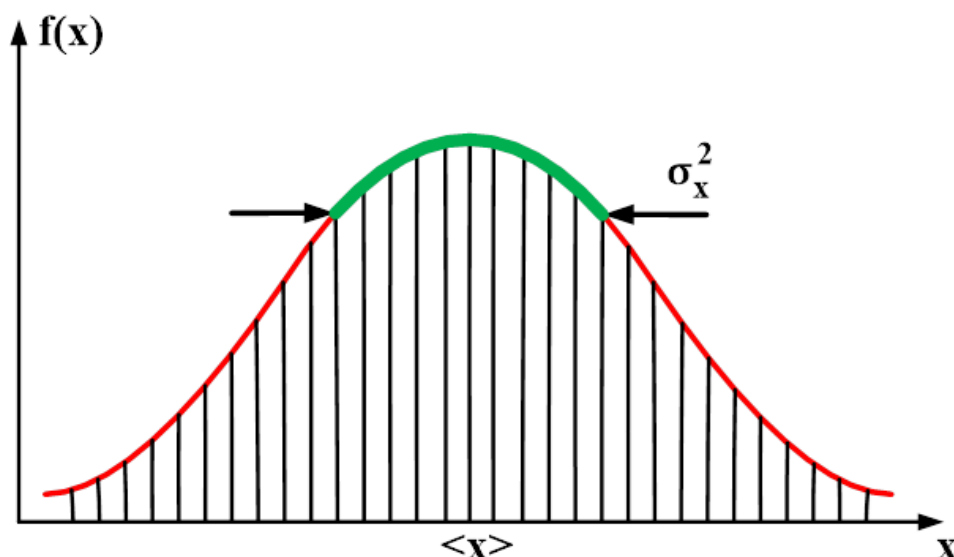


Рис. 1.1

Динамическая составляющая – дисперсия.

Формула для дисперсии

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \langle x \rangle)^2 f(x) dx,$$

где $\sqrt{\sigma_x^2}$ – **среднеквадратичное значение, равное σ_x .**

Дисперсия – это мера ширины, или степень отклонения плотности вероятности анализируемой величины вокруг среднего.

Поскольку стандартное отклонение имеет ту же размерность, что x , его можно взять в качестве ошибки Δx . На рис. 1.1 показано, как можно представить дисперсию на графике закона распределения.

2. Закон распределения Максвелла

Пространство скоростей, фазовое пространство

Как было отмечено ранее: **«Фазовое пространство** в молекулярной физике можно представить в виде трехмерной декартовой системы координат, вдоль осей которой мы откладываем макропараметры P, T, V (рис. 1.2, б). Тогда каждая точка такого пространства будет отражать определенное состояние вещества с конкретными величинами P, T, V , а они определяют фазу вещества – его конкретное состояние. Пространство скоростей частным случаем фазового пространства (рис. 1.2, а). Каждой молекуле в пространстве скоростей будет соответствовать определенная точка» [3, с. 20].

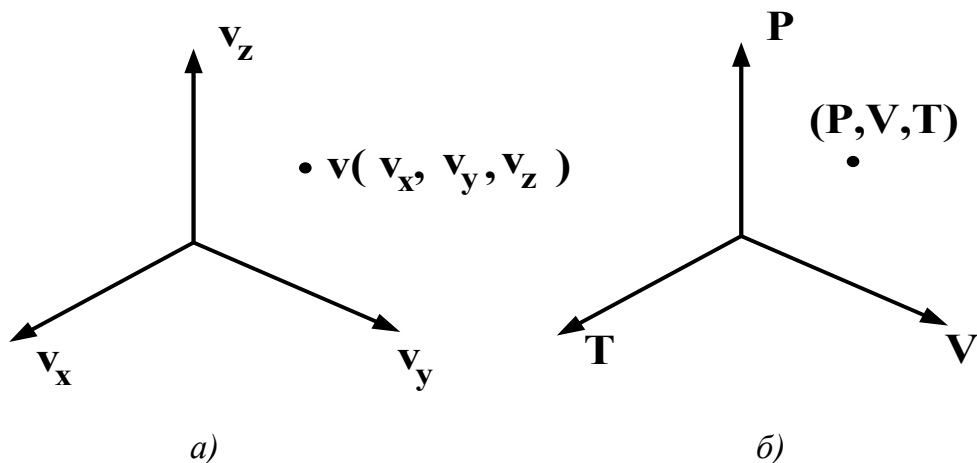


Рис. 1.2

Функция распределения Максвелла – это распределение молекул по скоростям; функция характеризует относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале dv .

Функция распределения молекул по скоростям

$$F(v) = dN/N = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) dv,$$

где m – масса молекул; v – скорость молекул; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура.

На рис. 1.3 представлен график закона распределения молекул по скоростям. На графике показаны положения: наиболее вероятной скорости ($v_{н.в.}$); средней скорости ($v_{ср.}$); среднеквадратичной скорости молекул ($v_{ср.кв.}$). Средняя скорость молекул на 13 % больше наиболее вероятной скорости. Среднеквадратичная скорость молекул на 22 % больше наиболее вероятной скорости.

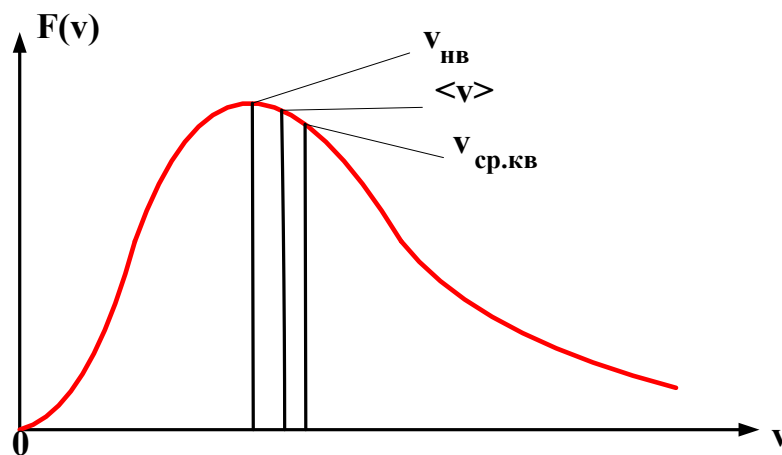


Рис. 1.3

Наиболее вероятная скорость

$$v_{\text{н.в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}.$$

Средняя скорость молекул

$$\langle v \rangle = \int vF(v)dv,$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}.$$

Среднеквадратичная скорость

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{v^2},$$

$$\langle v^2 \rangle = \int v^2 F(v)dv,$$

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}}.$$

На рис. 1.4 представлены две функции распределения вероятности: одна (T_1) соответствует определенному значению абсолютной температуры или определенной массе молекул; вторая (T_2) соответствует другому значению абсолютной температуры или массе молекул. Графики даны для сравнения и показывают, как видоизменяется форма зависимости от данных параметров. Какие бы изменения в этих параметрах не происходили, площадь, охватываемая графиком, остается постоянной и равной единице.

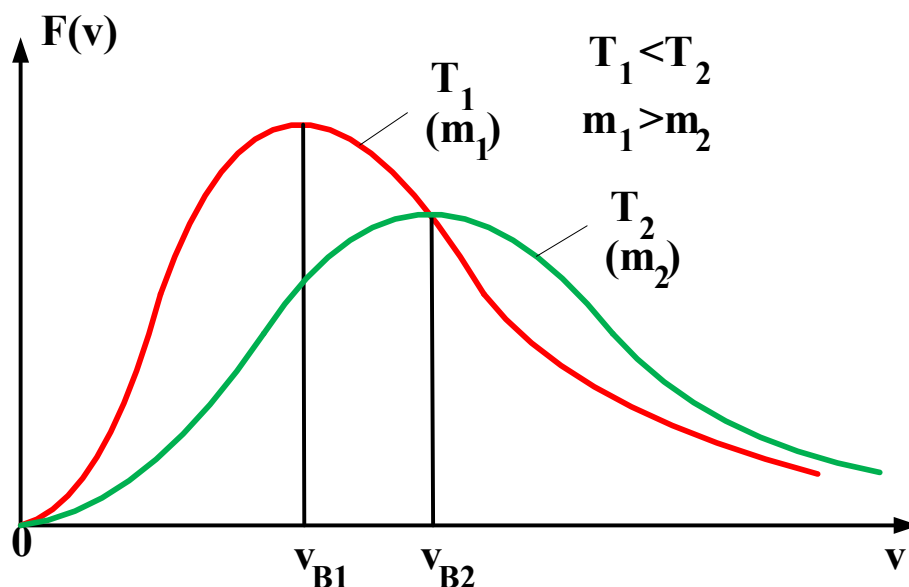


Рис. 1.4

Графики можно трактовать либо как соответствующие различным значениям температуры, либо как соответствующие различным значениям массы молекул.

3. Распределение Больцмана

Существует закон распределения молекул в потенциальном поле сил тяготения. Этот закон описывает распределение молекул по высоте относительно поверхности Земли, считая температуру по высоте постоянной.

Как было отмечено ранее: «Известно, что атмосферное давление убывает с высотой. Выделим в атмосфере вертикальный воздушный столб (рис. 1.5) с поперечным сечением $S_{\text{попер.сеч}} = 1$. Убыль давления при переходе от h к $h + dh$ равна весу воздуха в столбе высотой dh » [3, с. 24].

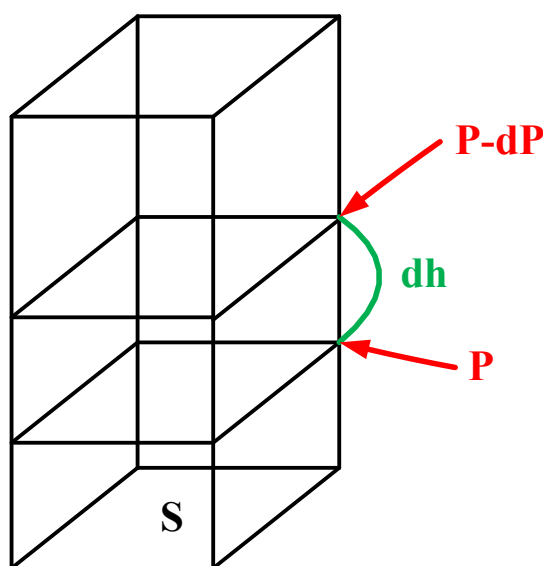


Рис. 1.5

Барометрическая формула, показывающая, по какому закону меняется атмосферное давление с высотой,

$$P = P_0 \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right),$$

где P_0 – давление у поверхности Земли; считаем атмосферу изотермической $T = \text{const}$.

На рис. 1.6 представлены два графика, построенные по барометрической формуле для двух значений абсолютной температуры.

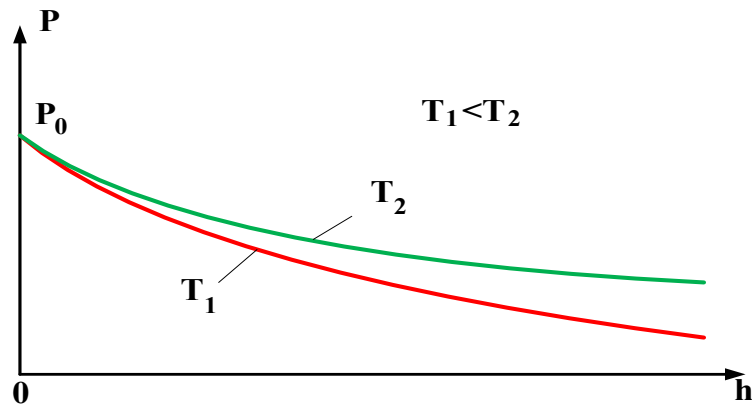


Рис. 1.6

Закон распределения Больцмана

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{mgh}{RT}\right),$$

где n – плотность молекул на высоте h ; n_0 – плотность молекул на высоте h_0 .

Закон распределения Больцмана – это закон распределения молекул по высоте (рис. 1.7).

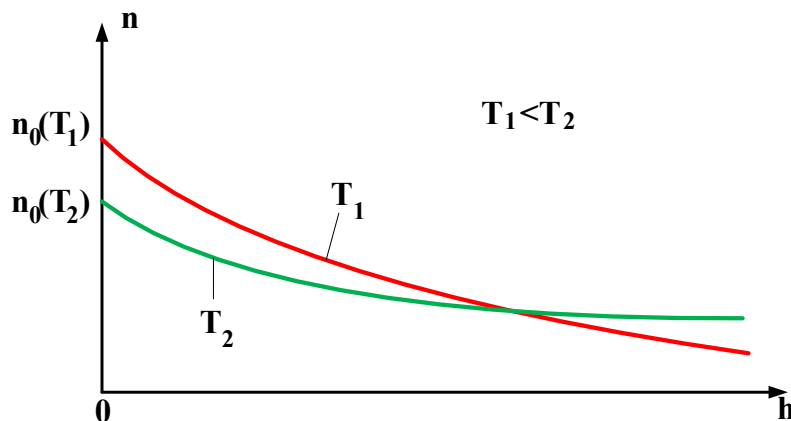


Рис. 1.7

(См. [Хаотичность движения в газе – 1](#); [Хаотичность движения в газе – 2](#); [Хаотичность движения в газе – 3](#); [Распределение Гаусса](#).)

Лекционные демонстрации по физике по разделу «Элементы классической статистики», разработанные на кафедре общей и прикладной физики ВлГУ, представлены в работе А. Ф. Галкина, Л. В. Грунсковой, В. В. Дорожкиной (URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307>) [1]. В изучении курса общей физики по разделу «Элементы классической статистики» будет полезен видеокурс В. И. Гервидса (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA>) [2].

Домашнее задание

1. Скачайте полную версию лекции № 2 по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf>.
2. Переведите полную версию лекции на китайский язык. Внимательно изучите материал.
3. Изучите краткий материал, который был записан в лекционной аудитории по теме 2.
4. В начале следующей лекции в аудитории вы будете письменно отвечать на контрольные вопросы по теме 2. Используйте материал полной и краткой версий лекции.
5. Переведите на китайский язык материал темы 3, который будет разбираться на следующей лекции. Принесите на следующую лекцию два варианта темы 3 – оригинал на русском языке и перевод на китайский язык.

Контрольные вопросы

1. Запишите формулу функции плотности вероятности, или функции распределения вероятности, и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
2. Запишите формулу правила нормировки и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
3. Запишите формулы среднего значения, среднеквадратичного значения, дисперсии и дайте название всем компонентам, входящим в формулы.
4. Запишите закон распределения Больцмана и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
5. Запишите барометрическую формулу и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
6. Распределение какого параметра дает нам закон распределения Максвелла?
7. Как зависит закон распределения молекул по скоростям от температуры?
8. Как зависит закон распределения молекул по скоростям от массы молекул?
9. Нарисуйте фазовое пространство в молекулярной физике.

Тема 3. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

План

1. Силы межмолекулярного взаимодействия в реальных газах.
2. Уравнение состояния реального газа.
3. Изотермы Ван-дер-Ваальса.
4. Метастабильные состояния вещества.
5. Тройная точка.

В теме 3 изложены основные свойства и характеристики реальных газов, обладающих высокой плотностью молекул (10^{19} молекул в 1 см^3). Рассмотрен процесс взаимодействия атомов в молекулах и межмолекулярные силы, процесс формирования структуры уравнения состояния реальных газов (уравнение Ван-дер-Ваальса). Проанализированы изотермы идеального и реального газов, полученные как теоретически, так и практически. Дано понятие критической температуры. Рассмотрены метастабильные состояния вещества и их возможные применения. Представлены графики равновесия трех фаз вещества и условия существования такой тройной точки для различных веществ.

1. Силы межмолекулярного взаимодействия в реальных газах

Основные свойства реальных газов.

1. Считая молекулы шарами, мы принимаем для их радиусов величины порядка 10^{-8} см. Отсюда объем одной молекулы приблизительно равен

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = 4 \cdot 10^{-24} \text{ см}^3.$$

2. В 1 см^3 реального газа при нормальных условиях будет находиться $3 \cdot 10^{19}$ молекул.

3. Нормальными называют условия, соответствующие давлению в 1 атмосферу и температуре 0°C .

4. Атомы и молекулы представляют собой весьма устойчивые и труднодеформируемые системы.

5. Молекула в целом нейтральна. Электрическое поле молекулы уже на расстоянии 2 – 3 диаметров электрических оболочек равно нулю (размер ядер $10^{-15} - 10^{-14}$ м, а электронной оболочки 10^{-10} м).

6. На малых расстояниях между молекулами действуют силы притяжения (рис. 1.8). Это так называемые силы перекрестного взаимодействия: электронные оболочки атомов одной молекулы притягиваются к положительным зарядам ядер атомов другой молекулы, и наоборот. На больших расстояниях силы электрического взаимодействия отсутствуют.

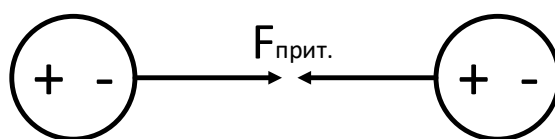


Рис. 1.8

Когда молекулы соприкасаются электронными оболочками, дальнейшее сближение невозможно вследствие высокой упругости электронных оболочек, такое состояние двух молекул считается наиболее устойчивым (рис. 1.9). Систему называют устойчивой, если она обладает минимальной потенциальной энергией $|U_{\min}|$. Такое состояние называют потенциальной ямой, а $|U_{\min}|$ определяет величину работы, которую нужно совершить против сил притяжения, чтобы оторвать молекулы друг от друга.



Рис. 1.9

На рис. 1.10, а представлен график изменения молекулярных сил взаимодействия с расстоянием.

На рис. 1.10, б дан график изменения потенциальной энергии взаимодействия молекул с расстоянием между ними.

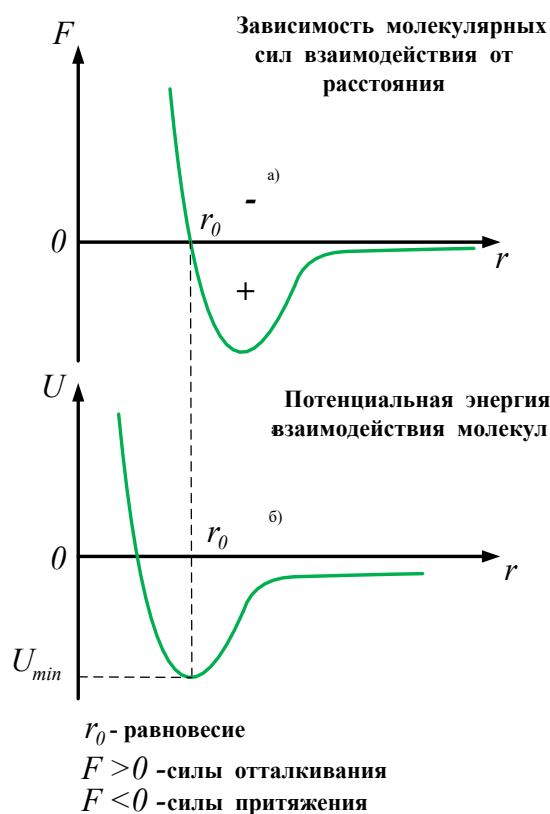


Рис. 1.10

Зависимость агрегатного состояния вещества от средней кинетической энергии хаотического теплового движения молекул kT

Как было отмечено ранее: «Вещество находится в твердом состоянии в случае низких температур, и этому состоянию соответствует соотношение $kT \ll |U_{\min}|$. Вещество находится в газообразном состоянии в случае очень больших температур $kT \gg |U_{\min}|$. Вещество находится в жидком состоянии, когда все молекулы близки к устойчивому состоянию равновесия $kT \approx |U_{\min}|$ » [3, с. 36].

Любое вещество в зависимости от температуры может находиться в жидком, твердом и газообразном состояниях. Давление влияет на этот переход.

2. Уравнение состояния реального газа

Уравнение состояния реального газа для одного моля газа – это уравнение Ван-дер-Ваальса (1873)

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

В реальных газах необходимо учитывать объем b , занимаемый самими молекулами газа. Тогда объем, представленный для свободного движения молекул, будет равен $(V - b)$.

В реальных газах необходимо учитывать также характер сил взаимодействия между молекулами. При этом будет возникать дополнительное давление $P = a/V^2$.

С учетом этих особенностей Ван-дер-Ваальсом было получено уравнение состояния для реального газа только для одного моля газа.

Если раскрыть скобки в уравнении Ван-дер-Ваальса и привести его к общему знаменателю, то получится кубическое уравнение относительно V . Значит, у такого уравнения должно быть три решения относительно объема. Причем в зависимости от P и T либо все три решения вещественные, либо одно решение – вещественное, а два – комплексные.

3. Изотермы Ван-дер-Ваальса

Теоретические изотермы, полученные из уравнения Ван-дер-Ваальса, представлены на рис. 1.11.

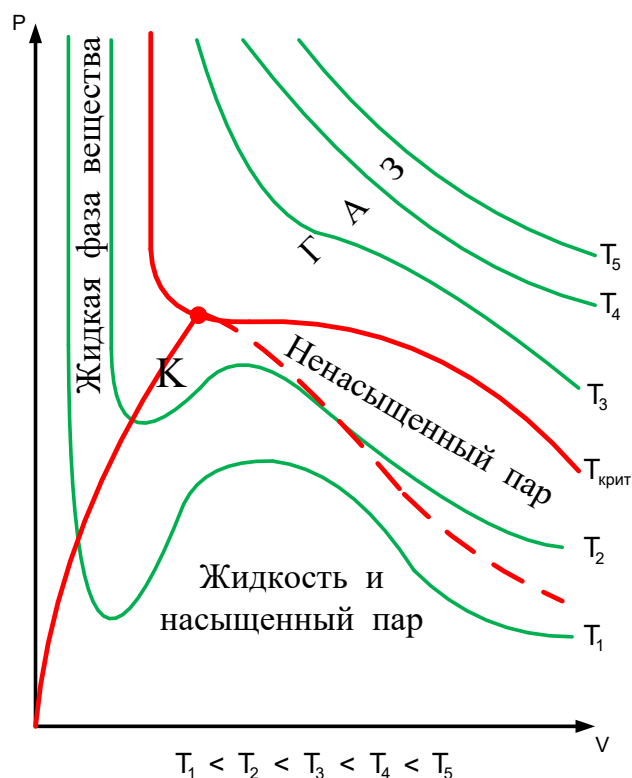


Рис. 1.11

Приведя все члены к общему знаменателю, мы получим уравнение относительно трех объемов V_1, V_2, V_3 (рис. 1.12).

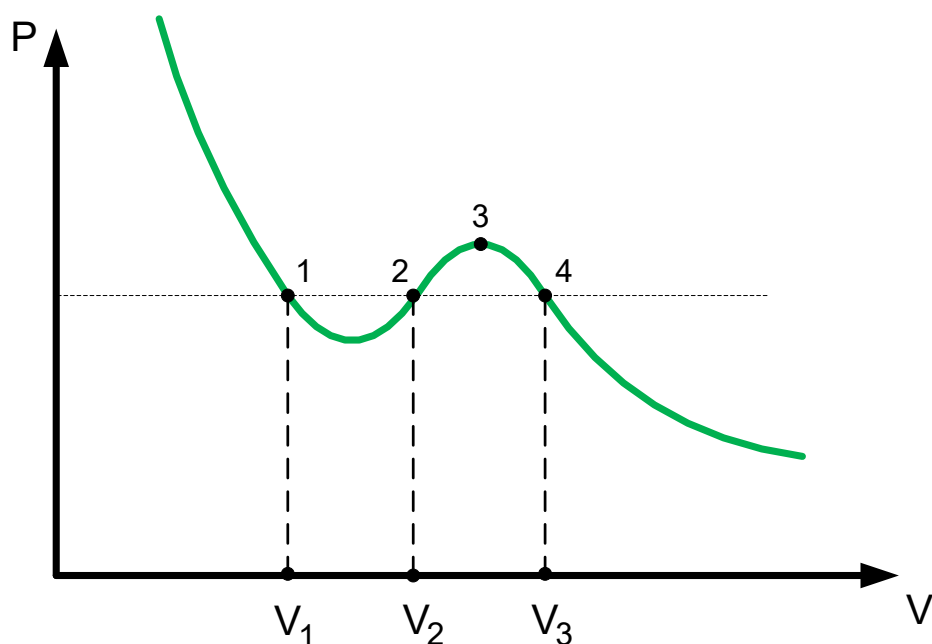


Рис. 1.12

При температуре T_1 все три решения вещественны V_1, V_2, V_3 . С повышением T различие между тремя вещественными решениями уменьшается. При некоторой *критической температуре* T_k при любом давлении P вещественно будет только одно решение. Это критическая температура (k – точка перегиба в критической изотерме). В этой точке P_k, V_k, T_k – критические величины.

При критической температуре исчезают различия в физических свойствах жидкости и газа (для каждого газа своя k).

Понятие **критической температуры** впервые было введено Д. И. Менделеевым. Он назвал ее **температурой абсолютного кипения жидкости** – температурой, при которой исчезают силы сцепления между молекулами и жидкость превращается в пар независимо от P и V .

При таких температурах охлаждение не может быть осуществлено никаким сжатием. Выше критической изотермы вещество может находиться только в газообразном состоянии.

4. Метастабильные состояния вещества

На изотермах Ван-дер-Ваальса при $T < T_{кр}$ имеются области с впадинами и горками (двухфазное состояние вещества) (см. рис. 1.12).

В этих областях вещество не может быть однородным и расслаивается на две фазы. **Фаза вещества** – это определенное агрегатное состояние вещества: жидкое, твердое, газообразное. Переход вещества из одной фазы в другую называют **фазовым переходом**.

На рис. 1.12 представлена одна из изотерм с двумя «горбами». При попытках экспериментально воспроизвести изотерму реального газа в зоне «горбов» на экспериментальной изотерме получается прямолинейный участок (1 – 4) (см. рис. 1.12).

Несмотря на сложность ситуации, эти состояния можно реализовать.

Например, *перенасыщенный пар* (1 – 2) – рабочее вещество в камере Вильсона (это устройство – старейший следовый регистратор заряженных частиц (1912)). *Перегретая жидкость* (2 – 3) – рабочее вещество в пузырьковой камере.

5. Тройная точка

Тройная точка – точка на плоскости P, t °C, в которой возможно равновесие трех фаз однокомпонентного вещества.

Например, система лед, воздух и пар (рис. 1.13) может находиться в равновесии при $P = 6 \cdot 10^{-3}$ бар и $t = 0,01$ °C

$$\left(\begin{array}{l} 1 \text{ атм} \approx 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot 1,013 \\ 1 \text{ мм рт. ст.} \approx 1,33 \cdot 10^2 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \end{array} \right)$$

В точке на графике $t = 0,01$ °C, $P = 6 \cdot 10^2$ Па.

Тройная точка равновесия (рис. 1.13) трех агрегатных состояний – газ, жидкость, твердое тело – существует у всех веществ, за исключением гелия.

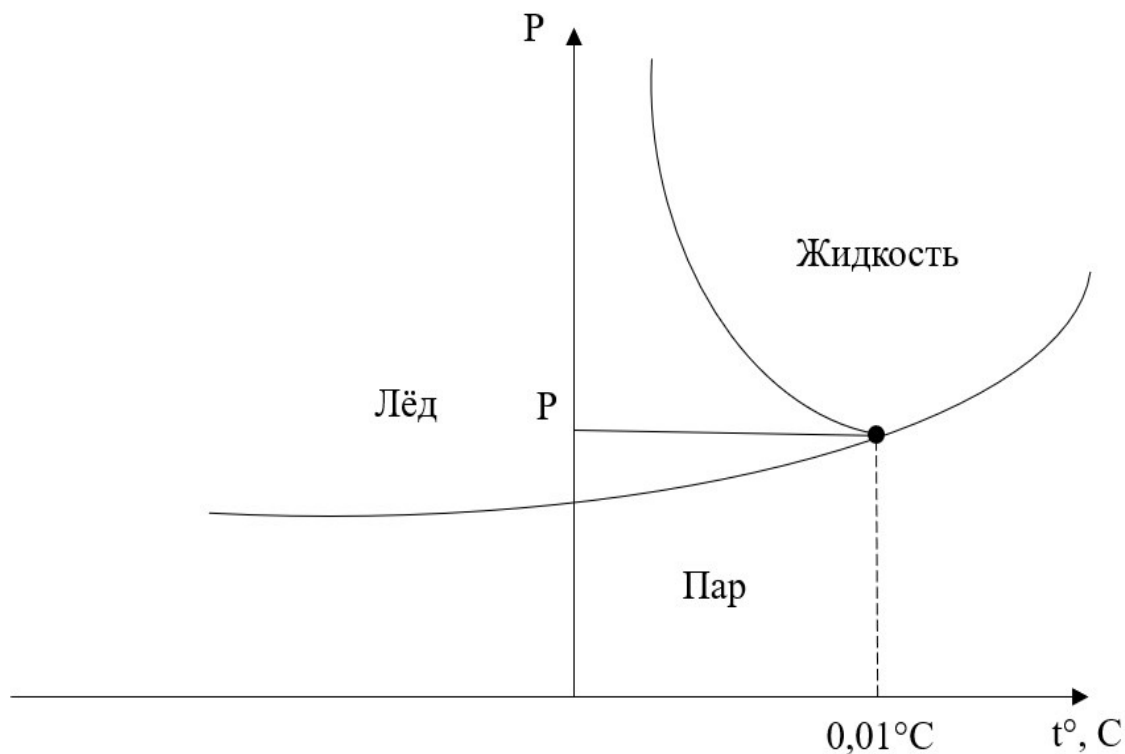


Рис. 1.13

Лекционные демонстрации по разделу «Реальные газы», разработанные на кафедре общей и прикладной физики ВлГУ, представлены в работе А. Ф. Галкина, Л. В. Грунковой, В. В. Дорожкова (URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307>) [1]. В изучении курса общей физики по разделу «Реальные газы» будет полезен видеокурс В. И. Гервидса (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA>) [2].

Домашнее задание

1. Скачайте полную версию лекции № 3 по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf>.
2. Переведите полную версию лекции на китайский язык. Внимательно изучите материал.
3. Изучите краткий материал, который был записан в лекционной аудитории по теме 3.

4. В начале следующей лекции в аудитории вы будете письменно отвечать на контрольные вопросы по теме 3. Используйте материал полной и краткой версий лекции.

5. Переведите на китайский язык материал темы 4, который будет разбираться на следующей лекции. Принесите на следующую лекцию два варианта темы 4 – оригинал на русском языке и перевод на китайский язык.

Контрольные вопросы

1. Запишите формулу уравнения состояния реального газа и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.

2. Опишите двухфазное состояние «перенасыщенный пар» и его применение.

3. Опишите двухфазное состояние «перегретая жидкость» и его применение.

4. Опишите тройную точку для воды и нарисуйте график.

5. Что такое реальный газ?

6. Какую температуру называют критической?

7. Запишите выражение для внутренней энергии ван-дер-ваальсовского газа и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.

8. Поясните структуру графиков изотерм реальных газов.

9. Чем реальные газы отличаются от идеальных газов?

Тема 4. ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ

План

1. Фазовые переходы I рода.
2. Фазовые переходы II рода.
3. Тройная точка, точка равновесия фаз.
4. Внутренняя энергия реального газа.
5. Эффект Джоуля – Томсона.
6. Сжижение газов.

Тема 4 раскрывает понятие фаз вещества, фазовых превращений и форм фазовых переходов. Проанализированы основные свойства фазовых переходов I рода. Обязательное условие для фазовых переходов I рода – или выделение теплоты, или поглощение теплоты. Рассмотрены особенности возникновения фазовых переходов II рода – сверхтекучесть и сверхпроводимость. Возможность таких фазовых переходов существует только при температурах, близких к абсолютному нулю. При сверхтекучести возникает состояние вещества, называемое квантовой жидкостью. Сверхпроводимость обеспечивается куперовскими парами электронов вследствие взаимной компенсации магнитных полей электронов, приводящей к движению свободных электронов в проводниках практически без потерь энергии. Рассмотрен эффект Джоуля – Томсона и механизм сжижения газов.

1. Фазовые переходы I рода

Существуют следующие фазы: жидкая, твердая, газообразная, плазма.

Как было отмечено ранее: **«Фазовыми превращениями называют такие процессы, в результате которых свойства вещества меняются скачком. Фазовые превращения бывают двух типов. Фазовыми превращениями I рода называют процессы, при которых плотность тела изменяется скачком и при этом поглощается или выделяется теплота»** [3, с. 46].

Виды фазовых превращений I рода:

Испарение	↔	Конденсация
Плавление	↔	Кристаллизация
Возгонка	↔	Сублимация

2. Фазовые переходы II рода

Фазовые переходы II рода – процессы, в результате которых скачком изменяется зависимость свойств тела от температуры и давления, плотность не изменяется, энергия не выделяется и не поглощается. Такие переходы наблюдаются при температурах, близких к абсолютному нулю (-273 K).

Сверхтекучесть

Явление сверхтекучести открыл в 1938 году Петр Леонидович Капица. В 1941 году Лев Давидович Ландау объяснил физику явления сверхтекучести (квантовой жидкости). Например, переход гелия в сверхтекучее состояние происходит при $T > 2,2\text{ K}$. При $T = 2,2\text{ K}$ гелий – обыкновенная вязкая жидкость. При $T = 2,2\text{ K}$ и $P = 38,8\text{ мм рт. ст.}$ вязкость гелия скачком падает до нуля.

Сверхтекучесть – особое свойство квантовой жидкости; отсутствие трения при взаимодействии жидкого газа со стенками сосуда. Сверхтекучая компонента движется потенциально: потенциальное течение – безвихревое, без сопротивления со стороны обтекаемых предметов.

Сверхпроводимость

Сверхпроводимость наблюдается при температурах вблизи абсолютного нуля у некоторых проводников и позволяет передавать электроэнергию по проводам без потерь, т. е. можно возбудить незатухающий ток. Сверхпроводимость была открыта Х. Камерлинг-Оннесом в 1911 году. **Вблизи абсолютного нуля сопротивление некоторых проводников падает до нуля.**

При сверхпроводимости электроны объединяются парами с противоположно направленными спинами (направления вращения электронов вокруг своей оси противоположны друг другу). Суммарный спин такой пары электронов отсутствует. Такие пары электронов были названы *куперовскими парами*, и в них магнитные поля, создаваемые вращениями электронов, скомпенсированы. При движении таких пар электронов по проводнику под действием приложенного напряжения будут практически отсутствовать электромагнитные взаимодействия пар с узлами кристаллической решетки проводника. Протекание тока по проводнику наблюдается без потерь энергии.

3. Тройная точка, точка равновесия фаз

Все три фазы любого вещества (твердая, жидкая, газообразная) встречаются в одной точке при определенных давлениях и температурах, которым на диаграмме P, T соответствует тройная точка (рис. 1.14) – точка равновесия трех фаз вещества. На рис. 1.14 по оси X откладываем температуру, а по оси Y – давление. **Наблюдаем три кривые равновесия фаз: плавление, испарение, сублимацию.**

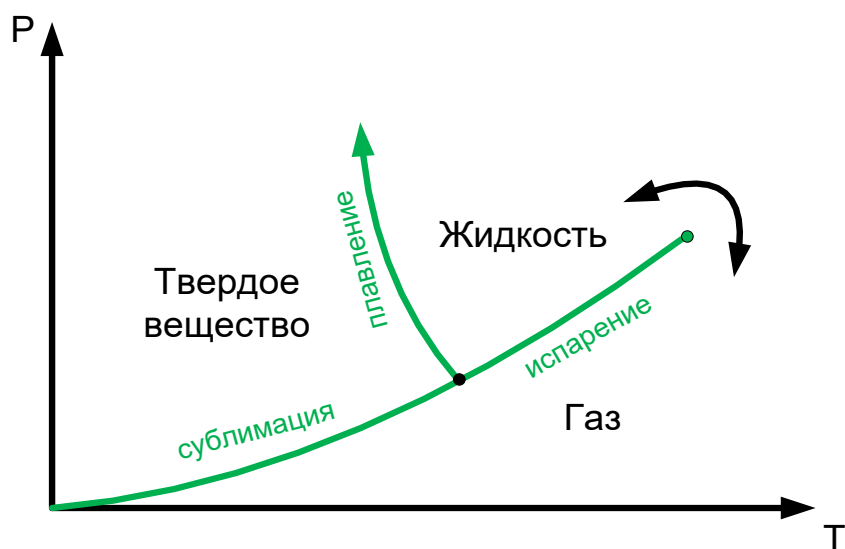


Рис. 1.14

Тройная точка – условия равновесия трех фаз.

Тройная точка для воды показана на рис. 1.15.

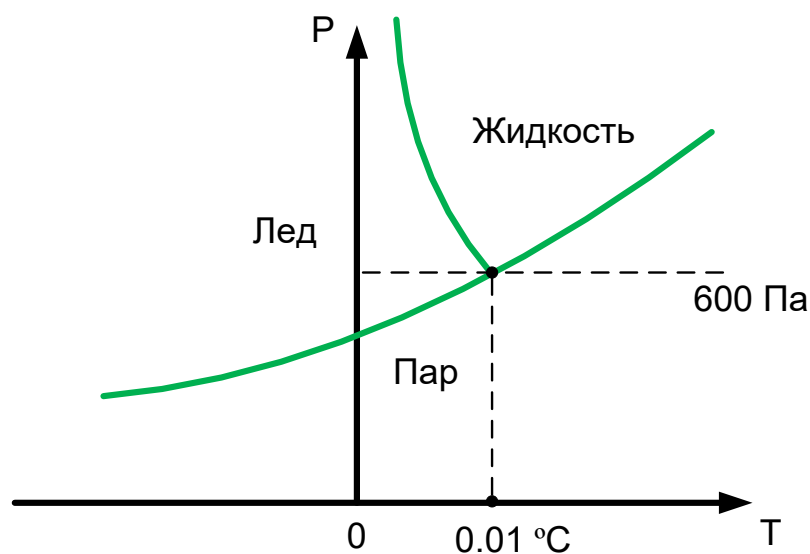


Рис. 1.15

4. Внутренняя энергия реального газа

Внутренняя энергия U для реального газа должна включать кроме кинетической энергии молекул также и потенциальную энергию их взаимодействия.

Внутренняя энергия одного моля реального ван-дер-ваальсовского газа будет равна

$$U_{\mu} = C_V T - \frac{a}{V_{\mu}^2},$$

где C_V – теплоемкость при постоянном объеме; T – температура; a – константа, зависящая от сорта газа; V_{μ}^2 – квадрат объема одного моля газа.

5. Эффект Джоуля – Томсона

Эффект Джоуля – Томсона применяют при сжижении газов, т. е. в задачах значительного снижения температур. На рис. 1.16 изображена труба с поршнем и дросселем (пористая перегородка). Движение

поршня сжимает газ между поршнем и дросселем, при этом в промежутке между поршнем и дросселем растут давление и температура (P_1, T_1). При прохождении газа через дроссель происходит падение давления за дросселем и снижение температуры $P_1 > P_2, T_1 > T_2$.

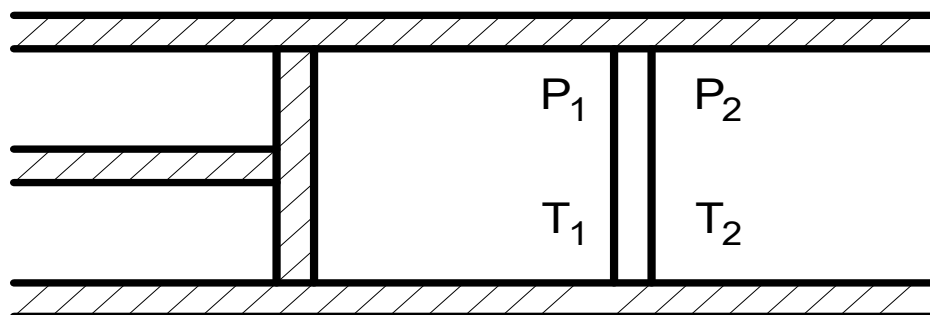


Рис. 1.16

6. Сжижение газов

Для сжижения газов используют машину Линде (рис. 1.17).

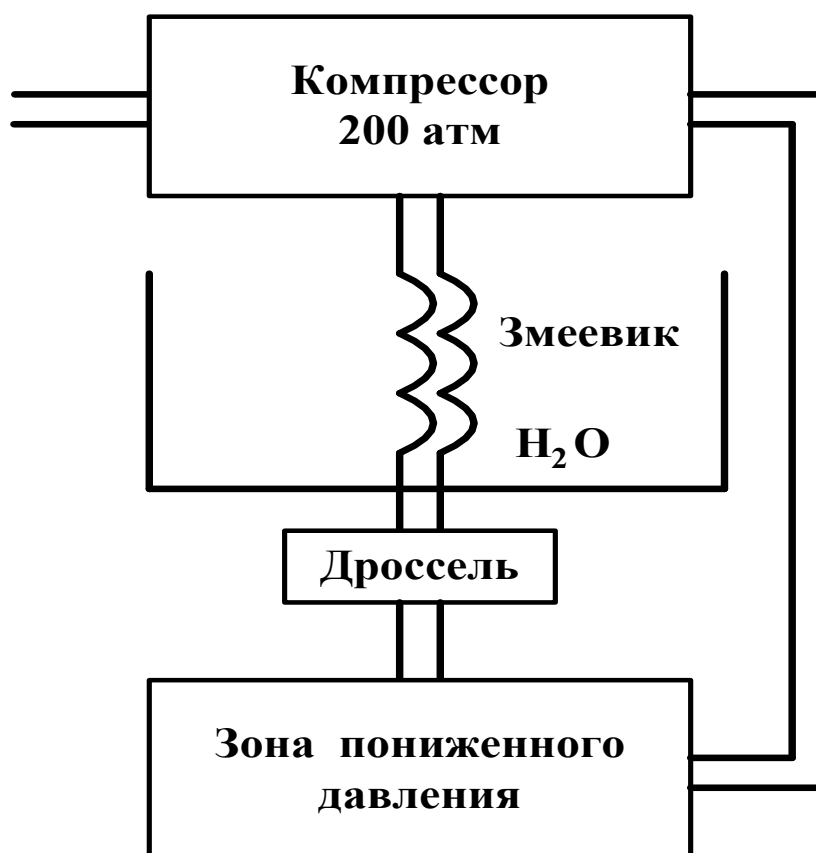


Рис. 1.17

Компрессор засасывает атмосферный воздух и сжимает его до давления $P = 200$ атм. Происходит практически адиабатное сжатие воздуха. Далее при прохождении через змеевик происходит снижение температуры газа. Змеевик очень холодный, так как он охлаждается проточной водой. Сжатый воздух поступает в резервуар большего объема и пониженного давления, проходя через узкий кран – дроссель. Роль дросселя – еще больше снизить температуру газа (эффект Джоуля – Томсона).

Исходный объем газа несколько раз прогоняют по этому замкнутому циклу. Через 6 – 8 часов работы машины Линде температура газа падает $T \downarrow$ так, что 5 – 8 % всего объема газа переходит в жидкую фазу.

(См. [Критическое состояние эфира](#); [Перегретая жидкость](#); [Свинцовый колокольчик](#); [Хрупкая резина](#); [Металл в жидком азоте](#); [Туман и жидкий азот](#).)

Лекционные демонстрации по разделу «Фазовые переходы», разработанные на кафедре общей и прикладной физики ВлГУ, представлены в работе А. Ф. Галкина, Л. В. Грунковой, В. В. Дорожкова (URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307>) [1]. В изучении курса общей физики по разделу «Фазовые переходы» будет полезен видеокурс В. И. Гервидса (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA>) [2].

Домашнее задание

1. Скачайте полную версию лекции № 4 по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf>.
2. Переведите полную версию лекции на китайский язык. Внимательно изучите материал.
3. Изучите краткий материал, который был записан в лекционной аудитории по теме 4.
4. В начале следующей лекции в аудитории вы будете письменно отвечать на контрольные вопросы по теме 4. Используйте материал полной и краткой версий лекции.

5. Переведите на китайский язык материал темы 5, который будет разбираться на следующей лекции. Принесите на следующую лекцию два варианта темы 5 – оригинал на русском языке и перевод на китайский язык.

Контрольные вопросы

1. Что такое фазы вещества?
2. Что такое фазовые переходы I рода и каковы их особенности?
3. Поясните основные свойства фазовых переходов II рода.
4. Что такое сверхпроводимость?
5. Что такое свехтекучесть?
6. Запишите формулу внутренней энергии реального газа и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
7. Опишите эффект Джоуля – Томсона.
8. Опишите свойства жидкого воздуха (кислорода).
9. Опишите машину Линде и процесс сжижения газов в этой машине.
10. Что такое квантовая жидкость и каковы ее свойства и условия существования?
11. Что такое куперовские пары электронов и каким образом они позволяют электрическому току протекать по проводам без потерь энергии?
12. Перечислите фазовые превращения I рода.

Тема 5. ЖИДКОЕ СОСТОЯНИЕ ВЕЩЕСТВА

План

1. Характеристика жидкого состояния.
2. Поверхностное натяжение.
3. Давление под искривленной поверхностью.
4. Смачивание.
5. Капиллярные явления.

В теме 5 представлены основные характеристики жидкого состояния вещества. Изложены процесс возникновения сил поверхностного натяжения в жидкости и причины возникновения дополнительного давления под искривленной поверхностью жидкости (лапласово давление). Рассмотрены условия смачивания и несмачивания жидкостью поверхностей тел. Подробно рассмотрены капиллярные явления.

1. Характеристика жидкого состояния

Жидкость – агрегатное состояние вещества, промежуточное между твердым и газообразным. Существует ряд особенностей, свойственных только жидкости: текучесть, несжимаемость.

Согласно Я. И. Френкелю, тепловое движение молекул в жидкости следующее: каждая молекула в течение определенного момента времени колеблется относительно положения равновесия, затем молекулы скачком перемещаются в новое положение на расстояние порядка размеров самой молекулы. С повышением температуры возрастает подвижность, а вязкость снижается.

2. Поверхностное натяжение

Потенциальная энергия молекулы внутри жидкости меньше, чем вне жидкости. Результирующая сила, действующая на молекулы внутри жидкости, равна нулю (рис. 1.18).

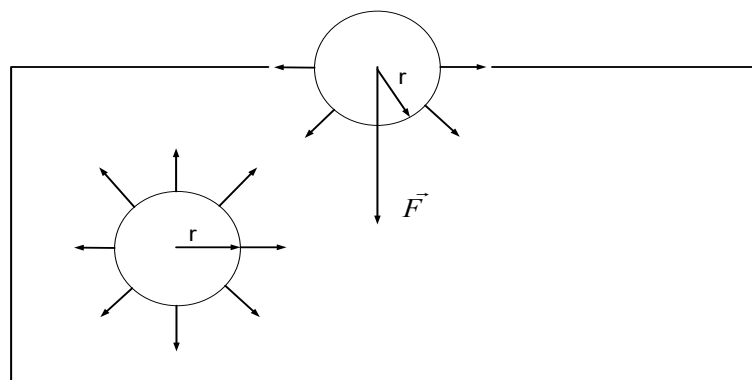


Рис. 1.18

На рисунке буквой r обозначен радиус молекулярного действия (сфера молекулярного действия).

Поверхностный слой находится в иных условиях. На весь слой, лежащий у поверхности жидкости, действуют силы, направленные нормально внутрь жидкости (рис. 1.18). Поверхностный слой оказывает на жидкость давление (молекулярное давление). Для воды это дополнительное давление равно $P' = 17\,000$ атм.

Если на некоторый объем жидкости не действуют внешние силы, то жидкость принимает форму сферы. Из всех геометрических тел сфера имеет при данном объеме наименьшую поверхность. Поверхность жидкости как натянутая пленка. Чтобы растянуть пленку, к ее границе надо приложить силу $\vec{F}$, касательную к поверхности жидкости, называемую **силой поверхностного натяжения**. Эта сила тем больше, чем больше длина границы пленки (l)

$$F_{\text{натяжения пленки}} = \alpha l,$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения.

С ростом температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается.

Поверхностное натяжение объясняет образование капель. Силы поверхностного натяжения можно наблюдать на мыльных пузырях и мыльной пленке.

Сила поверхностного натяжения капли в два раза больше силы поверхностного натяжения плоского варианта пленки

$$F_{\text{натяжения капли}} = 2\alpha l.$$

3. Давление под искривленной поверхностью

Рассмотрим поверхность жидкости, опирающейся на плоский контур (рис. 1.19).

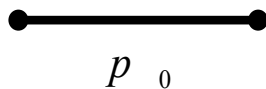


Рис. 1.19

Как было отмечено ранее: если поверхность жидкости не плоская, то стремление ее к сокращению приведет к возникновению дополнительного давления по отношению к тому, которое испытывает жидкость с плоской поверхностью. В случае выпуклой поверхности жидкости это давление положительно (рис. 1.20) [3, с. 60]

$$P = P_0 + \Delta p.$$

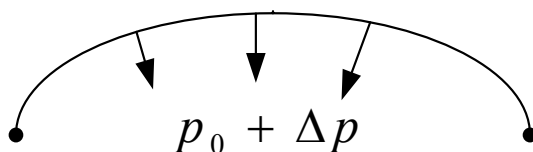


Рис. 1.20

В случае вогнутой поверхности это дополнительное давление отрицательно (рис. 1.21).

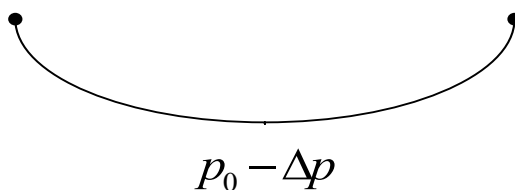


Рис. 1.21

Дополнительное давление зависит от коэффициента поверхностного натяжения жидкости и радиуса кривизны поверхности жидкости $\Delta p = f(\alpha, R)$.

Для сферической поверхности жидкости (рис. 1.22) дополнительное давление будет равно

$$\Delta p = \frac{2\pi R\alpha}{\pi R^2} = \frac{2\alpha}{R}.$$

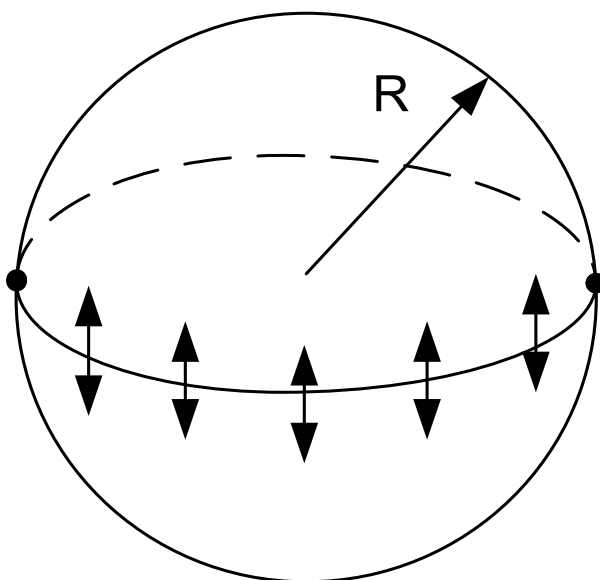


Рис. 1.22

Кривизна поверхности

$$H = 1/R,$$

где R – радиус кривизны поверхности.

В геометрии доказано, что кривизна поверхности любой формы

$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Для сферы $R_1 = R_2 = R$, и тогда дополнительное давление равно

$$\Delta p = 2H\alpha.$$

Лаплас доказал, что формула справедлива для поверхности любой формы

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Формула Лапласа (лапласово давление)

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Добавочное давление, которое иногда называют капиллярным давлением, изменяет уровень жидкости в узких трубках (капиллярах).

4. Смачивание

При рассматривании явлений на границе жидкость – твердое тело (рис. 1.23) будет наблюдаться явление смачивания поверхности твердого тела.

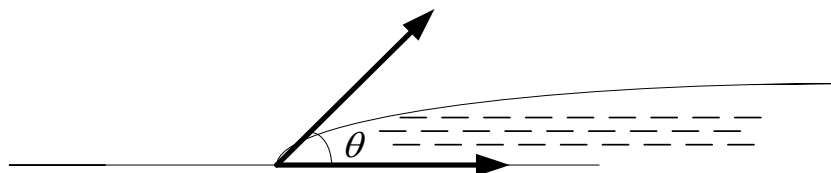


Рис. 1.23

Угол между поверхностью твердого тела и касательной к жидкости θ – краевой угол.

Если θ меньше $\pi/2$, жидкость смачивает тело (см. рис. 1.23).

Если θ больше $\pi/2$, жидкость не смачивает тело.

При θ , равном нулю, наблюдается полное смачивание.

При θ , равном π , наблюдается полное несмачивание.

Несмачивание может приводить к любопытным явлениям: например, иголка в жире не тонет.

5. Капиллярные явления

Капиллярами называют узкие трубки. Явление смачивания в капилляре представлено на рис. 1.24, а, явление несмачивания – на рис. 1.24, б.

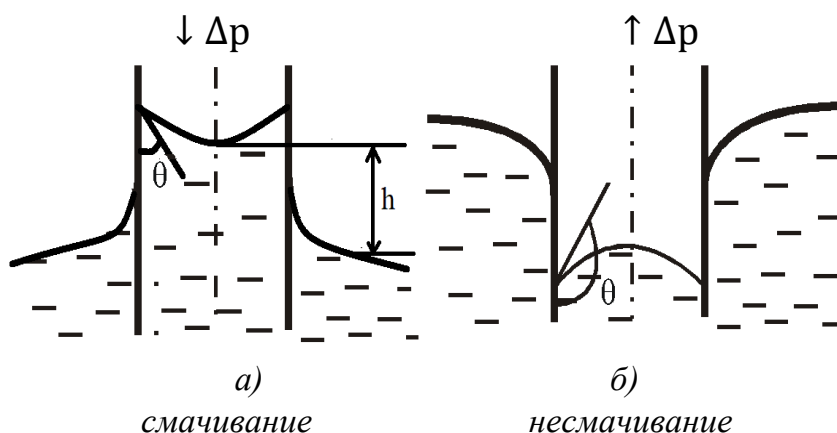


Рис. 1.24

Если поверхность жидкости искривлена, то силы поверхностного натяжения создают дополнительное давление на жидкость

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Тогда суммарное давление будет равно

$$p = p_0 \pm \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Если капилляр погрузить одним концом в жидкость, то при смачивании капилляра уровень жидкости в нем будет выше уровня жидкости в сосуде, при несмачивании – ниже уровня жидкости в сосуде (рис. 1.25).

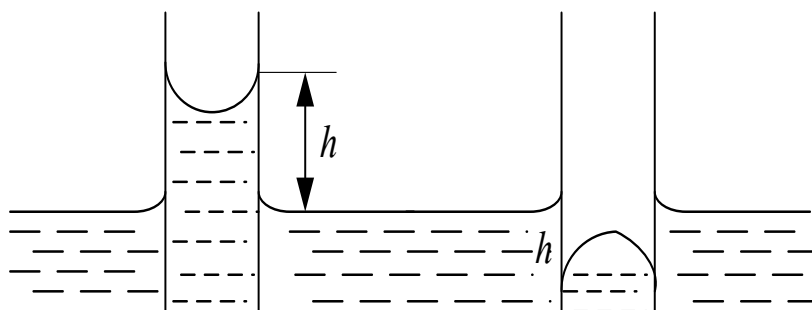


Рис. 1.25

Изменение высоты уровня в узких трубках называют **капиллярностью**.

Давление, создаваемое столбом жидкости,

$$\Delta p = \rho g h = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Если капилляры имеют круглое сечение, то

$$\rho g h = \frac{2\alpha}{R},$$

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g R}.$$

Как было отмечено ранее: «Явления капиллярности играют большую роль в природе и практической жизни. Проникновение воды в почву и во всякого рода пористые материалы происходит за счет капиллярности» [3, с. 64].

(См. [Плавание лезвия](#); [Парафиновый шар в воде \(плавание в воде\)](#); [Парафиновый шар в воде \(подъем из-под воды\)](#); [Вода в сообщающихся капиллярах](#); [Вода в капиллярах разного диаметра](#); [Опыт с ликоподием \(с каплей мыльной воды\)](#); [Опыт с ликоподием \(с парами эфира\)](#); [Рамка с перекладиной](#); [Мыльные пленки на каркасах](#); [Капля воды и ртути](#); [Поплавок Ван-дер-Месбрюгге](#); [Сообщающиеся мыльные пузыри](#); [Вода в решетке](#).)

Лекционные демонстрации по разделу «Жидкое состояние вещества», разработанные на кафедре общей и прикладной физики ВлГУ, представлены в работе А. Ф. Галкина, Л. В. Грунсковой, В. В. Дорожкова (URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307>) [1]. В изучении курса общей физики по разделу «Жидкое состояние вещества» будет полезен видеокурс В. И. Гервидса (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA>) [2].

Домашнее задание

1. Скачайте полную версию лекции № 5 по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf>.
2. Переведите полную версию лекции на китайский язык. Внимательно изучите материал.
3. Изучите краткий материал, который был записан в лекционной аудитории по теме 5.
4. В начале следующей лекции в аудитории вы будете письменно отвечать на контрольные вопросы по теме 5. Используйте материал полной и краткой версий лекции.
5. Переведите на китайский язык материал темы 6, который будет разбираться на следующей лекции. Принесите на следующую лекцию два варианта темы 6 – оригинал на русском языке и перевод на китайский язык.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику жидкого состояния вещества.
2. За счет чего возникает сила поверхностного натяжения жидкостей?
3. Запишите формулу Лапласа и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
4. Сформулируйте условия смачивания поверхностей жидкостями.
5. В чем заключаются капиллярные явления?
6. Запишите формулу давления, создаваемого столбом жидкости. Дайте название всем компонентам, входящим в формулу.
7. От чего зависит высота поднятия жидкости в капилляре?

Тема 6. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

План

1. Основные свойства явлений физической кинетики.
2. Средняя длина свободного пробега молекул.
3. Диффузия.
4. Теплопроводность.
5. Вязкость, или внутреннее трение.

Тема 6 посвящена элементам физической кинетики. Явления переноса, или физическая кинетика, играют важную роль в различных явлениях природы, это один из фундаментальных принципов построения макромира. Диффузия, теплопроводность, вязкость (внутреннее трение) – три вида явлений переноса. Основные свойства этих явлений позволяют отличать их от других похожих явлений природы: все явления переноса происходят самопроизвольно и имеют необратимый характер; происходят благодаря броуновскому тепловому движению молекул; связаны с нарушением равновесного состояния в системе; стремятся к установлению равновесия в системе. В теме рассмотрено понятие длины свободного пробега молекул. Установлены основные физические закономерности (законы) всех трех явлений переноса: уравнение диффузии (закон Фика); уравнение теплопроводности (закон Фурье); уравнение вязкости, или внутреннего трения (уравнение Ньютона). Каждое явление переноса рассмотрено в газах, жидкостях и твердых телах, проанализировано влияние различных факторов (температуры, удельного веса, удельной теплоемкости) на протекание процессов. Даны известные данные о коэффициентах теплопроводности, вязкости, диффузии различных веществ и сред.

1. Основные свойства явлений физической кинетики

Основные свойства физической кинетики:

- 1) процессы необратимы;
- 2) процессы идут в сторону меньшего параметра;
- 3) процессы происходят благодаря броуновскому тепловому движению молекул;

4) процессы происходят в результате нарушения равновесия в системе;

5) процессы происходят в сторону установления равновесия в системе;

6) процессы происходят самопроизвольно.

Виды явлений переноса: *диффузия* – возникают потоки молекул разного сорта; *теплопроводность* – возникают потоки тепла при различных температурах в объеме молекул; *вязкость, или внутреннее трение*, – возникают потоки импульсов слоев молекул, движущихся с различными скоростями друг относительно друга.

2. Средняя длина свободного пробега молекул

Длина свободного пробега молекул определяется расстоянием, которое пролетают молекулы без столкновений. При столкновении молекулы сближаются, касаясь друг друга электронными оболочками атомов. Величина, равная $\sigma = \pi d^2$, – эффективное сечение молекулы. Эффективный диаметр молекулы зависит от энергии, а следовательно, и от температуры. С ростом температуры эффективное сечение столкновения будет уменьшаться.

За секунду молекула проходит путь, равный средней скорости, $S = \langle v \rangle$. Если за секунду она претерпевает в среднем γ столкновений, то **средняя длина свободного пробега будет определяться формулой**

$$\lambda = \frac{\langle v \rangle}{\gamma}.$$

Число столкновений молекул за секунду равно числу молекул, центры которых попадут внутрь цилиндра, имеющего радиус d , который можно нарисовать вдоль траектории движения молекулы (рис. 1.26).

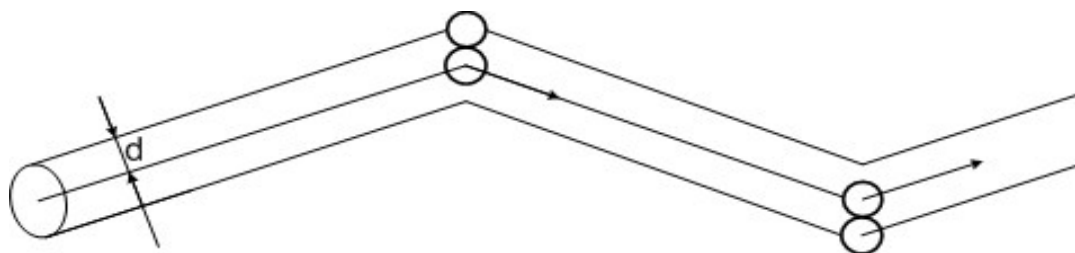


Рис. 1.26

Объем цилиндра равен

$$V = \pi d^2 < v >.$$

Умножив v на число молекул в единицу объема n , получим среднее число столкновений за секунду

$$\gamma' = \pi d^2 < v > n.$$

С учетом движения не одной молекулы, а всех окружающих молекул формула приобретает вид

$$\gamma = \sqrt{2} \pi d^2 < v > n.$$

Тогда средняя длина свободного пробега молекул будет равна

$$\lambda = \frac{< v >}{\sqrt{2} \pi d^2 < v > n} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{1}{\sqrt{2} n \sigma}.$$

Можно оценить λ для газов при нормальных условиях. Размеры молекул $r \approx 10^{-8}$ см. При нормальных условиях число молекул в единице объема $n_0 \approx 3 \cdot 10^{19}$, а средняя скорость молекул $< v > \approx 5 \cdot 10^4$ см/сек и среднее число столкновений $\gamma \approx 3 \cdot 10^9 \frac{1}{\text{сек}}$.

Тогда длина свободного пробега молекул будет равна

$$\lambda = 5 \cdot 10^4 / 3 \cdot 10^9 \approx 10^{-5} \text{ см.}$$

3. Диффузия

Диффузией называют обусловленное тепловым движением молекул самопроизвольное выравнивание концентрации в смеси молекул различного сорта.

Этот процесс наблюдается в жидких, твердых и газообразных средах.

Как было отмечено ранее: экспериментально для газов установлено, что поток массы i -й компоненты молекул в смеси вдоль оси X через поверхность S перпендикулярно направлению распространения выглядит следующим образом (Закон Фика, 1885) [3, с. 72]:

$$M_i = -D \frac{d\rho_i}{dx} S,$$

где M_i – поток массы (кг/с); D – коэффициент диффузии (зависит от сорта газа и условий, при котором он находится) ($\text{м}^2/\text{с}$); $\frac{d\rho_i}{dx}$ – градиент плотности i -х молекул.

Это уравнение называют **уравнением диффузии**.

Знак «минус» обусловлен тем, что поток направлен в сторону убывания парциальной (ρ_i) плотности газа (плотность конкретного вида молекул).

Длина свободного пробега молекул в газах

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}.$$

Коэффициент диффузии для газов

$$D_r = \frac{1}{3}\lambda \langle v \rangle.$$

Коэффициент диффузии для газов имеет значение

$$D_r \approx 10^{-5} \div 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Коэффициент диффузии для жидкости

$$D_{\text{ж}} = \frac{kT}{6\pi\eta r},$$

где η – коэффициент динамической вязкости.

Диффузия в жидкостях пропорциональна температуре (T).

Диффузия в жидкостях осуществляется путем переноса молекул из одного устойчивого положения в другое.

Диффузия в твердых телах – обмен местами атомов в узлах кристаллической решетки. Коэффициент диффузии в твердых телах

$$D_{\text{ТВ}} = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right),$$

где D_0 – фактор диффузии; Q – энергия активации.

Диффузия в твердых телах происходит медленно.

Диффузию нельзя путать с конвекцией. Конвекция, например, наблюдается при перемешивании сахара в воде ложкой. Если же не вмешиваться в процесс растворения сахара, то процесс будет проходить самопроизвольно, и это уже будет диффузия.

4. Теплопроводность

Перенос теплоты, возникающий в системе молекул при отклонении температуры от равновесного значения в некоторой области в системе молекул, называют теплопроводностью.

Если в некоторой среде вдоль оси X есть градиент температуры T , то возникает тепловой поток q .

Закон Фурье (Франция, 1822)

$$q = -\kappa \frac{dT}{dx} S,$$

где q – тепловой поток (Дж/с); $\frac{dT}{dx}$ – градиент температуры вдоль оси X ; S – поверхность, пересекаемая потоком; κ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К).

Знак «минус» отражает тот факт, что теплота течет в направлении убывающей температуры.

Коэффициент теплопроводности характеризует скорость переноса тепла, скорость выравнивания температуры

$$\kappa_{\text{газов}} = \frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda \rho c_v,$$

где c_v – удельная теплоемкость газа; ρ – удельный вес газа.

Коэффициент теплопроводности для воздуха при нормальных условиях

$$\kappa_{\text{воздуха н.у}} = (0,03 - 0,10) \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Как было отмечено ранее: «Значения коэффициентов теплопроводности для некоторых веществ:

$$\kappa_{\text{воздуха}} = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{снега } 0^\circ\text{C}} = 0,16 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{шелка}} = 0,04 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{ваты}} = 0,02 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{древесины}} = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{мех, шерсть}} = 0,03 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} \text{» [3, с. 78].}$$

В жидких и твердых диэлектриках явление теплопроводности обусловлено колебаниями частиц среды: тепловые волны – фононные волны.

Как было отмечено ранее: «Коэффициент теплопроводности жидких и твердых диэлектриков:

$$\kappa_{\text{воды}} = 0,7 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{стекла}} = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{кварца}} = 1,3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{бумаги}} = 0,1 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} \text{» [3, с. 78].}$$

В проводящих средах коэффициент теплопроводности еще выше благодаря электронному газу

$$\kappa_{\text{меди}} = 110 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\kappa_{\text{серебра}} = 300 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}),$$

$$\kappa_{\text{стали}} = 90 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Теплопроводность металлов и сплавов оценивается законом Видемана – Франца

$$\kappa = L_0 \sigma T,$$

где L_0 – коэффициент Лоренца; σ – электропроводность; T – абсолютная температура.

5. Вязкость, или внутреннее трение

Как было отмечено ранее: «В равновесном состоянии различные части фазы покоятся друг относительно друга. При их относительном движении возникают факторы, стремящиеся уменьшить относительную скорость, таким образом возникает сила торможения, или вязкость. Механизм этих сил в газах сводится к обмену импульса упорядоченного движения между различными слоями газа, т. е. к переносу импульса упорядоченного движения. Поэтому возникновение сил трения в газах и жидкостях также обусловлено процессом переноса, а именно процессом переноса импульса упорядоченного движения молекул» [3, с. 81].

Если в потоке жидкости или газа возникают слои молекул с различными скоростями движения друг относительно друга, то будет происходить процесс выравнивания скоростей слоев путем переноса импульса молекул. Этот процесс называют **внутренним трением или вязкостью**.

Уравнение закона вязкости (уравнение Ньютона)

$$K = -\eta \frac{dU}{dx} S,$$

где K – поток импульса, передаваемого от слоя к слою через поверхность S , $(\text{кг} \cdot \text{м})/\text{с}^2$; U – относительная скорость движения слоев жидкости; η – коэффициент вязкости, или вязкость, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}) \rightarrow \text{Па} \cdot \text{с}$.

Знак «минус» обусловлен тем, что изменение импульса направлено в сторону убывания скорости.

С молекулярно-кинетической точки зрения, коэффициент динамической вязкости для газов равен

$$\eta = \frac{1}{3} \langle V \rangle \lambda \rho,$$

где ρ – удельный вес.

Кинематическая вязкость

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{1}{3} \langle V \rangle \lambda,$$

$$\eta_{\text{воздуха}} = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)},$$

$$\eta_{\text{воды}} = 0,01 \cdot 10^{-1} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)} = 10^{-3} \text{ кг/(м} \cdot \text{с)}.$$

В табл. 1.1 представлены основные уравнения явлений переноса.

Таблица 1.1

Основные уравнения явлений переноса

Явление переноса	Формула закона	Коэффициенты для газов
Теплопроводность, Дж/с	Поток тепла $q = -\kappa \frac{dT}{dx} S$	$\kappa = \frac{1}{3} \lambda \langle V \rangle \rho C_V$, Вт/(м · К)
Диффузия, кг/с	Поток массы $M_i = -D \frac{d\rho_i}{dx} S$	$D = \frac{1}{3} \lambda \langle V \rangle$, м ² /с
Вязкость, (кг · м)/с ²	Поток импульса $K = -\eta \frac{dU}{dx} S$	$\eta = \frac{1}{3} \lambda \langle V \rangle \rho$, Па · с

(См. [Диффузия аммиака](#); [Теплопроводность газов. Бутан-воздух](#); [Теплопроводность газов. Неон-воздух](#); [Теплопроводность газов. Воздух-воздух](#); [Вязкость газов](#); [Радиометр](#); [Двигатель Стирлинга](#)).

Лекционные демонстрации по разделу «Элементы физической кинетики», разработанные на кафедре общей и прикладной физики ВлГУ, представлены в работе А. Ф. Галкина, Л. В. Грунковой, В. В. Дорожкова (URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307>) [1]. В изучении курса общей физики по разделу «Элементы физической кинетики» будет полезен видеокурс В. И. Гервидса (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA>) [2].

Домашнее задание

1. Скачайте полную версию лекции № 6 по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf>.

2. Переведите полную версию лекции на китайский язык. Внимательно изучите материал.

3. Изучите краткий материал, который был записан в лекционной аудитории по теме 6.

4. В начале следующей лекции в аудитории вы будете письменно отвечать на контрольные вопросы по теме 6. Используйте материал полной и краткой версий лекции.

5. Переведите на китайский язык материал темы 7, который будет разбираться на следующей лекции. Принесите на следующую лекцию два варианта темы 7 – оригинал на русском языке и перевод на китайский язык.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные свойства явлений переноса.

2. Какое явление физической кинетики называют диффузией?

3. Какое явление физической кинетики называют теплопроводностью?

4. Какое явление физической кинетики называют вязкостью или внутренним трением?

5. Запишите уравнение диффузии в газах и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.

6. Запишите уравнение теплопроводности в газах и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.

7. Запишите уравнение вязкости в газах и дайте название всем компонентам, входящим в формулу.

8. Приведите примеры коэффициентов теплопроводности для различных веществ.

9. Чем диффузия отличается от конвекции? Приведите пример.

10. Какие основные параметры оказывают воздействие на протекание явлений переноса в различных веществах?

ТЕРМОДИНАМИКА

Тема 7. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

План

1. Внутренняя энергия тела, внутренняя энергия термодинамической системы, работа термодинамической системы, теплота.
2. Первое начало термодинамики.
3. Изопроцессы.
4. Работа при изопроцессах.
5. Адиабатический процесс.
7. Теплоемкость.

В теме 7 объясняются условия протекания физических процессов, возможность существования различного рода тепловых механизмов. Рассмотрены следующие понятия: термодинамическая система, внутренняя энергия системы, работа, теплота, термодинамический процесс. Первый закон термодинамики – фактически один из вариантов закона сохранения энергии. Его основная роль заключается в утверждении того, что, получив определенным образом некоторое количество теплоты, можно превратить часть этой теплоты в полезную работу. При этом часть теплоты тратится на внутреннюю энергию (нагревание) объектов, участвующих в этом процессе. Первое начало термодинамики рассматривается для изотермических, изохорических и изобарических процессов. Описываются характер и вид работы при изопроцессах. Особое внимание уделяется адиабатическому процессу, теоретически происходящему без теплообмена с окружающей средой. В природе не существует возможности осуществить такой процесс, но, рассматривая передачу теплоты от тела к телу за короткий промежуток времени, можно в приближении считать процесс близким к адиабатическому.

1. Внутренняя энергия тела, внутренняя энергия термодинамической системы, работа термодинамической системы, теплота

Внутренняя энергия тела складывается из кинетической энергии поступательного и вращательного движений молекул; кинетической и потенциальной энергии колебательного движения атомов в молекулах; потенциальной энергии взаимодействия между молекулами и внутримолекулярной энергии (внутриядерной).

Термодинамической системой называют такую систему, совокупность макроскопических тел которой может обмениваться энергией между собой и с внешней средой (с другими телами) (например, жидкость и находящийся над ней пар).

Внутренняя энергия термодинамической системы тел складывается из внутренней энергии взаимодействия между телами и внутренней энергии каждого тела.

Работа термодинамической системы над внешними телами заключается в изменении состояния этих тел и определяется количеством энергии, которую термодинамическая система передает внешним телам.

Теплота — это количество энергии, предоставляемой системой внешним телам при теплообмене. Работа и теплота являются не функциями состояния системы, а функцией перехода из одного состояния в другое.

Термодинамический процесс — переход системы из одного состояния (P_1, V_1, T_1) в другое (P_2, V_2, T_2), при котором происходит нарушение равновесия в системе.

2. Первое начало термодинамики

Формулировка первого начала термодинамики: количество теплоты, сообщенное системе, идет на приращение внутренней энергии системы и на совершение системой работы над внешними телами.

Первый закон термодинамики

$$Q = U_2 - U_1 + A,$$

где U_1, U_2 — начальное и конечное значения внутренней энергии тела; A — работа, совершаемая системой; Q — количество теплоты, сообщаемое системе.

Работа совершается тогда, когда изменяется объем,

$$d'A = Fdx = pSdx = pdV,$$

$$d'A = pdV.$$

Первое начало термодинамики – фактически закон сохранения энергии, который указывает на возможность получать работу за счет теплообмена. Первый закон термодинамики считают фундаментальным законом физики, т. е. он выполняется в механике, молекулярной физике и термодинамике, электромагнетизме, в колебательных и оптических явлениях.

3. Изопроцессы

1. **Изохорический процесс** – процесс при нагревании газа в замкнутом объеме

$$V = \text{const.}$$

Первое начало термодинамики приобретает следующий вид:

$$d'Q = dU + pdV,$$

$$pdV = 0, d'Q = dU.$$

Теплоемкость (удельная теплоемкость) при $V = \text{const}$

$$C_v = \frac{d'Q}{dT} = \frac{dU}{dT}.$$

2. **Изобарический процесс** – процесс при постоянном давлении

$$P = \text{const},$$

$$d'Q = dU + d'A;$$

$$C_p = C_v + p \frac{R}{p},$$

$$C_p = C_v + R.$$

3. **Изотермический процесс** – процесс при постоянной температуре

$$T = \text{const},$$

$$dU = 0,$$

$$d'Q = d'A.$$

Теплоемкость при постоянном давлении будет равна

$$C_T = \frac{dQ}{dT}.$$

4. **Адиабатический процесс** – процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой. При адиабатическом расширении работа совершается за счет внутренней энергии газа.

Первое начало термодинамики приобретает вид

$$d'Q = 0,$$

$$dU + d'A = 0,$$

$$d'A = -dU.$$

Теплоемкость при адиабатическом процессе равна

$$C_{\text{ад}} = \frac{d'Q}{dT}.$$

4. Работа при изопроцессах

1. Работа при изохорическом процессе

$$V = \text{const},$$

$$d'A = p dV = 0,$$

$$A_v = 0.$$

2. Работа при изобарическом процессе

$$P = \text{const},$$

$$d'A = p dV,$$

$$A_p = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1).$$

3. Работа при изотермическом процессе

$$T = \text{const},$$

$$d'A = p dV.$$

$$A = \int_{V_1}^{V_2} \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V} dV,$$

$$A_T = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

5. Адиабатический процесс

Процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой, называют **адиабатическим**. В природе таких процессов не наблюдается. Теплообмен благодаря явлениям переноса происходит самопроизвольно. Но если осуществить процесс теплообмена, происходящего очень медленно, то при исследовании такого процесса за короткий промежуток времени мы можем считать его приблизительно адиабатическим.

Для адиабатического процесса записывают уравнение Пуассона
 $(TV^{\gamma-1}) = \text{const},$

где γ – показатель адиабаты.

Показатель адиабаты – это отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}.$$

Уравнение адиабатического процесса

$$PV^{\gamma} = \text{const}.$$

Работа при адиабатическом процессе

$$A_{\text{ад}} = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \frac{V_1}{V_2} \right]^{\gamma-1},$$

$$A_{\text{ад}} = \int_{V_1}^{V_2} p dV = - \int_{T_1}^{T_2} C_v dT = -C_v(T_2 - T_1) = C_v(T_1 - T_2).$$

6. Теплоемкость

Теплоемкость тела – 1) количество теплоты, которое надо сообщить телу, чтобы оно нагрелось на 1 °С; 2) величина, равная отношению сообщенного телу количества теплоты dQ к соответствующему приращению температуры dT

$$C = \frac{dQ}{dT} [\text{Дж/К}].$$

Отношение теплоемкости тела к его массе называют удельной теплоемкостью

$$c = \frac{C}{m}, [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})].$$

Молярная теплоемкость (теплоемкость моля вещества)

$$C_{\mu} = \frac{C}{\nu}, [\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{К})],$$

где ν – количество вещества, $\nu = m/\mu$.

Молярная теплоемкость и удельная теплоемкость связаны

$$C_\mu = c_\mu.$$

Объемная теплоемкость (теплоемкость единицы объема)

$$C' = \frac{c}{V}.$$

Теплоемкость в реальных газах

Теплоемкость одного моля при неизменном объеме

$$C_{V_\mu} = \frac{dU_\mu}{dT} = \frac{i}{2} R.$$

Теплоемкость одного моля при неизменном давлении

$$C_{P_\mu} = C_{V_\mu} + R = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R.$$

Лекционные демонстрации по разделу «Термодинамика», разработанные на кафедре общей и прикладной физики ВлГУ, представлены в работе А. Ф. Галкина, Л. В. Грунковой, В. В. Дорожкова (URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307>) [1]. В изучении курса общей физики по разделу «Термодинамика» будет полезен видеокурс В. И. Гервидса (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA>) [2].

Домашнее задание

1. Скачайте полную версию лекции № 7 по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf>.
2. Переведите полную версию лекции на китайский язык. Внимательно изучите материал.
3. Изучите краткий материал, который был записан в лекционной аудитории по теме 7.
4. В начале следующей лекции в аудитории вы будете письменно отвечать на контрольные вопросы по теме 7. Используйте материал полной и краткой версий лекции.
5. Переведите на китайский язык материал темы 8, который будет разбираться на следующей лекции. Принесите на следующую лекцию два варианта темы 8 – оригинал на русском языке и перевод на китайский язык.

Контрольные вопросы

1. Из чего состоит внутренняя энергия тела?
2. Что называют термодинамической системой?
3. Из чего складывается внутренняя энергия термодинамической системы?
4. В чем заключается работа термодинамической системы над внешними телами?
5. Являются ли работа и теплота функциями состояния системы?
6. В чем заключается термодинамический процесс?
7. Сформулируйте первое начало термодинамики, запишите формулу и поясните все компоненты, входящие в уравнение.
8. Запишите формулу теплоемкости для изохорического процесса.
9. Запишите формулу теплоемкости для изотермического процесса.
10. Запишите формулу теплоемкости для изобарического процесса.
11. Какой процесс называют адиабатическим? При каком условии процесс считается адиабатическим?
12. Запишите уравнение Пуассона и поясните все компоненты, входящие в уравнение.
13. Запишите уравнение адиабатического процесса.
14. Какова основная роль первого начала термодинамики?

Тема 8. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

План

1. Цикл Карно: диаграммы цикла Карно; КПД цикла Карно; КПД реальных тепловых машин; теорема Карно; обратный цикл Карно; холодильные машины.
2. Энтропия, закон возрастания энтропии.
3. Основные выводы.

Тема 8 раскрывает смысл второго закона (начала) термодинамики. Невозможны процессы, превращающие теплоту в полезную работу без потерь энергии. Рассмотрен пример работы тепловой машины в виде цикла Карно. Анализируются виды тепловых циклов. Показано, что КПД машины типа цикла Карно является самым большим. Это связано с тем, что цикл Карно рассматривается как замкнутый цикл, чего реально в природе не наблюдается. Также в такой тепловой машине невозможно учесть все потери энергии (на нагревание деталей машины и т. д.). Реальные тепловые двигатели и машины имеют КПД много меньше теоретического.

1. Цикл Карно: диаграмма цикла Карно; КПД цикла Карно; КПД реальных тепловых машин; теорема Карно; обратный цикл Карно; холодильные машины

Равновесным называют состояние системы, в котором система может находиться сколь угодно долго и параметры $p, V, T = \text{const}$.

Циклы могут быть как обратимыми, так и необратимыми.

Различают прямой и обратный циклы.

Цикл Карно – это замкнутый цикл, согласно которому можно представить работу идеальной тепловой машины.

Согласно первому закону термодинамики теплоту можно перевести в полезную работу

$$Q = U_2 - U_1 + A.$$

Исходя из этого уравнения можно заключить, что часть исходной энергии переходит во внутреннюю энергию системы, которая переводит теплоту в полезную работу. Цикл Карно лишь частично учитывает

потери теплоты ($U_2 - - U_1$), поэтому такую тепловую машину называют идеальной и ее КПД получается максимальным. На рис. 1.27 представлена схема цикла Карно по примеру цилиндра, в котором движется поршень под действием теплоты пара (паровая машина).

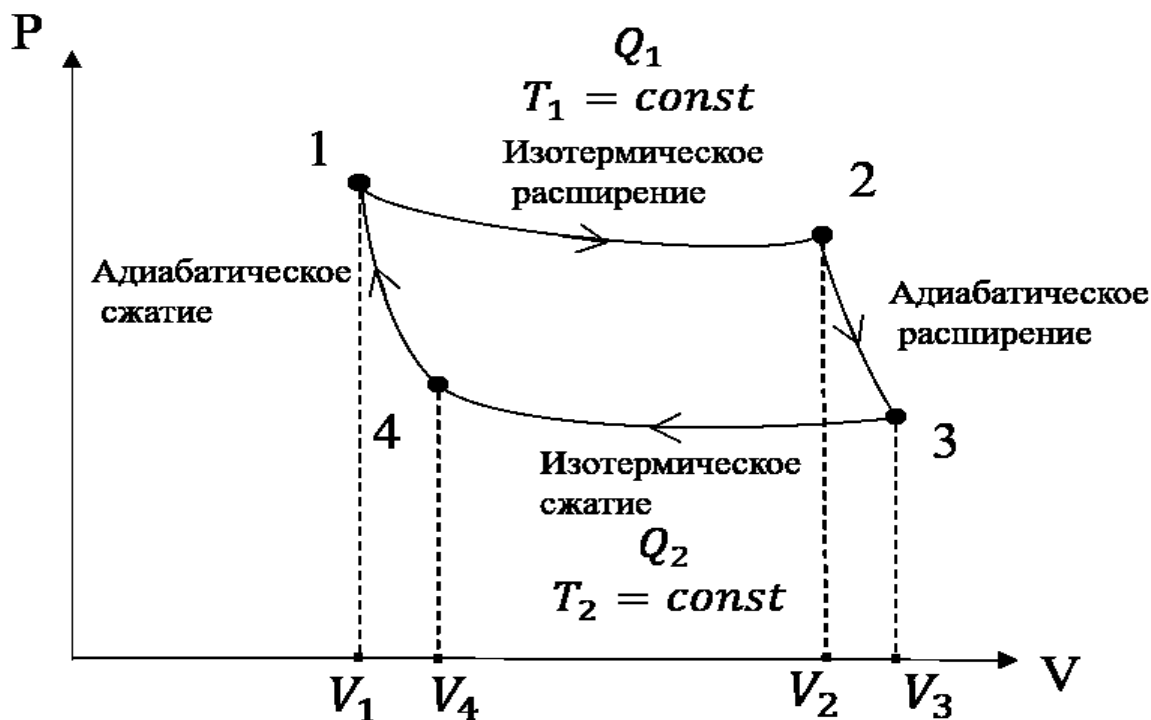


Рис. 1.27

Полезная работа в цикле равна разности полученной теплоты Q_1 и теплоты Q_2 , которая характеризует потери энергии.

Коэффициент полезного действия цикла Карно – это относительное количество тепла, отобранного от нагревателя и переданного рабочему телу – газу,

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

Если известны T_1 нагревателя и T_2 холодильника, то можно получить другую формулу:

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

Коэффициент полезного действия любой тепловой машины η меньше цикла Карно $\eta_{ц.к.}$

$$\eta < \eta_{ц.к.}$$

Реальный КПД электростанций, вырабатывающих энергию для обогрева, не более 30 %; КПД атомных электростанций – в тех же пределах из-за невозможности работать при высоких первоначальных температурах.

Обратный цикл Карно соответствует работе холодильной машины.

Работу холодильной машины оценивает коэффициент преобразования холодной машины

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

2. Энтропия, закон возрастания энтропии

Энтропия – мера неупорядоченности системы многих частиц. Чем выше степень беспорядка в координатах и скоростях частиц системы, тем больше вероятность p того, что система будет находиться в состоянии беспорядка.

Энтропия системы определяется как

$$S \equiv k \ln p,$$

где k – постоянная Больцмана.

Изменение энтропии

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k \ln p_2 - k \ln p_1,$$

$$\Delta S = k \ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right).$$

Для идеального газа изменение энтропии равно отношению теплоты ΔQ изотермического расширения идеального газа к определенной температуре

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} \text{ или } dS = \frac{d'Q}{T}.$$

Энтропия изолированной системы может только возрастать и по достижении максимального значения остается постоянной (не убывает). Так, Р. Клаузиус в 1867 году, применяя этот факт ко всей Вселенной, пришел к неверному выводу о «тепловой смерти Вселенной». Но нельзя забывать, что $\Delta S \geq 0$ для абсолютно замкнутой системы. Реальные системы не замкнуты.

3. Основные выводы

1. Можно построить тепловую машину, преобразующую тепло в работу.

2. Работа, получаемая при тепловом процессе, максимальна, если процесс обратим.

3. Коэффициент полезного действия обратимых процессов выше, чем у необратимых. Реальные процессы необратимы.

4. Максимальное КПД у тепловых машин, работающих по циклу Карно, – это идеальный случай, исключающий потери на трение.

5. Нельзя забрать тепло более холодного тела и превратить его в полезную работу без дополнительных затрат энергии, самопроизвольно этот процесс недостижим (холодильная машина).

6. Невозможны процессы, единственным конечным результатом которых стало бы отнятие от некоторого тела определенного количества тепла и превращение этого тепла в работу.

7. Первый закон термодинамики – закон сохранения энергии, исключающий возможность вечного двигателя первого рода, который бы совершил работу из ничего, без источника.

8. Второй закон термодинамики исключает возможность построения вечного двигателя второго рода за счет тел, находящихся в тепловом равновесии, и за счет непосредственной передачи теплоты от менее нагретого к более нагретому телу или прямого преобразования теплоты в работу.

9. Второй закон (начало) термодинамики – фундаментальный закон природы.

10. Невозможно совершить работу за счет энергии тел, находящихся в тепловом равновесии.

11. Закон возрастания энтропии имеет два следствия: невозможен процесс, при котором тепло самопроизвольно переходит от менее нагретых тел к более нагретым (Клаузиус); невозможно получить работу за счет систематического охлаждения одного тела без каких-либо изменений во всех других телах. Ни одна тепловая машина не имеет $\eta > \eta_{ц.к.}$.

12. Второе начало термодинамики позволяет построить тепловые машины, преобразующие тепло в работу.

Лекционные демонстрации по физике по разделу «Термодинамика», разработанные на кафедре общей и прикладной физики ВлГУ, представлены в работе А. Ф. Галкина, Л. В. Грунсковой, В. В. Дорожкова (URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307>) [1]. В изучении курса общей физики по разделу «Термодинамика» будет полезен видеокурс В. И. Гервидса (URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA>) [2].

Домашнее задание

1. Скачайте полную версию лекции № 8 по ссылке: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf>.
2. Переведите полную версию лекции на китайский язык. Внимательно изучите материал.
3. Изучите краткий материал, который был записан в лекционной аудитории по теме 8.
4. В начале следующей лекции в аудитории вы будете письменно отвечать на контрольные вопросы по теме 8. Используйте материал полной и краткой версий лекции.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается равновесное состояние термодинамической системы?
2. Какие процессы называют обратимыми и необратимыми?
3. Какие бывают циклы?
4. Нарисуйте диаграмму цикла Карно и поясните работу машины Карно.
5. Как рассчитывают КПД тепловых машин?
6. Поясните применение обратного цикла Карно на практике.
7. Что такое энтропия?
8. В чем заключается закон возрастания энтропии и каковы условия его осуществления?
9. Приведите формулировки второго начала термодинамики.

II. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПО ФИЗИКЕ И ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Тема 1. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Физические величины

Обозначение	Название	Единица измерения	Расшифровка
m_0	масса молекулы	кг	килограмм
m	масса вещества	кг	килограмм
N	количество молекул	—	—
V	объем	м ³	метр в кубе
p	давление	Па	паскаль
t	температура	°С	градус Цельсия
T	абсолютная температура	К	кельвин
ν	количество вещества	моль	моль
M	молярная масса	кг/моль	килограмм разделить на моль
n	концентрация	1/м ³	один разделить на метр в кубе
ρ	плотность вещества	кг/м ³	килограмм разделить на метр в кубе
ε	энергия движения молекул	Дж	джоуль
R	газовая постоянная	Дж/(моль·К)	джоуль разделить на моль и кельвин
k	постоянная Больцмана	Дж/К	джоуль разделить на кельвин
N_A	постоянная Авогадро	1/моль	один разделить на моль

Основные формулы

- Количество вещества, или число молей,

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M},$$

где N – число молекул (атомов) вещества; N_A – постоянная Авогадро ($N_A = 6 \cdot 10^{23}$ 1/моль); m – масса вещества (газа); M – молярная масса вещества (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Молярная масса некоторых газов

Газ	Химическое соединение	Молярная масса, кг/моль
Воздух	–	0,029
Азот	N ₂	0,028
Кислород	O ₂	0,032
Водород	H ₂	0,002
Гелий	He	0,004
Углекислый газ	CO ₂	0,044
Водяной пар	H ₂ O	0,018

- Масса одной молекулы

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

где M – молярная масса вещества; N_A – постоянная Авогадро.

- Плотность вещества (газа)

$$\rho = \frac{m}{V} = m_0 n,$$

где m – масса вещества (газа); V – объем вещества (газа); m_0 – масса одной молекулы; n – концентрация вещества.

- Концентрация вещества (молекул, атомов и т. п.)

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

где N – число молекул (атомов) вещества; V – объем вещества (газа).

- Термодинамическая температура

$$T = 273 + t,$$

где t – температура в градусах Цельсия.

- Уравнение Менделеева – Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)

$$pV = \nu RT, \quad \text{или} \quad pV = \frac{m}{M} RT,$$

где p – давление газа; V – объем газа; ν – число молей; R – универсальная газовая постоянная ($R = 8,31$ Дж/(моль · К)); T – термодинамическая температура; m – масса вещества (газа); M – молярная масса вещества (см. табл. 2.1).

- Закон Дальтона (для смеси газов) (рис. 2.1)

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_k$$

где p – давление смеси газов; p_1 – парциальное давление 1-го газа в смеси; k – число компонентов смеси.

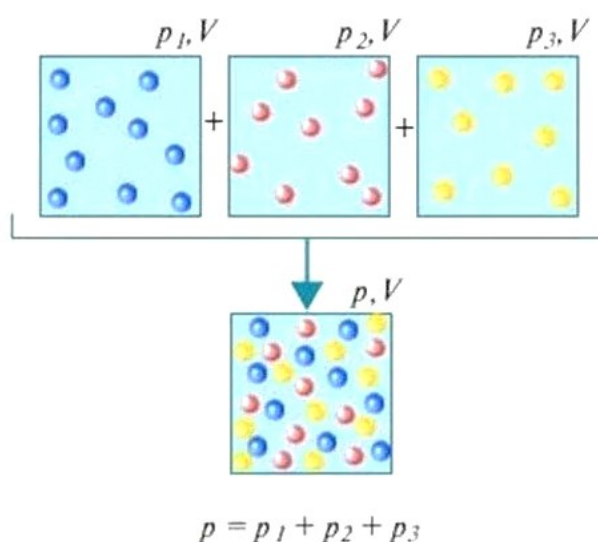


Рис. 2.1

- Изопроцессы (табл. 2.2)

Таблица 2.2

Изопроцессы

Название процесса	Постоянные величины	Уравнение процесса
Изобарный	p, ν	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
Изохорный	V, ν	$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$
Изотермический	T, ν	$p_1 V_1 = p_2 V_2$

- Зависимость давления газа от концентрации молекул n и температуры T (уравнение состояния идеального газа)

$$P = nkT,$$

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

- Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

$$p = \frac{2}{3} n \varepsilon_{\text{п}},$$

где p – давление газа; n – концентрация молекул газа; $\varepsilon_{\text{п}}$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы.

- Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{3}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

- Средняя кинетическая энергия вращательного движения молекулы

$$\varepsilon_{\text{вр}} = \frac{i-3}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура; i – число степеней свободы молекулы.

- Полная средняя кинетическая энергия молекулы, приходящаяся на все степени свободы молекулы,

$$\varepsilon = \frac{i}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура; i – число степеней свободы молекулы.

- Нормальные условия: $p = 10^5$ Па, $T = 273$ К.

Примеры решения задач

Пример 1. Определите молярную массу $M_{\text{см}}$ смеси кислорода массой $m_1 = 25$ г и азота массой $m_2 = 75$ г.

Решение

$m_1 = 25$ г, $m_2 = 75$ г.	Молярная масса смеси $M_{\text{см}}$ есть отношение массы смеси $m_{\text{см}}$ к количеству вещества смеси $\nu_{\text{см}}$, т. е.
$M_{\text{см}} - ?$	$\nu_{\text{см}} = \frac{m_{\text{см}}}{M_{\text{см}}} \implies M_{\text{см}} = \frac{m_{\text{см}}}{\nu_{\text{см}}}. \quad (1)$

Масса смеси равна сумме масс компонентов смеси

$$m_{\text{см}} = m_1 + m_2.$$

Количество вещества смеси равно сумме количеств вещества компонентов смеси

$$\nu_{\text{см}} = \nu_1 + \nu_2 = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}.$$

Подставив в формулу (1) выражения $m_{\text{см}}$ и $\nu_{\text{см}}$, получим

$$M_{\text{см}} = \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}}. \quad (2)$$

Из табл. 2.1 найдем молярные массы кислорода M_1 и азота M_2

$$M_1 = 0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 32 \frac{\text{г}}{\text{моль}},$$

$$M_2 = 0,028 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 28 \frac{\text{г}}{\text{моль}}.$$

Подставим значения величин в формулу (2) и произведем вычисления

$$M_{\text{см}} = \frac{25 + 75}{\frac{25}{32} + \frac{75}{28}} = 28,9 \frac{\text{г}}{\text{моль}} = 0,0289 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Ответ: молярная масса смеси газов $M_{\text{см}} = 0,0289 \text{ кг/моль}$.

Пример 2. В баллоне объемом $V = 10 \text{ л}$ находится гелий под давлением $p_1 = 1 \text{ МПа}$ при температуре $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. После того как из баллона был израсходован гелий массой $\Delta m = 10 \text{ г}$, температура в баллоне понизилась до $t_2 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите давление p_2 гелия, оставшегося в баллоне.

Решение

$$\begin{aligned} V &= 10 \text{ л} = 0,01 \text{ м}^3, \\ p_1 &= 1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}, \\ t_1 &= 27 \text{ }^\circ\text{C}, \\ \Delta m &= 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг}, \\ t_2 &= 17 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

$$p_2 - ?$$

Для решения задачи воспользуемся уравнением Менделеева – Клапейрона, применив его дважды к начальному и конечному состояниям газа. Для начального состояния газа уравнение имеет вид

$$p_1 V = \frac{m_1}{M} R T_1, \quad (1)$$

а для конечного состояния

$$p_2 V = \frac{m_2}{M} R T_2, \quad (2)$$

где m_1 и m_2 – массы гелия в начальном и конечном состояниях.

Выразим массы m_1 и m_2 из уравнений (1) и (2)

$$m_1 = \frac{M V p_1}{R T_1}, \quad (3)$$

$$m_2 = \frac{M V p_2}{R T_2}. \quad (4)$$

Вычитая из равенства (3) равенство (4), получим

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{M V p_1}{R T_1} - \frac{M V p_2}{R T_2}.$$

Отсюда найдем искомое давление p_2

$$p_2 = \left(\frac{M V p_1}{R T_1} - \Delta m \right) \frac{R T_2}{M V} = \frac{T_2}{T_1} p_1 - \frac{\Delta m}{M} \frac{R T_2}{V}. \quad (5)$$

Найдем термодинамическую температуру по формуле $T = 273 + t$

$$T_1 = 273 + t_1 = 273 + 27 = 300 \text{ K},$$

$$T_2 = 273 + t_2 = 273 + 17 = 290 \text{ K}.$$

Молярную массу гелия найдем из табл. 2.1: $M = 0,004 \text{ кг/моль}$.

Подставив значение величин, выраженных в СИ, в выражение (5), получим

$$p_2 = \frac{290}{300} 10^6 - \frac{0,01}{0,004} \frac{8,31 \cdot 290}{0,01} = 3,64 \cdot 10^5 \text{ Па} = 364 \text{ кПа}.$$

Ответ: давление гелия, оставшегося в баллоне, $p_2 = 364 \text{ кПа}$.

Пример 3. При нагревании идеального газа на $\Delta T = 1 \text{ К}$ при постоянном давлении объем его увеличился на $1/350$ первоначального объема. Найдите начальную температуру газа T_1 .

Решение

$\Delta T = 1 \text{ К},$ $V_2 = V_1 + \frac{1}{350} V_1,$ $p = \text{const.}$ $T_1 - ?$	Для решения запишем уравнение для изобарного процесса $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}. \quad (1)$ Конечную температуру газа можно найти
---	--

$$T_2 = T_1 + \Delta T$$

Подставим в формулу (1) известные данные и произведем вычисления

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_1 + \frac{1}{350} V_1}{T_1 + \Delta T} \implies \frac{1}{T_1} = \frac{1 + \frac{1}{350}}{T_1 + \Delta T} \implies T_1 + \Delta T = T_1 \left(1 + \frac{1}{350} \right),$$

$$\Delta T = \frac{T_1}{350},$$

$$T_1 = 350 \Delta T = 350 \text{ К}.$$

Ответ: начальная температура газа $T_1 = 350 \text{ К}$.

Пример 4. В сосуде 1 объемом $V_1 = 3$ л находится газ под давлением $p_1 = 0,2$ МПа. В сосуде 2 объемом $V_2 = 4$ л находится тот же газ под давлением $p_2 = 0,1$ МПа (рис. 2.2). Температура газа в обоих сосудах одинакова. Под каким давлением p будет находиться газ, если соединить сосуды 1 и 2 трубкой? Объемом трубки пренебречь.

Решение

$V_1 = 3$ л, $p_1 = 0,2$ МПа, $V_2 = 4$ л, $p_2 = 0,1$ МПа, $T_1 = T_2$.
$p = ?$

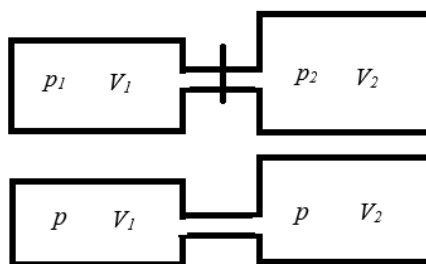


Рис. 2.2

По закону Дальтона

$$p = p'_1 + p'_2,$$

где p'_1 и p'_2 – парциальные давления газов после соединения сосудов.

Температура газа одинакова, следовательно, можно записать

$$p'_1(V_1 + V_2) = p_1 V_1,$$

$$p'_2(V_1 + V_2) = p_2 V_2.$$

Отсюда парциальные давления газов равны

$$p'_1 = \frac{p_1 V_1}{(V_1 + V_2)}, \quad p'_2 = \frac{p_2 V_2}{(V_1 + V_2)}.$$

Давление газа после соединения сосудов

$$p = \frac{p_1 V_1}{(V_1 + V_2)} + \frac{p_2 V_2}{(V_1 + V_2)} = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{(V_1 + V_2)}.$$

Переведем все числовые значения в единицы СИ

$$V_1 = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

$$p_1 = 0,2 \text{ МПа} = 0,2 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$V_2 = 4 \text{ л} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

$$p_2 = 0,1 \text{ МПа} = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

$$p = \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^{-3} + 0,1 \cdot 10^6 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{(3 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-3})} = 142857 \text{ Па} = 143 \text{ кПа}.$$

Ответ: после соединения сосудов трубкой газ будет находиться под давлением $p = 143$ кПа.

Пример 5. В колбе находится кислород массой $m = 6,4$ г при нормальных условиях. Определите среднюю энергию $W_{\text{п}}$ поступательного движения всех молекул, содержащихся в колбе.

Решение

$m = 6,4$ г, O_2 .	Средняя энергия $W_{\text{п}}$ поступательного движения всех молекул может быть выражена соотношением
$W_{\text{п}} - ?$	$W_{\text{п}} = \varepsilon_{\text{п}} N,$ (1) где $\varepsilon_{\text{п}}$ – средняя энергия поступательного движения одной молекулы; N – число всех молекул, содержащихся в колбе.

Как известно,

$$\varepsilon_{\text{п}} = \frac{3}{2} kT. \quad (2)$$

Число молекул, содержащихся в колбе, найдем по формуле $N = \nu N_A$, где $\nu = \frac{m}{M}$,

$$N = \frac{m}{M} N_A, \quad (3)$$

где M – молярная масса кислорода ($M = 0,032$ кг/моль).

С учетом выражений (2) и (3) выражение энергии поступательного движения всех молекул (1) примет вид

$$W_{\text{п}} = \frac{3}{2} kT \frac{m}{M} N_A = \frac{3kTmN_A}{2M},$$

$$W_{\text{п}} = \frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 273 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3} \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{2 \cdot 0,032} = 680 \text{ Дж.}$$

Ответ: средняя энергия поступательного движения всех молекул в колбе $W_{\text{п}} = 680$ Дж.

Задачи для самостоятельного решения

1. Определите массу одной молекулы m_0 : а) кислорода; б) углекислого газа.
2. Определите количество вещества ν и число молекул N азота массой $m = 40$ г.
3. Сколько атомов N содержится в свинце: 1) взятом в количестве $\nu = 0,1$ моль; 2) массой $m = 5$ г?

4. Определите количество вещества ν и число молекул N воды, занимающей объем $V = 1 \text{ мм}^3$. Плотность воды $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

5. В сосуде вместимостью $V = 5 \text{ л}$ находится однородный газ, количество вещества $\nu = 0,2 \text{ моль}$. Определите, какой это газ, если его плотность $\rho = 1,12 \text{ кг/м}^3$.

6. В сосуде объемом $V = 240 \text{ см}^3$ находится газ при температуре $T = 290 \text{ К}$ и давлении $p = 50 \text{ кПа}$. Определите количество вещества газа ν и число его молекул N .

7. В баллоне объемом $V = 31 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ при температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{С}$ находится кислород под давлением $p = 15,7 \text{ МПа}$. Определите его массу m .

8. В баллоне содержится газ при температуре $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{С}$. До какой температуры t_2 нужно нагреть газ, чтобы его давление увеличилось в два раза?

9. В сосуде находится воздух под давлением $p = 1,33 \cdot 10^{-9} \text{ Па}$, температура воздуха $t = 15 \text{ }^\circ\text{С}$. Найдите плотность ρ воздуха в сосуде.

10. Газ изотермически сжали от объема $V_1 = 12 \text{ л}$ до объема $V_2 = 8 \text{ л}$. Как и во сколько раз изменилось давление p газа?

11. В баллоне объемом $V = 0,01 \text{ м}^3$ находится газ при температуре $t = 27 \text{ }^\circ\text{С}$. Из-за утечки газа давление p уменьшилось на $4,1 \text{ кПа}$. Сколько молекул вышло из баллона? Температуру газа считать постоянной.

12. В баллоне объемом $V = 0,20 \text{ м}^3$ находится газ под давлением $p_1 = 100 \text{ кПа}$ и при температуре $T_1 = 290 \text{ К}$. После накачивания газа в баллон давление стало $p_2 = 300 \text{ кПа}$, а температура $T_2 = 320 \text{ К}$. На сколько увеличилось число молекул газа в баллоне?

13. В баллоне находилась масса $m_1 = 10 \text{ кг}$ газа при давлении $p_1 = 10 \text{ МПа}$. Какую массу Δm взяли из баллона, если давление стало равным $p_2 = 2,5 \text{ МПа}$? Температуру газа считать постоянной.

14. Азот массой $m = 7$ г находится под давлением $p = 0,1$ МПа и при температуре $t_1 = 290$ К. Вследствие изобарного нагревания азот занял объем $V_2 = 10$ л. Определите объем газа до расширения V_1 , температуру газа t_2 после расширения, плотность газа до и после расширения ρ_1 и ρ_2 .

15. Какой объем V занимает смесь азота массой $m_1 = 50$ г и водорода $m_2 = 50$ г при нормальных условиях?

16. В сосуде вместимостью $V = 10$ л содержится смесь газов – азота массой $m_1 = 7$ г и гелия массой $m_2 = 1$ г – при температуре $T = 280$ К. Определите давление p смеси газов.

17. В сосуде находятся масса $m_1 = 14$ г азота и масса $m_2 = 9$ г водорода при температуре $t = 10$ °С и давлении $p = 1$ МПа. Найдите молярную массу смеси M и объем сосуда V .

18. В баллоне емкостью $V = 2$ м³ содержится смесь азота (N_2) и оксида азота (NO). Определите массу оксида азота m_1 , если масса смеси $m = 14$ кг, температура $T = 300$ К и давление $p = 0,6 \cdot 10^6$ Па.

19. В сосуде содержится 23,6 % кислорода и 76,4 % азота (по массе) при давлении $p = 100$ кПа и температуре $t = 13$ °С. Найдите плотность ρ воздуха и парциальные давления p_1 и p_2 кислорода и азота.

20. Каково давление смеси газов в колбе объемом $V = 2,5$ л, если в ней находится 10^{15} молекул кислорода, $4 \cdot 10^{15}$ молекул азота и $3,3 \cdot 10^{-7}$ г аргона? Температура смеси $t = 150$ °С. Найдите молярную массу M смеси газа.

21. В сосуде вместимостью $V = 12$ л находится газ, число молекул которого равно $N = 1,44 \cdot 10^{18}$. Определите концентрацию n молекул газа.

22. В сосуде вместимостью $V = 20$ л находится газ, количество вещества $\nu = 1,5$ кмоль. Определите концентрацию n молекул в сосуде.

23. Идеальный газ находится при нормальных условиях в закрытом сосуде. Определите концентрацию n молекул газа.

24. В двух одинаковых по вместимости сосудах находятся разные газы: в первом – водород, во втором – кислород. Найдите отношение $\frac{n_1}{n_2}$ концентраций газов, если массы газов одинаковые.

25. Определите концентрацию молекул идеального газа при температуре $T = 300$ К и давлении $p = 1$ мПа.

26. Давление газа равно $p = 1$ мПа, концентрация его молекул равна $n = 10^{10}$ см⁻³. Определите: 1) температуру T газа; 2) среднюю кинетическую энергию $\epsilon_{\text{п}}$ поступательного движения молекул газа.

27. Найдите среднюю кинетическую энергию $\epsilon_{\text{п}}$ вращательного движения молекул двухатомного газа при температуре $T = 500$ К.

28. Определите среднюю кинетическую энергию $\epsilon_{\text{п}}$ поступательного движения и среднее значение полной кинетической энергии ϵ молекулы водяного пара при температуре $T = 600$ К. Найдите также кинетическую энергию $E_{\text{п}}$ поступательного движения всех молекул пара, содержащего количество вещества $\nu = 1$ кмоль.

29. Определите среднее значение полной кинетической энергии ϵ одной молекулы гелия, кислорода и водяного пара при температуре $T = 400$ К.

30. Определите кинетическую энергию ϵ_1 , приходящуюся в среднем на одну степень свободы молекулы азота, при температуре $T = 1$ кК, а также среднюю кинетическую энергию $\epsilon_{\text{п}}$ поступательного движения, $\epsilon_{\text{вр}}$ вращательного движения и среднее значение полной кинетической энергии ϵ молекулы.

31. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы кислорода $\epsilon_{\text{п}} = 7,25 \cdot 10^{-21}$ Дж, а кинетическая энергия поступательного и вращательного движений всех молекул этого газа в сосуде $E = 364$ Дж. Вычислите температуру t и массу газа m в сосуде.

Тема 2. ЭЛЕМЕНТЫ КЛАССИЧЕСКОЙ СТАТИСТИКИ

Физические величины

Обозначение	Название	Единица измерения	Расшифровка
v	скорость	м/с	метр разделить на секунду
h	высота	м	метр

Основные формулы

- Скорость молекул:

– средняя квадратичная $v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$;

– средняя арифметическая $v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$;

– наиболее вероятная $v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$,

где k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура; m_0 – масса одной молекулы; R – газовая постоянная; M – молярная масса вещества (газа); $\pi = 3,14$.

- Распределение Максвелла:

– функция распределения идеального газа по скоростям

$$f(v) = 4\pi\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}};$$

– число молекул, скорости которых заключены в пределах от v до $v + dv$,

$$dN(v) = N 4\pi\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}} dv;$$

– число молекул, скорости которых заключены в пределах от u до $u + du$,

$$dN(u) = N \frac{4}{\sqrt{\pi}} u^2 e^{-u^2} du,$$

где $u = \frac{v}{v_B}$ – относительная скорость; v – данная скорость; v_B – наиболее вероятная скорость молекул.

Закон распределения молекул по скоростям можно записать в виде

$$\Delta N = N \frac{4}{\sqrt{\pi}} u^2 e^{-u^2} \Delta u,$$

где N – общее число молекул; Δu – интервал относительных скоростей, малый по сравнению со скоростью u ; ΔN – число молекул, относительные скорости которых лежат в интервале от u до $u + \Delta u$.

- Барометрическая формула (закон убывания давления газа с высотой в поле силы тяжести)

$$p_2 = p_1 e^{\frac{Mg(h_2 - h_1)}{RT}},$$

где p_1 – атмосферное давление на высоте h_1 ; p_2 – атмосферное давление на высоте h_2 ; g – ускорение свободного падения ($g = 9,81 \text{ м/с}^2$); M – молярная масса; R – газовая постоянная; T – термодинамическая температура;

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}},$$

где p_0 – атмосферное давление на уровне моря; p – атмосферное давление на высоте h относительно уровня моря.

- Распределение Больцмана (распределение частиц идеального газа по энергиям во внешнем силовом поле)

$$n = n_0 e^{-\frac{W_{\Pi}}{kT}},$$

где n – концентрация частиц; W_{Π} – их потенциальная энергия, $W_{\Pi} = mgh$; n_0 – концентрация частиц в точках поля, где $W_{\Pi} = 0$; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура.

Примеры решения задач

Пример 1. Найдите среднюю арифметическую $v_{\text{ар}}$, среднюю квадратичную $v_{\text{ср.кв}}$ и наиболее вероятную v_B скорости молекул газа, который при давлении $p = 40 \text{ кПа}$ имеет плотность $\rho = 0,3 \text{ кг/м}^3$.

Решение

$p = 40 \text{ кПа} = 4 \cdot 10^4 \text{ Па},$ $\rho = 0,3 \text{ кг/м}^3.$ $v_{\text{ср.кв}}, v_{\text{ар}}, v_{\text{в}} - ?$	Запишем формулы для нахождения скоростей молекул $v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}, v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}.$
---	---

Запишем уравнение Менделеева – Клапейрона

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (1)$$

Запишем формулу плотности

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2)$$

Объединяя формулы (1) и (2), получим

$$p = \frac{\rho}{M}RT \text{ или } \frac{T}{M} = \frac{p}{\rho R}. \quad (3)$$

Подставив выражение (3) в скорости молекул, получим

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}, v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8p}{\pi\rho}}, v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2p}{\rho}}$$

Подставим числовые значения

$$v_{\text{ср.кв}} = \sqrt{\frac{3 \cdot 4 \cdot 10^4}{0,3}} = 632 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 4 \cdot 10^4}{3,14 \cdot 0,3}} = 583 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4 \cdot 10^4}{0,3}} = 516 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: средняя квадратичная скорость молекул $v_{\text{ср.кв}} = 632 \text{ м/с}$, средняя арифметическая скорость $v_{\text{ар}} = 583 \text{ м/с}$, наиболее вероятная скорость молекул $v_{\text{в}} = 516 \text{ м/с}$.

Пример 2. Какая часть молекул азота $\frac{\Delta N}{N}$ при температуре $t = 150^\circ\text{C}$ обладает скоростями в диапазоне от $v_1 = 300 \text{ м/с}$ до $v_2 = 305 \text{ м/с}$?

Решение

$t = 150\text{ }^{\circ}\text{C},$ $v_1 = 300\text{ м/с},$ $v_2 = 305\text{ м/с}.$	Вначале рассчитаем наиболее вероятную скорость молекул азота при температуре $T = 273 + t$, $T = 273 + 150 = 423\text{ К}$, при этом учтем, что $R = 8,31\text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$; $M = 28 \cdot 10^{-3}\text{ кг/моль}$,
$\frac{\Delta N}{N} - ?$	$v_B = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 8,31 \cdot 423}{28 \cdot 10^{-3}}} = 501 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$

Теперь найдем относительные скорости молекул азота для заданных скоростей

$$u_1 = \frac{v_1}{v_B} = \frac{300}{501} = 0,599;$$

$$u_2 = \frac{v_2}{v_B} = \frac{305}{501} = 0,609.$$

Тогда величина относительно интервала скорости

$$\Delta u = u_2 - u_1 = 0,609 - 0,599 = 0,010.$$

Она составляет

$$\frac{\Delta u}{u_1} = \frac{0,010}{0,599} = 0,0167 = 1,67\% < 2\%.$$

Поскольку эта величина меньше 2 %, то воспользуемся следующей приближенной формулой для вычисления относительного числа молекул:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot u^2 e^{-u^2} \Delta u.$$

Произведем вычисления

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{\sqrt{3,14}} \cdot 0,599^2 e^{-0,599^2} \cdot 0,010 = 5,66 \cdot 10^{-3}.$$

Ответ: $\frac{\Delta N}{N} = 5,66 \cdot 10^{-3}.$

Пример 3. Барометр в кабине летящего самолета все время показывал одинаковое давление $p = 79$ кПа, однако температура воздуха за бортом самолета изменилась с $t_1 = 5$ °С до $t_2 = 1$ °С. На сколько изменилась высота полета самолета h ? Давление p_0 у поверхности Земли считать нормальным.

Решение

$p = 79$ кПа, $t_1 = 5$ °С, $t_2 = 1$ °С.	Для решения задачи воспользуемся барометрической формулой
$\Delta h - ?$	$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}$.
	Запишем формулу для двух случаев

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh_1}{RT_1}}, p = p_0 e^{-\frac{Mgh_2}{RT_2}}.$$

Найдем отношение $\frac{p_0}{p}$ и обе части полученного равенства прологифмируем

$$\ln \frac{p_0}{p} = \frac{Mgh_1}{RT_1}, \ln \frac{p_0}{p} = \frac{Mgh_2}{RT_2}.$$

Из полученных соотношений выразим высоты h_2 и h_1 и найдем их разность

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \frac{R \ln\left(\frac{p_0}{p}\right)}{Mg} (T_2 - T_1).$$

Подставим значения величин (давление в отношении $\frac{p_0}{p}$ можно выразить в килопаскалях, это не повлияет на окончательный результат)

$$\Delta h = \frac{8,31 \ln\left(\frac{101}{79}\right)}{29 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81} (274 - 279) = -28,5 \text{ м.}$$

Знак «минус» означает, что $h_2 < h_1$ и, следовательно, самолет снизился на 28,5 м.

Ответ: самолет снизился на 28,5 м.

Задачи для самостоятельного решения

32. Найдите среднюю квадратичную $v_{\text{ср.кв}}$, среднюю арифметическую $v_{\text{ар}}$ и наиболее вероятную $v_{\text{в}}$ скорости молекул водорода. Вычисления выполните для трех значений температуры: 1) $T = 20 \text{ К}$; 2) $T = 200 \text{ К}$; 3) $T = 2 \text{ К}$.

33. При какой температуре T средняя квадратичная скорость атомов гелия станет равной $v_{\text{ср.кв}} = 11,2 \text{ км/с}$?

34. Средняя квадратичная скорость молекул газа при нормальных условиях $v_{\text{ср.кв}} = 460 \text{ м/с}$. Найдите число молекул в газе массой $m = 1 \text{ г}$.

35. При какой температуре T молекулы кислорода имеют такую же среднюю квадратичную скорость $v_{\text{ср.кв}}$, как молекулы водорода при температуре $T_1 = 144 \text{ К}$?

36. Определите среднюю арифметическую скорость $v_{\text{ар}}$ молекул газа, если их средняя квадратичная скорость $v_{\text{ср.кв}} = 1 \text{ км/с}$.

37. При какой температуре T средняя квадратичная скорость молекул азота больше их наиболее вероятной скорости на $\Delta v = 50 \text{ м/с}$?

38. Какая часть молекул кислорода $\frac{\Delta N}{N}$ при температуре $t = 0 \text{ }^\circ\text{С}$ обладает скоростями в диапазоне от $v_1 = 100 \text{ м/с}$ до $v_2 = 110 \text{ м/с}$?

39. Какая часть молекул водорода $\frac{\Delta N}{N}$ при температуре $t = 10 \text{ }^\circ\text{С}$ обладает скоростями в диапазоне от $v_1 = 2000 \text{ м/с}$ до $v_2 = 2100 \text{ м/с}$?

40. Какая часть молекул азота при температуре T имеет скорости, лежащие в интервале от $v_{\text{в}}$ до $v_{\text{в}} + \Delta v$, где $\Delta v = 20 \text{ м/с}$, если: 1) $T = 400 \text{ К}$; 2) $T = 900 \text{ К}$?

41. На сколько уменьшится атмосферное давление $p = 100 \text{ кПа}$ при подъеме наблюдателя над поверхностью Земли на высоту $h = 100 \text{ м}$? Считать, что температура воздуха $T = 290 \text{ К}$ и не изменяется с высотой.

42. На какой высоте h над поверхностью Земли атмосферное давление вдвое меньше, чем на ее поверхности? Считать, что температура воздуха $T = 290$ К и не изменяется с высотой.

43. В кабине вертолета барометр показывает давление $p = 9 \cdot 10^4$ Па. На какой высоте находится вертолет, если на взлетной площадке барометр показывал $p_0 = 10^5$ Па? Считать, что температура воздуха $T = 290$ К не изменяется с высотой.

44. На какой высоте давление воздуха составляет 60 процентов от давления на уровне моря? Температуру воздуха считать постоянной и равной 0°C .

45. Пассажирский самолет совершает полеты на высоте $h_1 = 8300$ м. Чтобы не снабжать пассажиров кислородными масками, в кабине при помощи компрессора поддерживается постоянное давление, соответствующее высоте $h_2 = 2700$ м. Найдите разность Δp давлений внутри и снаружи кабины. Температуру наружного воздуха считать равной $t_1 = 0^\circ\text{C}$.

46. Найдите плотность ρ воздуха: 1) у поверхности Земли; 2) на высоте $h = 4$ км от поверхности земли. Температуру воздуха считать не зависящей от высоты и равной $t = 0^\circ\text{C}$. Давление воздуха у поверхности Земли $p_0 = 100$ кПа.

47. Пылинки, взвешенные в неподвижном воздухе, имеют массу $m = 1 \cdot 10^{-21}$ кг. Температура воздуха $T = 27^\circ\text{C}$. Распределение концентрации пылинок по высоте подчиняется закону Больцмана. Во сколько раз уменьшится их концентрация при увеличении высоты на $\Delta h = 10$ м?

48. В неподвижном воздухе находятся частицы пыли, имеющие массу $m = 4 \cdot 10^{-21}$ кг и объем $V = 2 \cdot 10^{-24}$ м³. Считая, что распределение концентрации пылинок по высоте подчиняется закону Больцмана, найдите, во сколько раз концентрации пыли на высоте $h_1 = 0,8$ м больше, чем на высоте $h_2 = 1,5$ м. Воздух находится при нормальных условиях.

Тема 3. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Основные формулы

• Уравнение Ван-дер-Ваальса (уравнение состояния реальных газов):

– для одного моля газа

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

где V_m – молярный объем газа; a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса, различные для разных газов (табл. 2.2); p – давление газа; R – газовая постоянная; T – термодинамическая температура;

– для произвольного количества вещества газа

$$\left(p + \frac{v^2 a}{V^2}\right)(V - vb) = vRT,$$

где V – объем газа; v – количество вещества.

• Внутреннее давление газа (давление, обусловленное силами взаимодействия молекул)

$$p' = \frac{v^2 a}{V^2}.$$

• Собственный объем молекул

$$V' = \frac{vb}{4}.$$

• Параметры критического состояния:

$V_{mk} = 3b$ – молярный объем;

$p_k = \frac{a}{27b^2}$ – давление;

$T_k = \frac{8a}{27bR}$ – температура.

Таблица 2.2

Постоянные Ван-дер-Ваальса для различных газов

Газ	a , Па · м ⁶ · моль ⁻²	b , м ³ · моль ⁻¹
Азот N ₂	0,13700	38,7 · 10 ⁻⁶
Аммиак NH ₃	0,42250	37,1 · 10 ⁻⁶
Аргон Ar	0,13550	32,0 · 10 ⁻⁶
Водород H ₂	0,02452	26,5 · 10 ⁻⁶
Водяной пар H ₂ O	0,55370	30,5 · 10 ⁻⁶
Гелий He	0,00346	23,8 · 10 ⁻⁶
Кислород O ₂	0,13820	31,9 · 10 ⁻⁶
Неон Ne	0,02080	16,7 · 10 ⁻⁶
Углекислый газ CO ₂	0,36580	42,9 · 10 ⁻⁶

Примеры решения задач

Пример 1. В баллоне вместимостью $V = 8$ л находится кислород массой $m = 0,3$ кг при температуре $T = 300$ К. Определите, какую часть вместимости сосуда составляет собственный объем молекул газа. Определите отношение внутреннего давления p' к давлению газа p на стенки сосуда.

Решение

$V = 8$ л,	Собственный объем молекул газа $V' = \frac{vb}{4}$, или $V' = \frac{mb}{4M}$, где $v = \frac{m}{M}$ – количество вещества; M – молярная масса. Тогда $\frac{V'}{V} = \frac{mb}{4MV}$. Для кислорода $b = 31,9 \cdot 10^{-6}$ м ³ /моль, $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. $\frac{V'}{V} = \frac{0,3 \cdot 31,9 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 32 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3}} = 0,0093 = 0,93 \%$
$m = 0,3$ кг,	
$T = 300$ К.	
$\frac{V'}{V} - ?$	
$\frac{p'}{p} - ?$	

Следовательно, собственный объем молекул составляет 0,93 процента от объема сосуда.

Внутреннее давление газа p'

$$p' = \frac{v^2 a}{V^2}, \text{ или } p' = \frac{m^2 a}{M^2 V^2}.$$

Давление p , производимое газом на стенки сосуда, найдем из уравнения Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{v^2 a}{V^2}\right)(V - vb) = vRT;$$

$$p = \frac{vRT}{V - vb} - v^2 \frac{a}{V^2} = \frac{\frac{m}{M}RT}{V - \frac{m}{M}b} - \left(\frac{m}{M}\right)^2 \frac{a}{V^2}.$$

Вычислим p' и p (для кислорода $a = 0,1382 \text{ Па} \cdot \text{м}^6/\text{моль}^2$)

$$p' = \frac{0,3^2 \cdot 0,1382}{(32 \cdot 10^{-3})^2 (8 \cdot 10^{-3})^2} = 190 \cdot 10^3 \text{ Па} = 190 \text{ кПа};$$

$$p = \frac{\frac{0,3}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 300}{8 \cdot 10^{-3} - \frac{0,3}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot 31,9 \cdot 10^{-6}} -$$

$$- \left(\frac{0,3}{32 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \frac{0,1382}{(8 \cdot 10^{-3})^2} = 2,85 \cdot 10^6 \text{ Па} = 2,85 \text{ МПа}.$$

Найдем $\frac{p'}{p}$

$$\frac{p'}{p} = \frac{190 \cdot 10^3}{2,85 \cdot 10^6} = 0,067 = 6,7 \text{ \%}.$$

Следовательно, давление газа, обусловленное силами притяжения молекул, составляет 6,7 % давления газа на стенки сосуда.

Ответ: $\frac{v'}{v} = 0,97 \text{ \%}$, $\frac{p'}{p} = 6,7 \text{ \%}$.

Задачи для самостоятельного решения

49. В сосуде вместимостью $V = 10 \text{ л}$ находится азот массой $m = 0,25 \text{ кг}$. Определите: 1) внутреннее давление газа p' ; 2) собственный объем молекул V' .

50. В сосуде вместимостью $V = 0,3 \text{ л}$ находится один моль углекислого газа при температуре $T = 300 \text{ К}$. Определите давление газа p : а) по уравнению Менделеева – Клапейрона; б) по уравнению Ван-дер-Ваальса.

51. Давление кислорода $p = 7 \text{ МПа}$, его плотность $\rho = 100 \text{ кг/м}^3$. Определите температуру кислорода t , считая, что кислород при данных условиях ведет себя как реальный газ.

52. Кислород в количестве $\nu = 1 \text{ кмоль}$ находится при температуре $t = 21 \text{ }^\circ\text{С}$ и давлении $p = 10 \text{ МПа}$. Найдите объем газа V , считая, что кислород при данных условиях ведет себя как реальный газ.

53. Вычислите для некоторого газа постоянные a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса, если известны его критическая температура $T_k = 126$ К и критическое давление $p_k = 3,39$ МПа.

54. Вычислите критические давление p_k и температуру T_k для неона.

55. Для некоторого газа критическая температура равна $T_k = 151$ К, а критическое давление $p_k = 4,86$ МПа. Определите по этим данным критический молярный объем V_{mk} этого газа.

56. Газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при критической температуре и занимает объем, в три раза превышающий критический. Во сколько раз давление газа в этом состоянии меньше критического давления?

57. Газ находится в критическом состоянии. Как и во сколько раз его давление будет отличаться от критического при одновременном увеличении температуры и объема газа в два раза?

58. Газ находится в критическом состоянии. Во сколько раз возрастет давление газа, если, не меняя объем, температуру газа увеличить в два раза?

Тема 4. ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

Физические величины

Обозначение	Название	Единица измерения	Расшифровка
λ	средняя длина свободного пробега молекулы	м	метр
d	эффективный диаметр молекулы	м	метр
$\langle z \rangle$	среднее число соударений молекул	с^{-1}	секунда в минус первой степени
D	коэффициент диффузии	$\text{м}^2/\text{с}$	метр в квадрате разделить на секунду
η	динамическая вязкость	$\text{Па} \cdot \text{с}$	паскаль на секунду
ν	кинематическая вязкость	$\text{м}^2/\text{с}$	метр в квадрате разделить на секунду
κ	коэффициент теплопроводности	$\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	ватт разделить на метр и на Кельвин
c_v	удельная теплоемкость газа при постоянном объеме	$\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	джоуль разделить на кг и на Кельвин

Основные формулы

- Средняя длина свободного пробега молекул газа

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n},$$

где d – эффективный диаметр молекулы (табл. 2.4); n – концентрация молекул.

Таблица 2.4

Эффективный диаметр молекулы

Вещество	Эффективный диаметр, нм
Азот	0,38
Аргон	0,35
Водород	0,28
Воздух	0,30
Гелий	0,22
Кислород	0,36

- Среднее число соударений, испытываемых одной молекулой газа в единицу времени,

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n v_{\text{ар}},$$

где $v_{\text{ар}}$ – средняя арифметическая скорость молекул.

- Коэффициент диффузии

$$D = \frac{1}{3} v_{\text{ар}} \lambda,$$

где λ – средняя длина свободного пробега молекулы.

- Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{1}{3} v_{\text{ар}} \lambda \rho = D \rho,$$

где ρ – плотность газа (жидкости); D – коэффициент диффузии.

- Кинематическая вязкость

$$\nu = \frac{\eta}{\rho},$$

где η – коэффициент динамической вязкости; ρ – плотность жидкости или газа.

- Коэффициент теплопроводности

$$\kappa = \frac{1}{3} v_{\text{ар}} \lambda \rho c_v = D \rho c_v = \eta c_v,$$

где η – динамическая вязкость; c_v – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

- Удельная теплоемкость газа при постоянном объеме

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

где i – число степеней свободы молекулы газа; R – газовая постоянная; M – молярная масса.

Примеры решения задач

Пример 1. Средняя длина свободного пробега молекулы углекислого газа при нормальных условиях равна $\lambda = 40$ нм. Определите среднюю арифметическую скорость $v_{\text{ар}}$ молекул и число соударений $\langle z \rangle$, которые испытывает молекула в $\tau = 1$ с.

Решение

$$\lambda = 40 \text{ нм} = 40 \cdot 10^{-9} \text{ м},$$

$$\tau = 1 \text{ с.}$$

Средняя арифметическая скорость молекул определяется по формуле

$$v_{\text{ар}}, \langle z \rangle - ?$$

$$v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}},$$

где M – молярная масса вещества (для углекислого газа $M(\text{CO}_2) = 0,044 \text{ кг/моль}$).

Нормальные условия: $p = 10^5 \text{ Па}$, $T = 273 \text{ К}$.

Подставим числовые значения

$$v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 273}{3,14 \cdot 0,044}} = 362 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Среднее число соударений молекулы в 1 с определяется отношением средней арифметической скорости молекулы к средней длине ее свободного пробега

$$\langle z \rangle = \frac{v_{\text{ар}}}{\lambda};$$

$$\langle z \rangle = \frac{362}{40 \cdot 10^{-9}} = 9,05 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}.$$

Ответ: средняя арифметическая скорость молекул $v_{\text{ар}} = 362 \text{ м/с}$, среднее число соударений молекулы за 1 с составляет $\langle z \rangle = 9,05 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$.

Пример 2. Найдите теплопроводность κ воздуха при давлении и температуре $p = 100 \text{ кПа}$ и температуре $T = 283 \text{ К}$. Считать воздух двухатомным газом.

Решение

$$p = 100 \text{ кПа},$$

$$T = 283 \text{ К}.$$

Для вычисления коэффициента теплопроводности воздуха согласно соотношению

$$\kappa - ?$$

$$\kappa = \frac{1}{3} v_{\text{ар}} \lambda \rho c_v$$

необходимо определить среднюю длину свободного пробега молекулы λ , плотность воздуха ρ , удельную теплоемкость c_v воздуха при постоянном объеме и среднюю арифметическую скорость $v_{\text{ар}}$.

Для определения средней длины свободного пробега прежде всего необходимо вычислить концентрацию молекул воздуха. Для этого используем уравнение

$$p = nkT,$$

откуда $n = \frac{p}{kT}$.

С учетом последнего равенства определяем среднюю длину свободного пробега молекулы воздуха

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p},$$

где $d = 0,3 \cdot 10^{-9}$ м – эффективный диаметр молекулы воздуха (см. табл. 2.4).

Используя уравнение Менделеева – Клапейрона, определим плотность воздуха

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad pV = \frac{m}{M}RT \implies \rho = \frac{pM}{RT}.$$

Удельная теплоемкость газа при постоянном давлении определяется соотношением

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

где число степеней свободы молекул воздуха для двухатомных молекул с жесткой связью $i = 5$; $M = 0,029$ кг/моль – молярная масса воздуха (см. табл. 2.1).

Средняя арифметическая скорость молекул воздуха вычисляется как

$$v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}.$$

С учетом вышеперечисленных формул выражение для коэффициента теплопроводности примет вид

$$\kappa = \frac{ik}{3\pi d^2} \sqrt{\frac{RT}{\pi M}}.$$

Подставив в последнее выражение числовые значения, получим

$$\kappa = \frac{5 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}}{3 \cdot 3,14 \cdot (0,3 \cdot 10^{-9})^2} \sqrt{\frac{8,31 \cdot 283}{3,14 \cdot 0,029}} = 0,013 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

Ответ: теплопроводность воздуха $\kappa = 0,013 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$.

Пример 3. Вычислите диаметр молекулы газа d , если при температуре $t = 0^\circ\text{C}$ коэффициент вязкости составляет $\eta = 18,8 \text{ мкПа} \cdot \text{с}$. Молярная масса газа $M = 0,032 \text{ кг/моль}$.

Решение

$t = 0^\circ\text{C},$ $\eta = 18,8 \text{ мкПа} \cdot \text{с}.$ $d = ?$	Значение диаметра d молекулы газа связано со средней длиной свободного пробега соотношением
---	---

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p},$$

откуда $d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi p \lambda}}.$

Значение длины свободного пробега молекулы λ можно определить из выражения для коэффициента вязкости

$$\eta = \frac{1}{3} v_{\text{ар}} \lambda \rho, \quad \lambda = \frac{3\eta}{v_{\text{ар}} \rho}.$$

Учитывая, что средняя арифметическая скорость молекул определяется как

$$v_{\text{ар}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}},$$

а плотность ρ определяется из уравнения Менделеева – Клапейрона

$$\rho = \frac{pM}{RT},$$

то для вычисления диаметра молекулы получаем следующее выражение:

$$d = \left(\frac{2k}{3\pi\eta} \sqrt{\frac{MT}{\pi R}} \right)^{1/2};$$

$$d = \left(\frac{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}}{3 \cdot 3,14 \cdot 18,8 \cdot 10^{-6}} \sqrt{\frac{0,032 \cdot 273}{3,14 \cdot 8,31}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,3 \cdot 10^{-9} \text{ м} =$$

$= 0,3 \text{ нм}.$

Ответ: диаметр молекулы $d = 0,3 \text{ нм}.$

Задачи для самостоятельного решения

59. Определите среднюю длину свободного пробега молекул водорода λ при давлении $p = 0,1$ Па и температуре $T = 100$ К.

60. При каком давлении p средняя длина свободного пробега молекул азота $\lambda = 1$ м, если температура газа $T = 300$ К?

61. В объеме $V = 2$ м³ находится $N = 10^{23}$ молекул газа. Эффективный диаметр молекулы составляет $d = 2 \cdot 10^{-10}$ м. Найдите длину свободного пробега молекулы λ .

62. Найдите эффективный диаметр молекулы азота d по данному значению средней длины свободного пробега молекулы при нормальных условиях $\lambda = 95$ нм.

63. Найдите среднее число столкновений в единицу времени молекул некоторого газа, если средняя длина свободного пробега $\lambda = 5$ мкм, а средняя арифметическая скорость его молекул $v_{ар} = 500$ м/с.

64. Чему равна кинематическая вязкость жидкости ν , если ее динамическая вязкость $\eta = 5$ мПа · с, а плотность $\rho = 100$ кг/м³.

65. Определите коэффициенты диффузии D и динамической вязкости η гелия, находящегося при температуре $t = -73$ °С и давлении $p = 10$ кПа.

66. Коэффициент теплопроводности гелия λ в 8,7 раза больше, чем у аргона (при нормальных условиях). Найдите отношение квадратов эффективных диаметров d атомов аргона и гелия.

67. При каком давлении отношение коэффициента динамической вязкости η некоторого газа к его коэффициенту диффузии D равно $0,3$ кг/м³, а средняя квадратичная скорость молекул газа $v_{ср.кв} = 632$ м/с?

68. В результате некоторого процесса коэффициент вязкости идеального газа η увеличился в два раза, а коэффициент диффузии D – в четыре раза. Во сколько раз изменилось давление газа?

69. Зная коэффициент динамической вязкости гелия при нормальных условиях $\eta = 194 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с}$, вычислите эффективный диаметр d его атома.

70. Кислород находится при нормальных условиях. Определите коэффициенты диффузии D и теплопроводности κ .

71. Средняя длина свободного пробега атомов гелия при нормальных условиях $\lambda = 180 \text{ нм}$. Определите коэффициент диффузии D гелия.

72. Коэффициент диффузии кислорода при температуре $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ равен $D = 0,19 \text{ см}^2/\text{с}$. Определите среднюю длину свободного пробега молекул кислорода λ .

73. При некоторых условиях коэффициент диффузии кислорода $D = 1,22 \cdot 10^5 \text{ м}^2/\text{с}$, а его динамическая вязкость $\eta = 19,5 \text{ мкПа} \cdot \text{с}$. Найдите плотность ρ кислорода.

74. Вычислите коэффициент теплопроводности азота h , если его динамическая вязкость при тех же условиях $D = 10 \text{ мкПа} \cdot \text{с}$.

75. Определите коэффициент теплопроводности азота h , находящегося в некотором объеме при температуре $T = 280 \text{ К}$.

76. Углекислый газ и водяной пар находятся при одинаковых температурах и давлениях. Найдите для этих газов отношение: 1) коэффициентов диффузии; 2) вязкостей; 3) теплопроводностей. Принять эффективные диаметры молекул одинаковыми.

Тема 5. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Физические величины

Обозначение	Название	Единица измерения	Расшифровка
C	молярная теплоемкость	Дж/К	джоуль разделить на кельвин
c	удельная теплоемкость	Дж/(кг · К)	джоуль разделить на кг и на кельвин
U	внутренняя энергия газа	Дж	джоуль
A	работа газа	Дж	джоуль
Q	количество теплоты	Дж	джоуль

Основные формулы

- Молярные теплоемкости тела (газа) при постоянном объеме C_V и постоянном давлении C_P

$$C_V = \frac{i}{2} R; \quad C_P = \frac{i+2}{2} R,$$

где i – число степеней свободы молекулы; R – газовая постоянная.

- Удельные теплоемкости тела (газа) при постоянном объеме c_V и постоянном давлении c_P

$$c_V = \frac{i}{2} \frac{R}{M}; \quad c_P = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M},$$

где M – молярная масса газа.

- Связь между молярной и удельной теплоемкостями газа

$$C_V = c_V M; \quad C_P = c_P M.$$

- Уравнение Майера

$$C_P - C_V = R.$$

- Показатель адиабаты

$$\gamma = \frac{c_P}{c_V} = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$

- Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{i}{2} \nu R T = \nu C_V T,$$

где ν – количество вещества; T – термодинамическая температура; C_V – молярная теплоемкость при постоянном объеме; i – число степеней свободы.

- Работа при расширении газа от объема V_1 до объема V_2 в общем виде

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P dV;$$

а) при изобарном процессе ($p = \text{const}$)

$$A = P(V_2 - V_1) = \nu R \Delta T;$$

б) при изотермическом процессе ($T = \text{const}$)

$$A = \nu R T \ln(V_2/V_1),$$

где V_1 – начальный объем газа; V_2 – конечный объем газа;

в) при адиабатическом процессе

$$A = -\Delta U = -\nu C_V \Delta T, \text{ или } A = \nu \frac{i}{2} R(T_1 - T_2).$$

- Первое начало термодинамики

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

где Q – количество теплоты, сообщенной газу; ΔU – приращение внутренней энергии; A – работа, совершенная газом против внешних сил.

Первое начало термодинамики:

а) при изобарном процессе

$$Q = \Delta U + A = \nu C_V \Delta T + \nu R \Delta T = \nu C_P \Delta T;$$

б) при изохорном процессе ($A = 0$)

$$Q = \Delta U = \nu C_V \Delta T;$$

в) при изотермическом процессе ($\Delta U = 0$)

$$Q = A = \nu R T \ln(V_2/V_1);$$

г) при адиабатическом процессе ($Q = 0$)

$$A = -\Delta U = -\nu C_V \Delta T.$$

- Уравнение Пуассона для адиабатического процесса

$$PV^\gamma = \text{const}, \text{ или } TV^{\gamma-1} = \text{const}, PT^{\gamma/(1-\gamma)} = \text{const},$$

где $\gamma = C_p/C_V$ – постоянная адиабаты.

Примеры решения задач

Пример 1. Кислород массой $m = 6,4$ г находится при температуре $T_1 = 300$ К и расширяется при постоянном давлении, при этом объем увеличивается в $n = V_2/V_1 = 2$ раза. Найдите количество теплоты Q , сообщенной газу.

Решение

$m = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг},$ $T_1 = 300 \text{ К},$ $V_2/V_1 = n = 2.$ $Q = ?$	Используем первое начало термодинамики $Q = \Delta U + A. \quad (1)$ Количество теплоты, сообщенной газу, идет на приращение внутренней энергии ΔU газа и на совершение газом работы A против внешних сил. Приращение внутренней энергии $\Delta U = U_2 - U_1$, или
--	---

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T, \quad (2)$$

где $i = 5$ – число степеней свободы молекул двухатомного кислорода;
 $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ – универсальная газовая постоянная;
 $M = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ – молярная масса кислорода (см. табл. 2.1);
 ΔT – приращение температуры. Работа газа при изобарном процессе

$$A = \frac{m}{M} R \Delta T. \quad (3)$$

С учетом выражений (2) и (3) количество теплоты (1) запишется

$$Q = \frac{m}{M} R \Delta T \left(\frac{i}{2} + 1 \right), \quad (4)$$

где $\Delta T = T_2 - T_1$.

Применив уравнение Менделеева – Клапейрона для изобарного процесса, получим $V_1/T_1 = V_2/T_2$, откуда с учетом условия задачи конечная температура после изобарного расширения

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

Тогда приращение температуры

$$\Delta T = T_2 - T_1 = T_1(n - 1).$$

Подставив это выражение в уравнение (4), получим

$$Q = \frac{m}{M} R T_1 (n - 1) \left(\frac{i}{2} + 1 \right).$$

Учитывая условие задачи и табличные данные, найдем искомое количество теплоты

$$Q = \frac{7}{2} \frac{m}{M} R T_1 = 1,7 \text{ кДж}.$$

Ответ: количество теплоты, сообщенное газу, $Q = 1,7 \text{ кДж}$.

Пример 2. Объем одного моля ($\nu = 1$) идеального газа с числом степеней свободы молекул i изменяется по закону $V = a/T$, где a – постоянная величина. Найдите количество теплоты Q , полученной газом в этом процессе, если его температура испытала приращение ΔT .

Решение

$\nu = 1,$	Количество теплоты находится из первого начала термодинамики	
$i,$		
$V = a/T,$	Приращение внутренней энергии одного моля газа	$Q = \Delta U + A.$ (1)
$\Delta T.$		
$Q - ?$	$\Delta U = U_2 - U_1$, или	

$$\Delta U = \frac{i}{2} R \Delta T, \quad (2)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная. Работа газа

$$A = \int P dV. \quad (3)$$

Воспользуемся уравнением Менделеева – Клапейрона для одного моля газа ($\nu = 1$)

$$PV = RT,$$

откуда, учитывая условие задачи,

$$P = \frac{RT}{V} = \frac{RT^2}{a}. \quad (4)$$

Продифференцируем условие задачи $V = a/T$

$$dV = -\frac{a}{T^2} dT. \quad (5)$$

Подставив выражения (4) и (5) в формулу (3), найдем работу

$$A = -R \Delta T. \quad (6)$$

С учетом формул (2) и (6) количество теплоты (1) равно

$$Q = R \Delta T \left(\frac{i}{2} - 1 \right).$$

Ответ: количество теплоты, полученное газом,

$$Q = R \Delta T \left(\frac{i}{2} - 1 \right).$$

Пример 3. Два моля идеального газа находятся при температуре $T_1 = 300$ К и охлаждаются изохорно, в результате давление газа уменьшается в $n = P_1/P_2 = 2$ раза. Затем газ изобарно расширяется так, что в конечном состоянии его температура становится равной первоначальной. Найдите количество теплоты Q , сообщенной газу в данном процессе.

Решение

$T_1 = 300$ К, $P_1/P_2 = n = 2$, $\nu = 2$. $Q = ?$	Решение задачи упрощается, если заданные процессы изобразить на P -, V -диаграмме (рис. 2.3). Количество теплоты находится из первого начала термодинамики
--	--

$$Q = \Delta U + A. \quad (1)$$

В данной задаче на участке 1 – 2 (изохора) объем не изменяется (см. рис. 2.3) и работа $A_{12} = 0$. Следовательно, работа совершается газом только на участке 2 – 3 при изобарном расширении $A_{23} = A = P_2(V_2 - V_1)$. Используем формулу работы газа для изобарного процесса, где $\Delta T = T_1 - T_2$ (см. рис. 2.3). В результате получим

$$A = \nu R(T_1 - T_2). \quad (2)$$

Применив уравнение Менделеева – Клапейрона к состояниям газа 1 и 2 при изохорном процессе (см. рис. 2.3), получим

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2},$$

откуда, учитывая условие задачи,

$$T_2 = \frac{P_2}{P_1} T_1, \quad T_1 = \frac{T_1}{n}.$$

Подставим эту формулу в уравнение (2) и найдем работу, совершенную газом в данном процессе,

$$A = \nu R T_1 \left(1 - \frac{1}{n}\right). \quad (3)$$

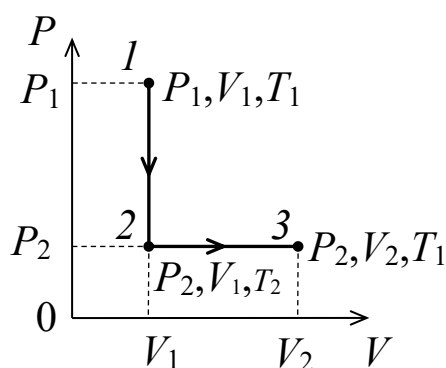


Рис. 2.3

Приращение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T,$$

где i – число степеней свободы. В данном сложном процессе начальная и конечная температуры равны (на рис. 2.3 точки 1 и 3), следовательно, $\Delta U = 0$. Тогда из выражения (1) искомое количество теплоты $Q = A$. С учетом формулы (3) получим

$$Q = \nu R T_1 \left(1 - \frac{1}{n} \right) = 2,5 \text{ кДж}.$$

Ответ: количество теплоты, полученное газом, $Q = 2,5 \text{ кДж}$.

Пример 4. Водород H_2 массой $m = 20 \text{ г}$ находится при температуре $T_1 = 300 \text{ К}$. Его объем при адиабатическом процессе увеличился в $n = V_2/V_1 = 5$ раз, затем при изотермическом процессе уменьшился до прежнего значения. Найдите температуру T_2 в конце адиабатического расширения; работу газа A_1 и A_2 и приращение внутренней энергии $\Delta U_1, \Delta U_2$ при этих процессах.

Решение

$\text{H}_2,$ $m = 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг},$ $T_1 = 300 \text{ К},$ $V_2/V_1 = n = 5.$	Процессы расширения и сжатия газа изобразим графически в системе координат P, V (рис. 2.4). Параметры газа можно определить из уравнений адиабатического и изотермического процессов.
$T_2 - ? A_1, A_2 - ?$ $\Delta U_1, \Delta U_2 - ?$	При адиабатическом процессе температура и объем газа в состояниях 1 и 2 связаны уравнением Пуассона

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1},$$

откуда, учитывая условие задачи, получим

$$T_2 = \frac{T_1}{n^{\gamma-1}}, \quad (1)$$

где постоянная адиабаты $\gamma = C_p/C_v$. Для молекулярного водорода (число степеней свободы $i = 5$) молярная теплоемкость при постоянном давлении $C_p = \frac{i+2}{2}R = \frac{7}{2}R$,

$$C_p = \frac{i+2}{2}R = \frac{7}{2}R,$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная. Молярная теплоемкость при постоянном объеме $C_v = \frac{i}{2}R = \frac{5}{2}R$, тогда

$$C_v = \frac{i}{2}R = \frac{5}{2}R, \quad \text{тогда}$$

$\gamma = 1,4$. Подставив это значение γ в выражение (1), найдем температуру: $T_2 = 158$ К. Работа газа при адиабатическом расширении, где число молей $\nu = m/M$,

$$A_1 = \frac{m}{M} \frac{i}{2} R (T_1 - T_2) = 29,5 \text{ кДж.} \quad (2)$$

Учтем, что молярная масса водорода $M = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль (см. табл. 2.1). Работа газа при изотермическом процессе

$$A_2 = \frac{m}{M} R T_2 \ln \frac{V_1}{V_2}.$$

Учитывая условие задачи и выражение (1), найдем работу при изотермическом сжатии

$$A_2 = \frac{m R T_1}{M \gamma - 1} \ln \frac{1}{\eta} = -21,1 \text{ кДж.}$$

Знак «минус» показывает, что при сжатии газа работа совершается внешними силами. Для определения приращения внутренней энергии газа при адиабатическом процессе воспользуемся первым началом термодинамики

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

В данном процессе $Q = 0$, и приращение внутренней энергии при адиабатическом расширении с учетом выражения (2) равно

$$\Delta U_1 = -A_1 = -29,5 \text{ кДж.}$$

При изотермическом процессе $T = \text{const}$ и $\Delta T = 0$. Следовательно,

$$\Delta U_2 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R \Delta T = 0.$$

Ответ: $T_2 = 158$ К, $A_1 = 29,5$ кДж, $A_2 = -21,1$ кДж, $\Delta U_1 = -29,5$ кДж, $\Delta U_2 = 0$.

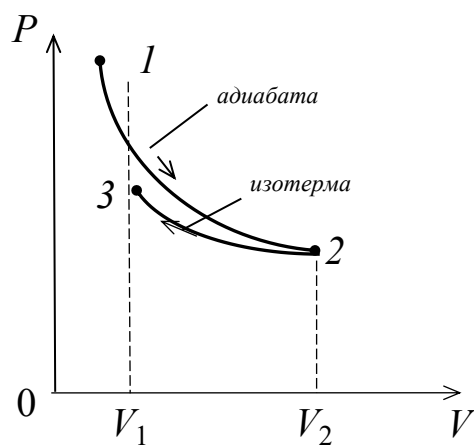


Рис. 2.4

Задачи для самостоятельного решения

77. Найдите удельную теплоемкость c кислорода для: 1) $V = \text{const}$; 2) $p = \text{const}$.

78. Найдите отношение удельных теплоемкостей $\frac{c_p}{c_v}$ для водорода.

79. Удельная теплоемкость некоторого двухатомного газа $c_p = 14,7$ кДж/(кг · К). Найдите молярную массу M этого газа.

80. Разность удельных теплоемкостей $C_p - C_v$ некоторого двухатомного газа равна 260 Дж/(кг · К). Найдите молярную массу M газа и его удельные теплоемкости C_v и C_p .

81. Плотность некоторого двухатомного газа при нормальных условиях $\rho = 1,43$ кг/м³. Найдите удельные теплоемкости C_v и C_p этого газа.

82. Молярная масса некоторого газа $M = 0,03$ кг/моль. Отношение $\frac{c_p}{c_v} = 1,4$. Найдите удельные теплоемкости C_v и C_p этого газа.

83. Какое количество теплоты Q необходимо сообщить водороду массой $m = 10$ г, находящемуся при температуре $t_1 = 27$ °С, чтобы при постоянном давлении его объем увеличился в $n = 2$ раза?

84. Азот массой $m = 12$ г находится в закрытом сосуде $V = 2$ л при температуре $t_1 = 10$ °С. После нагревания давление в сосуде стало $p = 1,33$ МПа. Какое количество теплоты Q сообщено газу при нагревании?

85. Азот массой $m = 15$ г находится в закрытом сосуде при температуре $T_1 = 300$ К. Какое количество тепла Q необходимо сообщить азоту, чтобы средняя квадратичная скорость его молекул n возросла в 2 раза?

86. В закрытом сосуде объемом $V = 3$ л находится азот, плотность которого $\rho = 1,4$ кг/м³. Какое количество теплоты Q нужно сообщить газу, чтобы нагреть его на $\Delta T = 100$ К?

87. На нагревание массы $m = 40$ г кислорода от $t_1 = 16$ °С до $t_2 = 40$ °С затрачено количество теплоты $Q = 628$ Дж. При каких условиях нагревался газ (при постоянном объеме или при постоянном давлении)?

88. В вертикальном цилиндрическом сосуде под поршнем массой $m = 10$ кг и площадью сечения $S = 20$ см² находится одноатомный газ. Первоначально поршень находится на высоте $h = 20$ см от дна сосуда, а после нагревания газа поднимается на высоту $H = 25$ см. Найдите количество теплоты Q , сообщенное газу в процессе нагревания. Атмосферное давление $P_0 = 100$ кПа. Трением и теплообменом газа с сосудом и поршнем пренебречь.

89. Водород, находящийся при нормальных условиях в закрытом сосуде объемом $V = 5,0$ л, охлаждается на $\Delta T = -55$ К. Найдите приращение внутренней энергии газа ΔU и количество отданного им тепла Q .

90. Кислород массой $m = 10$ г находится под давлением $p = 300$ кПа и температуре $t_1 = 10$ °С. После изобарного нагревания газ занял объем $V_2 = 10$ л. Найдите изменение внутренней энергии ΔU ; работу A , совершенную газом при расширении; количество теплоты Q , полученное газом.

91. Два моля идеального газа при постоянном давлении нагрели на $\Delta T = 72$ К, сообщив ему количество теплоты $Q = 4,8$ кДж. Найдите совершенную газом работу A , приращение его внутренней энергии ΔU и число степеней свободы молекул газа i .

92. В закрытом сосуде находится азот массой $m_1 = 20$ г и кислород массой $m_2 = 32$ г. Найдите изменение внутренней энергии смеси газов при охлаждении ее на $\Delta t = 28$ °С.

93. Углекислый газ в количестве $\nu = 2$ кмоль нагревается при постоянном давлении на $\Delta T = 50$ К. Найдите изменение внутренней энергии ΔU ; работу A , совершенную газом при расширении; количество теплоты Q , полученное газом.

94. При изобарном расширении двухатомного газа была совершена работа $A = 156,8$ Дж. Какое количество теплоты Q было сообщено газу?

95. Азот массой $m = 10,5$ г изотермически расширяется при температуре $t = -23^\circ\text{C}$, причем его давление изменяется от $p_1 = 250$ кПа до $p_2 = 100$ кПа. Найдите работу A , совершенную газом при расширении.

96. При изотермическом расширении $m = 10$ г азота, находящегося при температуре $t = 17^\circ\text{C}$, была совершена работа $A = 860$ Дж. Во сколько раз изменилось давление азота при расширении?

97. Воздух сжимается от объема V_1 до объема $V_2 = V_1/2$ сначала адиабатически, а затем изотермически. В каком процессе совершается меньшая работа и во сколько раз?

98. Водород массой $m = 20$ г находится при нормальных условиях и сжимается от объема V_1 до объема $V_2 = V_1/2$. Найдите работу газа A при изотермическом и адиабатическом процессах.

99. При адиабатическом сжатии двухатомного газа в количестве $\nu = 1$ кмоль была совершена работа $A = 146$ кДж. На сколько увеличилась температура t_2 газа при сжатии?

100. На диаграмме (рис. 2.5) представлена зависимость давления одноатомного газа P от объема V . Найдите количество теплоты Q , полученное или отданное газом при переходе из состояния 1 в состояние 3.

101. Одноатомный газ сначала охладили (1 – 2), уменьшив давление в $n = 2$ раза, а затем нагрели (2 – 3) до первоначальной температуры $T_1 = 360$ К (рис. 2.6). Количество вещества $\nu = 2$ моля. Найдите количество теплоты Q , полученное газом на участке 2 – 3.

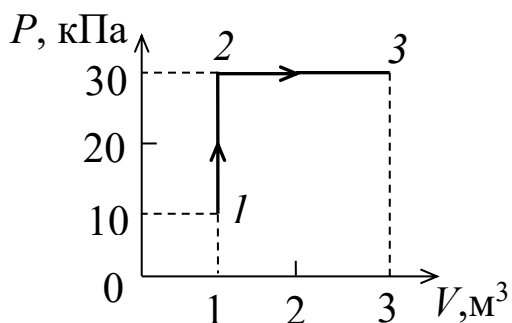


Рис. 2.5

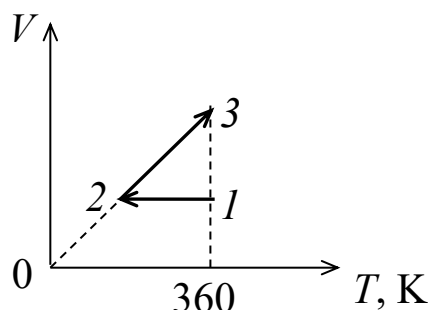


Рис. 2.6

102. Воздух находится при температуре $t_1 = 0^\circ\text{C}$. До какой температуры t_2 охладится воздух при адиабатическом увеличении его объема V в два раза?

103. Кислород массой $m = 10$ г находится при нормальных условиях. Найдите давление P и температуру t газа при изотермическом и адиабатическом сжатиях до объема $V_2 = 1,4$ л.

104. Кислород объемом $V_1 = 7,5$ л адиабатически сжимается до объема $V_2 = 1$ л. При этом в конце сжатия устанавливается давление $p_2 = 1,6$ МПа. Под каким давлением p_1 находился газ до сжатия?

105. При адиабатическом сжатии воздуха в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания давление изменяется от $p_1 = 0,1$ МПа до $p_2 = 3,5$ МПа. Начальная температура воздуха $t_1 = 40^\circ\text{C}$. Найдите температуру воздуха t_2 в конце сжатия.

106. Газ расширяется адиабатически, причем объем его увеличивается вдвое, а термодинамическая температура падает в 1,32 раза. Какое число степеней свободы i имеют молекулы этого газа?

107. Двухатомный газ, находящийся при давлении $p = 2$ МПа и температуре $t = 27^\circ\text{C}$, сжимается адиабатически от объема V_1 до объема $V_2 = 0,5 V_1$. Найдите температуру t_2 и давление p_2 газа после сжатия.

108. Двухатомный газ занимает объем $V_1 = 0,5$ л при давлении $p_1 = 50$ кПа. Газ сжимается адиабатически до некоторого объема V_2 и давления p_2 . Затем он изохорно охлаждается до первоначальной температуры, причем его давление становится $p_3 = 100$ кПа. Начертите график $p(V)$ этого процесса. Найдите объем V_2 и давление p_2 .

109. Газ расширяется адиабатически так, что его давление падает от $p_1 = 200$ кПа до $p_2 = 100$ кПа. Затем он нагревается при постоянном объеме до первоначальной температуры, причем его давление становится $p = 122$ кПа. Найдите отношение $\frac{c_p}{c_v}$ для этого газа. Начертите график $p(V)$ этого процесса.

110. Во сколько раз возрастает длина свободного пробега молекул двухатомного газа, если его давление падает вдвое при расширении газа: 1) изотермически; 2) адиабатически?

Тема 6. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

Физические величины

Обозначение	Название	Единица измерения	Расшифровка
η	коэффициент полезного действия (КПД)	%	–
S	энтропия	Дж/К	джоуль разделить на кельвин
Q	количество теплоты	Дж	джоуль

Основные формулы

- Коэффициент полезного действия тепловой машины (термический КПД цикла) (рис. 2.7)

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

где Q_1 – тепло, полученное рабочим телом от нагревателя; Q_2 – тепло, переданное рабочим телом холодильнику; A – работа, совершаемая рабочим телом (газом) за цикл.

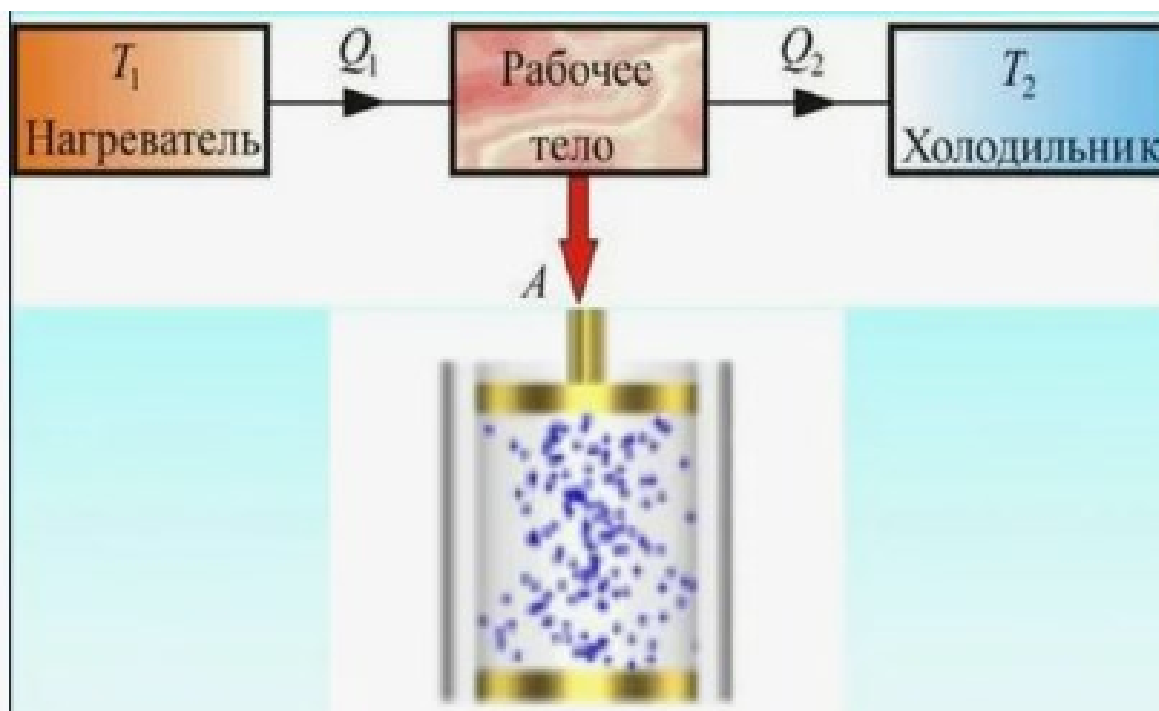


Рис. 2.7

- Коэффициент полезного действия идеального цикла Карно (теорема Карно) (рис. 2.8)

$$\eta = (T_1 - T_2)/T_1,$$

где T_1 и T_2 – термодинамические температуры нагревателя и холодильника.

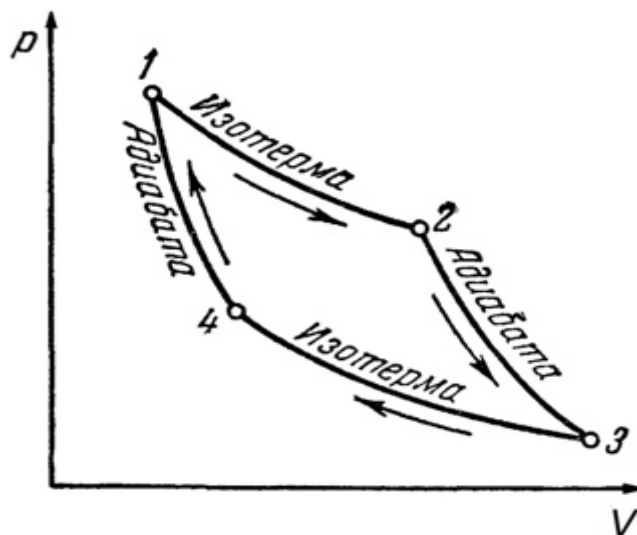


Рис. 2.8

- Приращение энтропии для замкнутых равновесных процессов

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T},$$

где S_1, S_2 – энтропия в начальном и конечном равновесных состояниях системы; δQ – элементарное количество теплоты; T – температура системы, при которой она получает тепло δQ .

- Изменение энтропии в изопроцессах:

а) при изобарном процессе

$$\Delta S = \nu \left(C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right);$$

б) при изохорном процессе ($A = 0$)

$$\Delta S = \nu C_V \ln \frac{T_2}{T_1};$$

в) при изотермическом процессе

$$\Delta S = \nu R \ln(V_2/V_1);$$

г) при адиабатическом процессе

$$\Delta S = 0.$$

Примеры решения задач

Пример 1. У тепловой машины, работающей по циклу Карно, температура нагревателя T_1 в $k = 1,6$ раза больше температуры холодильника T_2 . За один цикл машина производит полезную работу $A = 12$ кДж. Какая работа A' за цикл затрачивается внешними силами на изотермическое сжатие рабочего тела?

Решение

$T_1/T_2 = k = 1,6,$ $A = 12$ кДж. $A' = ?$	Воспользуемся теоремой Карно: КПД η тепловой машины, работающей по циклу Карно, зависит только от температур нагревателя T_1 и холодильника T_2 и не зависит от природы рабочего тела и устройства тепловой машины
---	---

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

Учитывая условие задачи, получим КПД машины

$$\eta = \frac{k - 1}{k}. \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия цикла Карно запишем через работу A и тепло Q_1 , переданное рабочему телу от нагревателя, $\eta = A/Q_1$, откуда с учетом выражения (1) получим

$$Q_1 = \frac{kA}{k - 1}. \quad (2)$$

Работу A найдем через Q_1 и тепло Q_2 , переданное от рабочего тела холодильнику,

$$A = Q_1 - Q_2.$$

Отсюда, учитывая выражение (2), имеем

$$Q_2 = \frac{A}{k - 1}. \quad (3)$$

Применим к изотермическому сжатию первое начало термодинамики в виде

$$Q = \Delta U - A', \quad (4)$$

где Q – тепло, переданное рабочему телу. В нашей задаче $Q = -Q_2$, так как тепло отнимается от тела и передается холодильнику; ΔU – приращение внутренней энергии рабочего тела. У нас $\Delta U = 0$, поскольку $T = \text{const}$; A' – искомая работа внешних сил над рабочим телом. В результате из выражения (4) имеем $A' = Q_2$. Используя формулу (3), найдем

$$A' = \frac{A}{k-1} = 20 \text{ кДж.}$$

Ответ: $A' = 20 \text{ кДж.}$

Пример 2. Водород совершает цикл Карно. Найдите КПД цикла, если при адиабатическом расширении: а) объем газа увеличивается в $k = V_2/V_1 = 2$ раза; б) давление уменьшается в $k = P_1/P_2 = 2$ раза.

Решение

а) $\frac{V_2}{V_1} = k = 2;$ б) $\frac{P_1}{P_2} = k = 2.$ $\eta_1 - ? \quad \eta_2 - ?$	а) Воспользуемся формулой КПД цикла Карно $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}, \quad (1)$ где T_1, T_2 – температура нагревателя и холодильника. Используем для адиабатического процесса уравнение Пуассона в виде
---	---

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1},$$

откуда имеем

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}, \quad (2)$$

где $\gamma = 1,4$ – постоянная адиабаты для двухатомного водорода. По условию задачи $V_1/V_2 = 1/n$. Тогда из выражения (2)

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{1}{k} \right)^{\gamma-1} = k^{1-\gamma}.$$

Подставив это выражение в формулу (1), найдем КПД цикла Карно при увеличении объема газа в $n = 2$ раза

$$\eta_1 = 1 - k^{1-\gamma} = 0,24 = 24 \%;$$

б) запишем уравнение Пуассона в следующем виде:

$$P_1 T_1^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = P_2 T_2^{\frac{\gamma}{1-\gamma}},$$

откуда

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}},$$

или, учитывая условие задачи, получим

$$\frac{T_2}{T_1} = k^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}.$$

С учетом этого выражения из формулы (1) найдем КПД цикла, когда давление уменьшается в $k = 2$ раза

$$\eta_2 = 1 - k^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 0,18 = 18 \, \%.$$

Ответ: $\eta_1 = 24 \, \%$, $\eta_2 = 18 \, \%$.

Пример 3. Один моль гелия при изобарном расширении увеличил свой объем в $k = V_2/V_1 = 4$ раза. Найдите приращение энтропии ΔS .

Решение

$\nu = 1$ моль, $V_2/V_1 = k = 4,$ $P = \text{const.}$ $\Delta S - ?$	Приращение энтропии находим из второго начала термодинамики для равновесных процессов $\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}, \quad (1)$ где δQ – элементарное количество теплоты, находится из первого начала термодинамики, записанного в дифференциальной форме,
--	---

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (2)$$

Приращение внутренней энергии для одного моля газа

$$dU = \frac{i}{2} R dT, \quad (3)$$

где $R = 8,31$ Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная. Элементарная работа газа

$$\delta A = P dV. \quad (4)$$

Продифференцируем уравнение состояния идеального газа для одного моля ($\nu = 1$) с учетом того, что процесс изобарный, $PdV = RdT$. Тогда выражение (4) запишем

$$\delta A = RdT. \quad (5)$$

Подставив выражения (3) и (5) в уравнение (2), получим

$$\delta Q = R \left(\frac{i}{2} + 1 \right) dT.$$

Подставим это выражение в уравнение (1) и проинтегрируем

$$\Delta S = R \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \int_1^2 \frac{dT}{T} = R \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (6)$$

где $i = 3$ – число степеней свободы атомов гелия. Применив уравнение Менделеева – Клапейрона к состояниям газа при изобарном процессе, получим с учетом условия задачи

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

Используя это соотношение, из выражения (6) найдем приращение энтропии

$$\Delta S = R \left(\frac{i}{2} + 1 \right) \ln k = 29 \text{ Дж/К}.$$

Ответ: $\Delta S = 29 \text{ Дж/К}$.

Пример 4. Один моль двухатомного идеального газа находится при температуре $T_1 = 300 \text{ К}$ и сжимается от объема V_1 до объема $V_2 = V_1/2$ один раз изотермически, а другой – адиабатически. Найдите приращение энтропии и конечную температуру T_2 в обоих процессах.

Решение

$\nu = 1 \text{ моль},$ $T_1 = 300 \text{ К},$ $V_2 = V_1/2.$	Для нахождения приращения энтропии используем второе начало термодинамики $\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}. \quad (1)$
$\Delta S_1 - ? \Delta S_2 - ?$ $T_2 - ?$	Элементарное количество теплоты δQ находится из первого начала термодинамики $\delta Q = dU + \delta A, \quad (2)$ где dU – приращение внутренней энергии. При изотермическом процессе $dU = 0$. Элементарная работа газа $\delta A = PdV. \quad (3)$

Из уравнения Менделеева – Клапейрона, записанного для одного моля ($\nu = 1$), найдем $P = RT/V$ и подставим это выражение в уравнение (3). В результате получим

$$\delta A = RT \frac{dV}{V}. \quad (4)$$

Учитывая $dU = 0$, из выражений (2) и (4) имеем

$$\delta Q = RT \frac{dV}{V}.$$

Подставив это выражение в уравнение (1), найдем приращение энтропии при изотермическом сжатии

$$\Delta S_1 = R \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Учитывая условие задачи $V_2 = V_1/2$ и табличное значение универсальной газовой постоянной $R = 8,31$ Дж/(моль · К), получим искомое приращение энтропии

$$\Delta S_1 = -R \ln 2 = -5,76 \text{ Дж/К}.$$

Знак «минус» означает, что энтропия при этом процессе уменьшается, так как макросистема не является замкнутой.

Для адиабатического процесса $\delta Q = 0$, тогда из уравнения (1) видно, что $\Delta S_2 = 0$, т. е. энтропия при данном процессе остается постоянной.

Температура при изотермическом процессе не изменяется, следовательно, по условию задачи конечная температура в этом процессе $T_2 = T_1 = 300$ К. Для адиабатического процесса используем уравнение Пуассона в виде $T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$, откуда

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}. \quad (5)$$

Постоянная адиабаты $\gamma = C_p/C_v$. Используя формулы молярных теплоемкостей C_p и C_v , найдем $\gamma = (i + 2)/i$. В задаче дан двухатомный газ, для которого число степеней свободы $i = 5$, тогда $\gamma = 1,4$. Учитывая условие задачи $V_2 = V_1/2$, получим из выражения (5)

$$T_2 = 2^{\gamma-1} T_1 = 396 \text{ К}.$$

Таким образом, конечная температура больше при адиабатическом сжатии.

Ответ: $\Delta S_1 = -5,76$ Дж/К, $\Delta S_2 = 0$, $T_2 = 396$ К.

Задачи для самостоятельного решения

111. В результате кругового процесса газ совершил работу $A = 1$ Дж и передал охладителю количество теплоты $Q_2 = 4,2$ Дж. Определите термический КПД η цикла.

112. Совершая замкнутый процесс, газ получил от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 4$ кДж. Определите работу A газа при протекании цикла, если его термический КПД $\eta = 0,1$.

113. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, отдает охладителю $2/3$ количества теплоты Q_1 , полученного от нагревателя. Температура T_2 охладителя равна 280 К. Определите температуру T_1 нагревателя.

114. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура охладителя $T_2 = 290$ К. Во сколько раз увеличится КПД η цикла, если температура нагревателя повысится от $T_1 = 400$ К до $T_1'' = 600$ К?

115. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура T_1 нагревателя в три раза выше температуры T_2 охладителя. Нагреватель передал газу количество теплоты $Q_1 = 42$ кДж. Какую работу A совершил газ?

116. Тепловой двигатель, работающий по циклу Карно, имеет температуру нагревателя $t_1 = 227$ °С и холодильника $t_2 = 127$ °С. Во сколько раз надо увеличить температуру нагревателя, чтобы КПД двигателя увеличился в $n = 3$ раза?

117. Идеальный двухатомный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ кмоль, совершает замкнутый цикл, график которого изображен на рис. 2.9. Определите: 1) количество теплоты Q_1 , полученное от нагревателя; 2) количество теплоты Q_2 , переданное охладителю; 3) работу A , совершаемую газом за цикл; 4) термический КПД η .

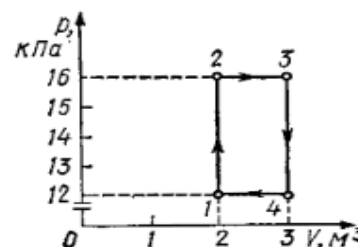


Рис. 2.9

118. Воду массой $m_1 = 5$ кг при температуре $T_1 = 280$ К смешали с водой массой $m_2 = 8$ кг при температуре $T_2 = 350$ К. Найдите: 1) температуру T смеси; 2) изменение ΔS энтропии, происходящее при смешивании.

119. Найдите изменение энтропии ΔS при плавлении $m = 1$ кг льда.

120. Найдите изменение энтропии ΔS при превращении $m = 10$ г льда при температуре $t_1 = -20$ °С в пар при температуре $t_2 = 100$ °С.

121. Найдите изменение ΔS энтропии при изобарном расширении азота массой $m = 4$ г от объема $V_1 = 5$ л до объема $V_2 = 9$ л.

122. Найдите изменение энтропии ΔS при переходе водорода массой $m = 6$ г от объема $V_1 = 20$ л под давлением $p_1 = 150$ кПа к объему $V_2 = 60$ л под давлением $p_2 = 100$ кПа.

123. Вещество массой $m = 10,5$ г изотермически расширяется от $V_1 = 2$ л до $V_2 = 5$ л. Найдите изменение энтропии ΔS в этом процессе.

124. Найдите приращение энтропии при изохорном и изобарном нагревании аргона массой $m = 8$ г, если его абсолютная температура в обоих процессах увеличилась в $k = 2$ раза.

125. Воздух массой $m = 1$ кг, сжимаясь адиабатически, уменьшил свой объем в $k_1 = 6$ раз, а затем при постоянном объеме его давление увеличилось в $k_2 = 1,5$ раза. Найдите приращение энтропии ΔS в этом процессе.

126. Гелий массой $m = 1,7$ г, адиабатически расширяясь, увеличил свой объем в $k = 3$ раза и затем изобарно сжался до первоначального объема. Найдите приращение энтропии газа ΔS в этом процессе.

127. Во сколько раз необходимо увеличить при постоянной температуре объем газа в количестве $\nu = 4$ моля, чтобы его энтропия увеличилась на $\Delta S = 23$ Дж/К?

128. Кислород массой $m = 1,0$ кг, находящийся при давлении $P_1 = 0,50$ МПа и температуре $T_1 = 400$ К, изобарно расширяясь, увеличил объем в $k = 2$ раза, а затем сжался изотермически до давления $P_2 = 4$ МПа. Найдите суммарное приращение энтропии ΔS .

129. Газ в количестве $\nu = 2$ моля изохорно охлаждается, а затем изобарно расширяется до первоначальной температуры. Найдите приращение энтропии ΔS , если давление газа в данном процессе изменилось в $k = 3,3$ раза.

130. Изменение энтропии на участке между двумя адиабатами в цикле Карно $\Delta S = 4,19$ кДж/К. Разность температур между двумя изотермами $\Delta T = 100$ К. Какое количество теплоты Q превращается в теплоту в этом процессе?

ТЕСТЫ ДЛЯ РЕЙТИНГ-КОНТРОЛЯ

1. Какая из приведенных формул выражает зависимость внутренней энергии ν молей идеального одноатомного газа от температуры?

- 1) νRT ; 2) $1/3 \nu RT$; 3) $3/2 \nu RT$.

2. В дизеле в начале такта сжатия температура воздуха равна 27°C , а давление 70 кПа . Во время сжатия объем воздуха уменьшается в 15 раз, а давление возрастает до $3,5\text{ МПа}$. Чему равна при этих условиях температура воздуха в конце такта сжатия?

- 1) 1000°C ; 2) 727°C ; 3) 427°C ; 4) 517°C .

3. Каково давление одноатомного идеального газа, занимающего объем 2 л, если его внутренняя энергия равна 300 Дж ?

- 1) $1,5 \cdot 10^5\text{ Па}$; 2) $1,5 \cdot 10^6\text{ Па}$; 3) $6 \cdot 10^6\text{ Па}$; 4) $1 \cdot 10^6\text{ Па}$; 5) $1 \cdot 10^5\text{ Па}$.

4. Газ находится в сосуде под давлением 50 МПа . При сообщении газу 60 МДж теплоты он изобарно расширился на $0,5\text{ м}^3$. На сколько изменилась внутренняя энергия газа?

- 1) 50 МДж ; 2) 45 МДж ; 3) 40 МДж ; 4) 35 МДж .

5. Чему равна плотность кислорода при температуре 47°C и давлении 1 МПа ? Молярная масса кислорода равна 32 г/моль . Универсальная газовая постоянная $8,31\text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$.

- 1) $1,2\text{ кг/м}^3$; 2) 12 кг/м^3 ; 3) 16 кг/м^3 ; 4) 68 кг/м^3 .

6. Если при постоянной температуре число молекул идеального газа, содержащегося в замкнутом сосуде, увеличить на 220 %, объем сосуда увеличить на 40 %, то давление газа увеличится:

- 1) в 1,7 раза; 2) 1,9 раза; 3) 2,1 раза; 4) 2,3 раза.

7. Чему равна плотность водорода при нормальных условиях? Молярная масса водорода $\mu = 2\text{ г/моль}$. Газовая постоянная $R = 8,31\text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$:

- 1) $0,02\text{ кг/м}^3$; 2) $0,04\text{ кг/м}^3$; 3) $0,09\text{ кг/м}^3$; 4) $0,86\text{ кг/м}^3$.

8. При неизменной концентрации молекул гелия средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул увеличилась в 4 раза. Как при этом изменилось давление газа?

1) не изменилось; 2) уменьшилось в 2 раза; 3) увеличилось в 2 раза; 4) увеличилось в 4 раза; 5) увеличилось в 16 раз.

9. Работа, совершаемая идеальной тепловой машиной, имеющей КПД 70 % и отдающей за один цикл холодильнику 300 Дж теплоты, равна за один цикл:

1) 210 Дж; 2) 420 Дж; 3) 1 000 Дж; 4) 700 Дж.

10. Средний квадрат скорости поступательного движения молекул некоторого газа, находящегося под давлением $8 \cdot 10^4$ Па, равен $6 \cdot 10^5$ м²/с². Чему равна плотность этого газа при данных условиях?

1) 1 кг/м³; 2) 0,5 кг/м³; 3) 0,8 кг/м³; 4) 0,4 кг/м³.

11. Определите температуру газа, находящегося в закрытом сосуде, если давление газа увеличивается на 0,4 процента от первоначального давления при нагреве на 1 °С.

1) 225 К; 2) 250 К; 3) 275 К; 4) 300 К; 5) 325 К.

12. При изобарном процессе газ совершает работу 100 Дж при изменении его температуры от $T_1 = 2T_2$ до T_2 . Какая работа будет совершена, если начальную температуру газа увеличить вдвое ($T_1 = 4T_2$)?

1) 300 Дж; 2) 500 Дж; 3) 200 Дж; 4) 100 Дж.

13. Средняя квадратичная скорость молекул газа 400 м/с. Определите объем, который займет газ при среднем давлении 0,1 МПа и массе 1,0 кг.

1) 0,93 м³; 2) 0,83 м³; 3) 0,73 м³; 4) 0,53 м³.

14. Какое количество теплоты нужно передать 2 молям идеального одноатомного газа, чтобы изобарно увеличить его объем в 2 раза? Начальная температура газа T_0 . Газовая постоянная R .

1) $2RT_0$; 2) $3RT_0$; 3) $4RT_0$; 4) $5RT_0$; 5) $6RT_0$.

15. Определите концентрацию молекул водорода, находящегося под давлением $2,67 \cdot 10^4$ Па, если средняя квадратичная скорость поступательного движения молекул при этих условиях равна $2 \cdot 10^3$ м/с. Молярная масса водорода равна 2 г/моль. Число Авогадро равно $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

1) $3 \cdot 10^{24}$ м³; 2) $6 \cdot 10^{24}$ м³; 3) $5 \cdot 10^{24}$ м³; 4) $4 \cdot 10^{24}$ м³.

16. Газ занимает объем $V_1 = 8$ л при температуре $T_1 = 300$ К. Определите массу газа, если после изобарного нагревания его до температуры $T_2 = 900$ К его плотность стала равна $\rho_2 = 0,6$ кг/м³.

1) 12,4 г; 2) 13,4 г; 3) 14,4 г; 4) 15,4 г; 5) 16,4 г.

17. Идеальный одноатомный газ находится в сосуде с жесткими стенками объемом 0,6 м³. При нагревании его давление возросло на 3 кПа. Насколько увеличилась внутренняя энергия газа?

1) на 2,7 кДж; 2) 3,6 кДж; 3) 1,8 кДж.

18. Нагреваемый при постоянном давлении идеальный двухатомный газ совершил работу 400 Дж. Какое количество теплоты было передано газу?

1) 200 Дж; 2) 1 400 Дж; 3) 400 Дж; 4) 800 Дж; 5) 1 000 Дж.

19. Чему равна масса газа в сосуде, если концентрация молекул кислорода в сосуде вместимостью 5 л равна $9,41 \cdot 10^{23}$ м⁻³? Молярная масса кислорода $\mu = 32$ г/моль. Число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

1) 0,10 г; 2) 0,25 г; 3) 0,75 г; 4) 1,25 г; 5) 2,05 г.

20. Концентрация молекул идеального газа уменьшилась в 4 раза, а средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул увеличилась в 4 раза. Давление газа при этом:

1) увеличилось в 16 раз; 2) уменьшилось в 16 раз;
3) увеличилось в 4 раза; 4) уменьшилось в 4 раза; 5) не изменилось.

21. Как изменится КПД идеальной тепловой машины, если абсолютную температуру нагревателя и холодильника увеличить вдвое?

1) не изменится; 2) увеличится в 4 раза; 3) уменьшится в 4 раза;
4) увеличится в 2 раза; 5) уменьшится в 2 раза.

22. Каково давление азота, если средняя квадратичная скорость его молекул 500 м/с , а его плотность $1,35 \text{ кг/м}^3$? Молярная масса азота 28 г/моль .

1) $107,3 \text{ кПа}$; 2) $112,5 \text{ кПа}$; 3) $120,1 \text{ кПа}$; 4) $125,7 \text{ кПа}$; 5) $130,8 \text{ кПа}$.

23. При температуре T_0 и давлении P_0 идеальный газ, взятый в количестве вещества 1 моль , занимает объем V_0 . Чему равен объем газа, количество вещества которого равно 2 молям , при том же давлении P_0 и температуре $2T_0$?

1) V_0 ; 2) $2V_0$; 3) $4V_0$; 4) $8V_0$; 5) $1/2V_0$.

24. Объем водорода, взятого в количестве вещества 3 моль , в сосуде при температуре 300 К и давлении P_1 равен V_1 . Чему равен объем кислорода, взятого в количестве вещества 3 моль , в сосуде при той же температуре и том же давлении? Молярная масса водорода 2 г/моль , кислорода 32 г/моль .

1) V_1 ; 2) $8V_1$; 3) $16V_1$; 4) $24V_1$.

25. При изобарном расширении азота газ совершил работу, равную $157,1 \text{ Дж}$. Какое количество теплоты было сообщено азоту? Молярная масса азота равна 28 г/моль , его удельная теплоемкость при постоянном объеме равна $745 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$.

1) 1400 Дж ; 2) 740 Дж ; 3) 680 Дж ; 4) 550 Дж ; 5) 325 Дж .

26. Если μ – молярная масса, m_0 – масса молекулы, а V_2 – средний квадрат скорости молекул идеального газа, имеющего температуру T и давление P , то концентрация молекул этого газа может быть вычислена по формуле (Постоянная Больцмана – k . Газовая постоянная – R):

1) $2kT/3$; 2) $3RT/2$; 3) $3P/m_0V_{\text{ср}}$; 4) $3kP/2$.

27. Средняя квадратичная скорость некоторого газа при нормальных условиях равна 480 м/с . Сколько молекул содержит 1 г этого газа? Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

1) $1,94 \cdot 10^{22}$; 2) $1,94 \cdot 10^{23}$; 3) $2,14 \cdot 10^{23}$; 4) $2,04 \cdot 10^{23}$;
5) $2,04 \cdot 10^{22}$.

28. Если E_k – средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы газа, а n_0 – концентрация молекул, то основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов может быть записано в виде (P – давление газа):

- 1) $P = 2/3 n_0 E_k$; 2) $P = 3/2 n_0 E_k$; 3) $1/2 n_0 E_k$; 4) $n_0 E_k$.

29. В баллоне объемом 80 л содержится сжатый кислород при температуре 27 °С и давлении 0,6 МПа. Какая масса кислорода была израсходована при газосварке, если давление в баллоне упало до 0,3 МПа? Универсальная газовая постоянная 8,31 Дж/(моль · К). Молярная масса кислорода 32 г/моль.

- 1) 0,25 кг; 2) 0,28 кг; 3) 0,31 кг; 4) 0,35 кг; 5) 0,38 кг.

30. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, произвел работу 600 Дж. Температура нагревателя 500 К, холодильника 300 К. Определите количество теплоты, отданное холодильнику.

- 1) 1000 Дж; 2) 950 Дж; 3) 850 Дж; 4) 1100 Дж; 5) 900 Дж.

31. В результате циклического процесса газ совершает работу 100 Дж и передает холодильнику количество теплоты 4000 Дж. Определите КПД цикла.

- 1) 10 %; 2) 15 %; 3) 20 %; 4) 25 %; 5) 30 %.

ВОПРОСЫ ДЛЯ РЕЙТИНГ-КОНТРОЛЯ

Рейтинг-контроль № 1

1. Понятие идеального газа. Молекулярно-кинетическое толкование температуры. Макроскопические параметры системы.
2. Внутренняя энергия идеального газа. Число степеней свободы. Закон равнораспределения энергии.
3. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
4. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева).
5. Динамические и статистические закономерности в физике. Статистический метод исследования системы. Понятие о функции распределения.
6. Фазовое пространство. Фазовая точка, фазовая ячейка. Статистическое усреднение.
7. Распределение Максвелла. Средние скорости молекул.
8. Барометрическая формула. Распределение Больцмана.
9. Распределение Максвелла – Больцмана.
10. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы реальных газов.
11. Метастабильное состояние. Критическое состояние.
12. Внутренняя энергия реального газа.
13. Характеристика жидкого состояния. Ближний порядок.
14. Поверхностное натяжение. Силы, возникающие на кривой поверхности жидкости. Формула Лапласа. Смачивание и капиллярные явления.
15. Понятие столкновения. Упругое и неупругое столкновения.
16. Прицельное расстояние. Эффективное сечение рассеяния. Средняя длина свободного пробега.

Рейтинг-контроль № 2

1. Основные термодинамические понятия: внутренняя энергия, работа, теплота. Уравнение первого начала термодинамики.
2. Зависимость теплоемкости идеального газа от вида процесса. Работа, совершаемая газом при изопроцессах.
3. Адиабатический процесс.
4. Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс (цикл).
5. Цикл Карно и его КПД для идеального газа.
6. Принцип действия теплового двигателя и холодильной машины.
7. Энтропия. Закон возрастания энтропии.

ВОПРОСЫ, ВХОДЯЩИЕ В ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ БИЛЕТЫ

1. Понятие идеального газа. Молекулярно-кинетическое толкование температуры. Макроскопические параметры системы.
2. Внутренняя энергия идеального газа. Число степеней свободы. Закон равнораспределения энергии.
3. Давление газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
4. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Клапейрона – Менделеева).
5. Понятие о функции распределения.
6. Распределение Максвелла. Средние скорости молекул.
7. Барометрическая формула. Распределение Больцмана.
8. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Изотермы реальных газов.
9. Понятие метастабильного и критического состояний.
10. Внутренняя энергия реального газа.
11. Эффект Джоуля – Томсона.
12. Сжижение газов.
13. Характеристика жидкого состояния.
14. Поверхностное натяжение.
15. Формула Лапласа.
16. Фазы вещества, фазовые переходы.
17. Явление переноса – диффузия.
18. Явление переноса – теплопроводность.
19. Явление переноса – вязкость.
20. Основные термодинамические понятия: внутренняя энергия, работа, теплота.
21. Уравнение первого начала термодинамики.
22. Зависимость теплоемкости идеального газа от вида процесса.
23. Работа, совершаемая газом при изопроцессах.
24. Адиабатический процесс.
25. Обратимые и необратимые процессы. Круговой процесс (цикл).
26. Цикл Карно и его КПД для идеального газа.
27. Принцип действия теплового двигателя и холодильной машины.

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

1. Средняя энергия молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT,$$

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{вращ}} + 2i_{\text{колеб.}}$$

2. Внутренняя энергия одного моля идеального газа

$$U_{\mu} = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT.$$

3. Молярная теплоемкость при постоянном объеме

$$C_v = \frac{i}{2} RT.$$

4. Теплоемкость при постоянном давлении

$$C_p = C_v + R.$$

5. Показатель адиабаты

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}.$$

6. Основное уравнение МКТ идеального газа

$$p = \frac{2}{3} n(E_k).$$

7. Средняя кинетическая энергия одной молекулы газа

$$E_k = \frac{m \langle v^2 \rangle}{2}.$$

8. Уравнение состояния идеального газа

$$pV = \frac{m}{\mu} RT.$$

9. Среднее значение величины x

$$\langle x \rangle = \int x f(x) dx.$$

10. Среднее квадратичное значение величины x

$$\langle x^2 \rangle = \int x^2 f(x) dx.$$

11. Формула для дисперсии

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \langle x \rangle)^2 f(x) dx.$$

12. Функция распределения молекул по скоростям

$$F(v) = dN/N = 4\pi v^2 \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) dv.$$

13. Барометрическая формула

$$P = P_0 \exp \left(-\frac{\mu g h}{RT} \right).$$

14. Закон распределения Больцмана

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{mgh}{RT}\right).$$

15. Уравнение Ван-дер-Ваальса

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

16. Внутренняя энергия одного моля реального газа

$$U_\mu = C_V T - \frac{a}{V_\mu}.$$

17. Формула Лапласа (лапласово давление)

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

18. Средняя длина свободного пробега молекул

$$\lambda = \frac{\langle v \rangle}{\sqrt{2}\pi d^2 \langle v \rangle n} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma}.$$

19. Уравнение диффузии (закон Фика, 1885)

$$M_i = -D \frac{d\rho_i}{dx} S.$$

20. Коэффициент диффузии для газов

$$D_\Gamma = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle.$$

21. Коэффициент диффузии для жидкости

$$D_{\text{ж}} = \frac{kT}{6\pi\eta r}.$$

22. Коэффициент диффузии в твердых телах

$$D_{\text{ТВ}} = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right).$$

23. Уравнение теплопроводности (закон Фурье, 1822)

$$q = -\kappa \frac{dT}{dx} S.$$

24. Коэффициент теплопроводности для газов

$$\kappa_{\text{газов}} = \frac{1}{3} \langle v \rangle \lambda \rho c_v.$$

25. Уравнение закона вязкости (уравнение Ньютона)

$$K = -\eta \frac{dU}{dx} S.$$

26. Коэффициент динамической вязкости для газов

$$\eta = \frac{1}{3} \langle V \rangle \lambda \rho.$$

27. Кинематическая вязкость

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

28. Первое начало термодинамики

$$d'Q = dU + pdV.$$

29. Уравнение Пуассона

$$(TV^{\gamma-1}) = \text{const.}$$

30. Уравнение адиабатического процесса

$$PV^{\gamma} = \text{const.}$$

31. Удельная теплоемкость

$$c = \frac{C}{m}.$$

32. Молярная теплоемкость (теплоемкость моля вещества)

$$C_{\mu} = \frac{C}{\nu}.$$

33. Молярная теплоемкость и удельная теплоемкость связаны

$$C_{\mu} = c\mu.$$

34. Объемная теплоемкость (теплоемкость единицы объема)

$$C' = \frac{C}{V}.$$

35. Коэффициент полезного действия цикла Карно

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

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

36. Коэффициент преобразования холодной машины

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

37. Изменение энтропии

$$dS = \frac{d'Q}{T}.$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии была представлена наиболее важная информация по молекулярной физике и термодинамике: молекулярно-кинетическая теория идеального газа; элементы классической статистики; реальные газы; фазовые переходы; жидкое состояние вещества; элементы физической кинетики; первое и второе начала термодинамики. Материал составлен в соответствии с программой по физике для высших учебных заведений и сопровождается вопросами для самоконтроля студентов, задачами с примерами их выполнения и заданиями по каждой теме. Рекомендательный библиографический список содержит ссылки на основные курсы по физике для студентов высших учебных заведений.

Планируется продолжение издания представленного учебного пособия, которое будет содержать материалы по электромагнетизму: закон Кулона и напряженность электрического поля на различных поверхностях; основные свойства проводников и свойства диэлектриков; закон постоянного и переменного тока; магнитное поле в веществе и в вакууме; закон электромагнитной индукции.

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Галкин, А. Ф.* Физика в лекционных демонстрациях [Электронный ресурс] : учеб.-метод. пособие / А. Ф. Галкин, Л. В. Грунская, В. В. Дорожков ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 171 с. – ISBN 978-5-9984-0957-8. – URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/handle/123456789/8307> (дата обращения: 21.04.2025).

2. *Гервидс, В. И.* Лекционные демонстрации по физике [Электронный ресурс] / В. И. Гервидс. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9zIynk0LszA> (дата обращения: 25.05.2025).

3. *Грунская, Л. В.* Лекции по физике : Молекулярная физика и термодинамика / Л. В. Грунская ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2021. – 123 с. – ISBN 978-5-9984-1426-8. – URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9406/1/02291.pdf> (дата обращения: 25.05.2025).

4. *Иродов, И. Е.* Физика макросистем. Основные законы / И. Е. Иродов. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 207 с. – ISBN 978-5-00101-113-2.

5. *Савельев, И. В.* Курс общей физики : учеб. пособие. В 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – М. : Лань, 2017. – 432 с. – ISBN 978-5-8114-0630-2.

6. *Матвеев, А. Н.* Молекулярная физика : учеб. пособие для вузов / А. Н. Матвеев. – М. : Высш. шк., 1981. – 400 с.

7. *Сивухин, Д. В.* Общий курс физики : учеб. пособие. В 5 т. Т. 1. Механика / Д. В. Сивухин. – 6-е изд., стер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2020. – 560 с. – ISBN 978-5-9221-1512-4.

8. *Телеснин, Р. В.* Молекулярная физика : учеб. пособие для ун-тов / Р. В. Телеснин. – 2-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 1973. – 360 с.

9. *Зисман, Г. А.* Курс общей физики : учеб. пособие для вузов. В 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. Колебания и волны / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – 11-е изд., стер. – М. : Лань, 2024. – 340 с. – ISBN 978-5-507-47680-0.

10. *Трофимова, Т. И.* Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 11-е изд., стер. – М. : Академия, 2006. – 560 с. – ISBN 5-7695-2629-7.

11. *Кунин, В. Н.* Конспект лекций по трудным разделам физики / В. Н. Кунин ; Владим. политехн. ин-т. – Владимир, 1982. – 52 с.
12. Физика. Программа, методические указания и задачи для студентов-заочников (с примерами решения) / сост.: А. Ф. Галкин [и др.] ; под ред. А. А. Кулиша ; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2002. – 128 с.
13. Методические указания для самостоятельной работы по физике / сост.: Е. В. Орлик, Э. Д. Корж, В. Г. Прокошев ; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1988. – 48 с.
14. *Сивухин, Д. В.* Общий курс физики : учеб. пособие для вузов. В 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – 6-е изд., стер. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 544 с. – ISBN 978-5-9221-1514-8.
15. *Фриш, С. Э.* Курс общей физики. В 3 т. Т. 1. Физические основы механики. Молекулярная физика. Колебания и волны / С. Э. Фриш, А. В. Тиморева. – 13-е изд., стер. – М. : Лань, 2009. – 480 с. – ISBN 975-5-8114-0662-3.
16. *Ремизов, А. Н.* Курс физики : учеб. для вузов / А. Н. Ремизов, А. Я. Потапенко. – 2-е изд., стер. – М. : Дрофа, 2004. – 720 с. – ISBN 5-7107-8221-1.
17. *Путилов, К. А.* Курс физики. В 3 т. Т. 1. Механика. Акустика. Молекулярная физика. Термодинамика / К. А. Путилов. – 11-е изд., стер. – М. : ГИ ФМЛ, 1963. – 560 с.
18. *Хайкин, С. Э.* Общий курс физики. Молекулярная физика / С. Э. Хайкин. – М. : ГИ ТТЛ, 1940. – 372 с.
19. *Киттель, Ч.* Берклевский курс физики / Ч. Киттель, У. Найт, М. Рудерман. – 3-е изд., стер. – М. : Лань, 2005. – 480 с. – ISBN 5-8114-0644-4.
20. *Радченко, И. В.* Молекулярная физика / И. В. Радченко. – М. : Наука, 1965. – 479 с.

Учебное электронное издание

ГРУНСКАЯ Любовь Валентиновна
МАЛЫШЕВА Дарья Алексеевна

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Учебное пособие по физике для иностранных студентов

Редактор Е. А. Платонова
Технический редактор Ш. Ш. Амирсейидов
Компьютерная верстка Л. В. Макаровой
Корректор Н. В. Пустовойтова
Выпускающий редактор А. А. Амирсейидова

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 9 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.