

**П. В. Пекин**

**И. И. Беспаль**

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

**Учебно-методическое пособие**

**для самостоятельной работы**

**студентов**

Челябинск 2009

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Челябинский государственный педагогический университет»

**П. В. Пекин**  
**И. И. Беспаль**

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**  
**Учебно-методическое пособие**  
**для самостоятельной работы**  
**студентов**

Челябинск  
2009

УДК 536.1(021)  
ББК 22.36я73  
П 24

П.В. Пекин, И.И. Беспаль. Молекулярная физика: учеб.- метод. пособие для самостоятельной работы студентов. – Челябинск: Изд-во ЧГПУ, 2009. – 88 с.

ISBN

В работе рассматриваются основные вопросы раздела «Молекулярная физика» дисциплины «Общая и экспериментальная физика», изучаемой на физическом факультете педвуза. Приведены основные соотношения, формулы и законы, представлен богатый иллюстративный материал. Для организации самостоятельной работы студентов при подготовке к занятиям приведено примерное содержание письменных проверочных работ, проводимых в рамках аудиторных занятий. Также представлены вопросы, которые могут быть использованы студентами для самоконтроля с помощью компьютера.

Пособие предназначено для преподавателей физики, студентов физических факультетов педвузов.

Рецензенты: В.Г. Трофимов, канд. ф.-м. наук, доцент ЧелГУ  
М.В. Потапова, д-р пед. наук, доцент ЧГПУ

ISBN

© Пекин П.В., Беспаль И.И. 2009  
© Издательство  
Челябинского государственного  
педагогического университета, 2009

# Тема 1. Идеальный газ

## Основные понятия и законы

Моль – количество вещества, содержащее столько структурных элементов (атомов, молекул), сколько их содержится в 0,012 кг углерода  $C^{12}$ .

Молярная масса – масса одного моля вещества. Обозначается  $M$ , измеряется в  $\frac{кг}{моль}$ .

Число Авогадро – число молекул в 1 моле вещества.  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

Давление – средний суммарный импульс, сообщаемый при ударах молекул единице площади сосуда за единицу времени. Обозначается  $p$ , измеряется в  $\left[ \frac{Н}{м^2} = Па \right]$ .

Температура – мера средней кинетической энергии молекул. Обозначается  $T$ , измеряется в  $K$ .

Идеальный газ – такой газ, у которого не учитываются силы взаимодействия между молекулами и собственный объем молекул.

## Экспериментальные газовые законы

1. Закон Бойля-Мариотта (1686 г.): **для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная.**

$$pV = const \text{ при условии, что } m, T = const. \quad (1.1)$$

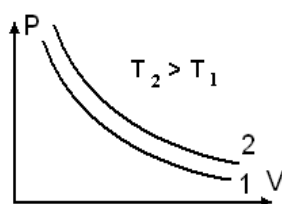


Рис. 1

Графически процесс изображается с помощью изотерм, представленных на рисунке 1.

2. Закон Гей-Люссака (1802 г.): **для данной массы газа при постоянном давлении объем линейно растет с температурой.**

$$V = V_0(1 + \alpha t) \text{ при условии, } m, p = const. \quad (1.2)$$

$\alpha = \frac{\Delta V}{Vt}$  – коэффициент объемного расширения, численно равен относительному изменению объема на 1 градус.  $V_0$  – объем газа при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

Графически процесс изображается с помощью изобар, представленных на рисунке 2.

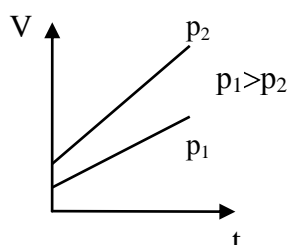


Рис. 2

3. Закон Шарля (1787 г.): **для данной массы газа при постоянном объеме давление линейно растет с температурой.**

$$p = p_0(1 + \beta t) \text{ при условии, что } m, V = const. \quad (1.3)$$

$\beta = \frac{\Delta p}{pt}$  – термический коэффициент давления, численно равен относительному изменению давления на 1 градус. Под  $p_0$  понимается давление газа при температуре  $0^\circ\text{C}$ .

Графически процесс изображается с помощью изохор, представленных на рисунке 3.

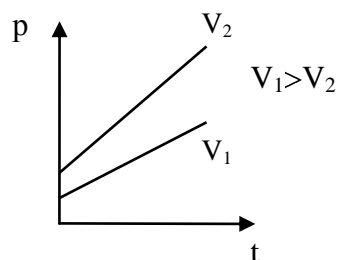


Рис. 3

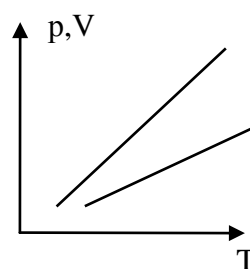


Рис. 4

Примечание:  $\alpha = \beta = \frac{1}{273}$ , если в (1.2) и (1.3) перейти к температурной шкале Кельвина  $T = t + 273(K)$ , они примут другой вид:  $\frac{V}{T} = const$  и  $\frac{p}{T} = const$ . Изобары и изохоры в координатах  $p, V = f(T)$  имеют вид, представленный на рисунке 4.

4. Объединенный газовый закон (уравнение Клапейрона, 1834 г.): **для данной массы газа отношение произведения давления газа на объем к его температуре есть величина постоянная.**

$$\frac{pV}{T} = const. \quad (1.4)$$

5. Закон Авогадро (1811 г.): **один моль любого газа при одинаковых условиях ( $p$  и  $T$ ) занимает одинаковый объем  $V_m$  (т.к. содержит одинаковое число молекул  $N_A$ ).**

6. Уравнение состояния идеального газа (Менделеева – Клапейрона, 1874 г.):

$$pV = \nu RT, \quad (1.5)$$

где  $\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$  – количество вещества (число молей),  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  –

универсальная газовая постоянная.

7. Закон Дальтона (1801 г.): **давление смеси газов равно сумме парциальных давлений.**

$$p = \sum_i p_i. \quad (1.6)$$

### Основные теоретические закономерности

8. Основное уравнение кинетической теории газов (Клаузиус, 1905 г.):

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v_k^2, \quad (1.7)$$

где  $m_0$  – масса одной молекулы,  $v_k$  – средняя квадратичная скорость

$v_k = \sqrt{\frac{\sum v_i^2}{N}}$ ,  $N$  – общее число молекул,  $n = \frac{N}{V} \left( \frac{1}{\text{м}^3} \right)$  – концентрация молекул.

$$m_0 = \frac{M}{N_A}. \quad (1.8)$$

$$v_k = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (1.9)$$

Уравнение (1.7) может быть выражено через другие параметры:

$$pV = \frac{2}{3} \bar{\varepsilon} N; \quad pV = NkT; \quad p = nkT, \quad \text{где } k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \text{ – постоянная}$$

Больцмана,  $\bar{\varepsilon}$  – средняя энергия одной молекулы, поэтому

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2}kT . \quad (1.10)$$

### 9. Распределение молекул по скоростям (Максвелл, 1860 г.)

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv} = 4\pi \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 . \quad (1.11)$$

В этой формуле  $dN$  – число молекул газа, скорости которых лежат в интервале  $dv$ .  $f(v) = \frac{dN}{Ndv}$  – функция распределения, численно равная вероятности того, что из всех  $N$  молекул имеется  $dN$  молекул, которые имеют скорости в интервале  $dv$ ;  $v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}$  – наиболее вероятная скорость, т.е. скорость, которую имеет большинство молекул.

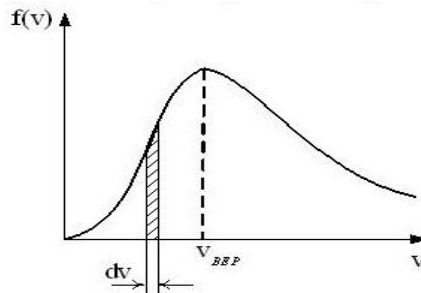


Рис. 5

Площадь заштрихованной фигуры равна  $\frac{\Delta N}{N}$ , где  $\frac{\Delta N}{N}$  – относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале  $dv$ . Площадь под всей кривой [ $S = \int_0^{\infty} f(v)dv = 1$  (условие нормировки)] численно равна вероятности того, что молекула газа имеет какую-либо скорость от 0 до  $\infty$ , и т.к. все молекулы движутся, то вероятность равна 1 (т.е. достоверное событие).

Распределение (1.11) зависит от вида газа и температуры. Если перейти к относительной скорости  $u = \frac{v}{v_г}$ , то получится универсальная формула, не зависящая от рода газа и температуры

$$f(u) = \frac{dN}{Ndu} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2 . \quad (1.12)$$

Формулой (1.12) удобно пользоваться при решении задач, т.к. она задается таблично (или графически).

10. Распределение Больцмана – зависимость концентрации молекул от высоты в поле силы тяжести

$$n = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}, \quad (1.13)$$

где  $n_0$  – концентрация газа на высоте  $h = 0$ .

11. Барометрическая формула – зависимость атмосферного давления от высоты над уровнем моря

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (1.14)$$

где  $p_0$  – давление на уровне моря.

## 12. Явления переноса

При хаотическом движении молекулы переходят из одних точек пространства в другие, перенося присущие им массу, энергию и импульс. Это приводит к возникновению ряда процессов, называемых явлениями переноса. Механизм явлений переноса – это механизм столкновений.

$$\bar{z} = \sqrt{2} \pi d^2 \bar{v} n, \quad (1.15)$$

где  $\bar{z} \left( \frac{1}{c} \right)$  – среднее число столкновений одной молекулы с остальными за 1 с,  $n \left( \frac{1}{m^3} \right)$  – концентрация молекул,  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$  – средняя арифметическая скорость,  $d$  – эффективный диаметр молекул (определяемый экспериментально из явлений переноса).

$Z = \frac{1}{2} \bar{z} n \left( \frac{1}{m^3 \cdot c} \right)$  – общее число столкновений молекул в единице объема за единицу времени.

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}, \quad (1.16)$$

где  $\bar{\lambda}$  (м) – средняя длина свободного пробега молекул.

$$\tau = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}} = \frac{1}{\bar{z}}, \quad (1.17)$$

где  $\tau$  (с) – среднее время столкновений, т.е. время между двумя столкновениями.

В таблице 1 приведены все явления переноса.



**Таблица 1**

Явление	Что переносится	Закон	Формула коэффициента переноса	Размерность коэффициента
Диффузия	Масса	$\Delta m = -D \frac{\Delta \rho}{\Delta x} S \Delta t$ (Фик)	$D = \frac{1}{3} \bar{v} \bar{\lambda}$	$\frac{m^2}{c}$
Вязкость (внутреннее трение)	Импульс	$f = -\eta \frac{\Delta u}{\Delta x} S$ (Ньютон)	$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda}$	$\frac{кг}{м \cdot с}$
Теплопроводность	Энергия	$\Delta Q = -K \frac{\Delta T}{\Delta x} S \Delta t$ (Фурье)	$K = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda} c_v$	$\frac{Дж}{м \cdot с \cdot К}$

Градиенты плотности  $\left(\frac{\Delta \rho}{\Delta x}\right)$ , скорости  $\left(\frac{\Delta u}{\Delta x}\right)$  и температуры  $\left(\frac{\Delta T}{\Delta x}\right)$  – векторы, направленные в сторону возрастания величины. Знак (–) показывает, что перенос идет против градиента. Площадь переноса  $S$  перпендикулярна направлению переноса (т.е. градиенту).

13. Зависимость эффективного диаметра молекул от температуры (Сёзерленд)

$$d_{эф} = d_{\infty} \sqrt{1 + \frac{c}{T}}, \quad (1.18)$$

где  $d_{\infty}$  – эффективный диаметр при  $T \rightarrow \infty$ , величина, близкая к  $d_{ист}$  – истинному диаметру молекулы.  $C(k)$  – константа, определяемая экспериментально.

#### 14. Вакуум

Вакуум – разряжение газа, при котором  $\bar{\lambda} \geq L$ , где  $L$  – размер сосуда. При этом молекулы не сталкиваются между собой. Явления переноса в вакууме протекают иначе. Т.к. градиентов нет, термины «диффузия», «вязкость» и «теплопроводность» теряют смысл и носят другие названия: «молекулярное течение» и «теплопередача».

Скорость диффузии резко возрастает, становится сравнимой со скоростью теплового движения молекул. Трение перестает быть внутренним.

При обычных давлениях произведение  $\rho \lambda$  не зависит от давления (т.к.  $\rho \sim p$ ,  $\lambda \sim \frac{1}{p}$ ). В вакууме  $\lambda = L = \text{const}$  и коэффициент теплопередачи  $\eta \sim p$ , а т.к.  $p$  мало,

то и  $\eta$  низкое. Это используется в сосуде Дьюара (термос), т.е. сосуде с двойными стенками, откуда откачан воздух до состояния вакуума.

### Задания для самопроверки

*Понятия «моль, молярная масса, число Авогадро, универсальная постоянная»*

#### Вариант 1

1. Найти количество вещества, содержащееся в 1 кг воды.
2. Какой газ тяжелее: азот или кислород?
3. Почему 1 моль идеального газа при одинаковых условиях ( $p$  и  $T$ ) занимает одинаковый объем?
4. Найти массу атома водорода.
5. Каков по порядку размер молекул и радиус действия сил притяжения и отталкивания?

*Понятие «экспериментальные газовые законы»*

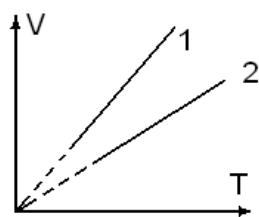


Рис. 6

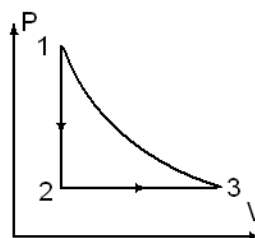


Рис. 7

#### Вариант 2

1. а) Какой закон изображен на графике (рис. 6)?  
б) Почему в начале координат пунктир?  
в) Чем отличаются графики 1 и 2?  
г) Как называются эти прямые?
2. а) Назовите процессы 1–2, 2–3, 3–1 на рис.7.  
б) Какими законами они описываются?  
с) Как изменяется температура в процессе 2–3?
3. Назовите процессы 1–2, 2–3, 3–4, 4–1 (рис. 8). Изобразите эти процессы в координатах  $p, V$  и  $p, T$ .
4. Могут ли пересекаться две изотермы реального газа? Если нет, то почему? Если да, то при каких условиях?
5. В баллоне с азотом из-за утечки масса газа уменьшилась вдвое при постоянной температуре. Как при этом изменилось давление?

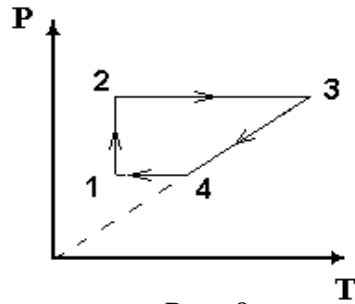


Рис. 8

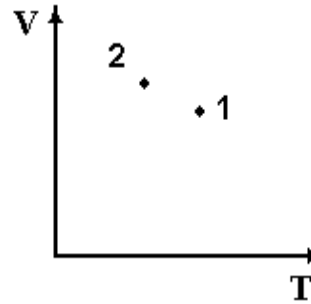


Рис. 9

**Вариант 3**

1. Каков характер движения молекул в газах?
2. На графике (рис. 9) при  $m = \text{const}$  и  $\rho = \text{const}$  приведены два состояния газа 1 и 2. В каком состоянии давление газа больше?
3. Изобразить процессы 1–2, 2–3, 3–1 (рис. 10) в координатах  $p, T$  и  $V, T$ .
4. За счет чего происходит тепловое расширение тел?
5. Где больше вещества: в 4 г гелия или в 1 моль водорода?

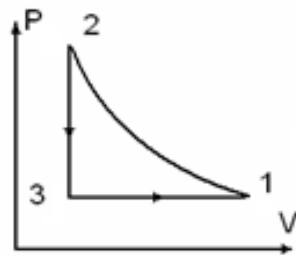


Рис. 10

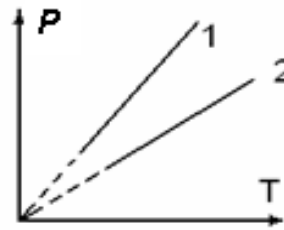


Рис. 11

**Вариант 4**

1. Чему равен радиус сферы молекулярного действия?
2. Что тяжелее: 1 кмоль воды или 10 л воды?
3. а) Какой процесс изображен на графике (рис. 11)?  
 б) Почему в начале координат пунктир?  
 в) Чем отличаются графики 1 и 2?  
 г) Какой параметр обозначен цифрами 1 и 2? Какой из них больше: 1 или 2?

д) Как называются эти прямые?

4. а) Какой закон изображен на графике (рис. 12)?

б) Чем отличаются кривые 1 и 2?

в) Какой параметр больше: 1 или 2? Докажите

свое утверждение.

г) Как называются эти кривые?

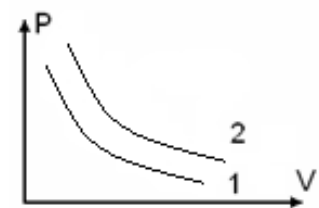


Рис. 12

5. Из баллона ( $p = 15$  атм.,  $V = 40$  л,  $T = 290$  К) из-за утечки вышло 0,2 кг воздуха. Какое установилось давление?

*Понятия «статистические распределения, явления переноса»*

*Вариант 5*

1. Какая зависимость изображена на графике (рис. 13)? Напишите формулу. Как изменится кривая при увеличении температуры? Что должно быть записано вместо «?»?

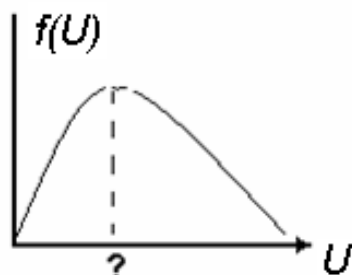


Рис. 13

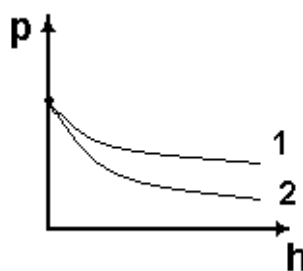


Рис. 14

3. Приведите опыты или природные явления, иллюстрирующие явление вязкости газов.

4. Как зависит коэффициент теплопроводности газов от температуры и давления?

5. Определить коэффициент диффузии воздуха при н.у.

*Вариант 6*

1. а) Какой закон изображен на графике (рис. 14)? Напишите формулу.

б) Какой график относится к кислороду, какой к азоту?

в) Что означает отрезок, отсекаемый на графике на оси  $p$ ?

2. Как зависит коэффициент вязкости газов от температуры и давления?

3. Расстояние между стеклами в раме 3 см, в другой, такой же по площади, раме – 15 см. Через какую из рам потери тепла будут больше и во сколько раз?

4. Определите среднюю длину свободного пробега молекул воздуха при  $p = 1$  атм.,  $t = 17$  °С.

5. Что такое эффективный диаметр молекулы? Как и почему он зависит от температуры?

*Вариант 7*

1. а) Какой закон изображен на графике (рис. 15)? Напишите формулу.

б) Какой график относится к зиме, какой – к лету?

в) Что означает отрезок, отсекаемый на графике на оси  $n$ ?

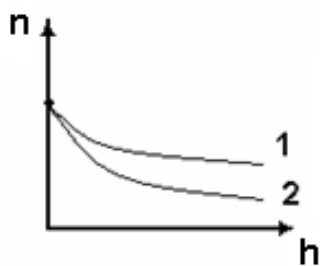


Рис. 15

2. При каком условии и почему коэффициент теплопроводности начинает зависеть от температуры? Как? Где это используется?

3. Определите среднее время между столкновениями молекул воздуха при н.у.  $d = 3 \cdot 10^{-10}$  м.

4. Что такое вакуум?

5. Летит самолет. Покажите, как направлен градиент скорости воздуха под крылом самолета и как направлен перенос импульса?

#### Вариант 8

1. а) Запишите и изобразите распределение Максвелла.

б) Проходит ли кривая через начало координат и что это означает?

в) Что означает максимум на кривой?

г) Как сместится максимум при изменении температуры?

д) Чему равна площадь под кривой и что это означает?

2. Когда концентрация кислорода в горах выше: зимой или летом?

3. Какое количество тепла теряется в данной аудитории через рамы ежедневно?

4. Как зависит коэффициент диффузии газов от температуры и давления?

5. По трубе течет газ. Покажите направление градиента скорости и направление переноса импульса.

### Задания для самопроверки в тестовой форме

#### Вариант 1

1. При понижении абсолютной температуры гелия в 1,5 раза средняя кинетическая энергия его молекул

1) увеличится в 1,5 раза

2) уменьшится в 1,5 раза

3) уменьшится в 2,25 раза

4) не изменится.

2. В сосуде находится постоянное количество идеального газа. Как изменится температура газа, если он перейдет из состояния 1 в состояние 2 (рис. 16)?

- 1)  $T_2 = 4T_1$       2)  $T_2 = \frac{1}{4} T_1$       3)  $T_2 = \frac{4}{3} T_1$       4)  $T_2 = \frac{3}{4} T_1$

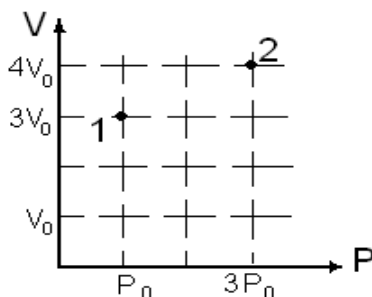


Рис. 16

3. Концентрация молекул идеального газа увеличилась в 2 раза, а абсолютная температура уменьшилась в 1,5 раза. Как изменилось давление?

- 1) увеличилось в  $\frac{4}{3}$  раза  
 2) увеличилось в  $\frac{3}{4}$  раза  
 3) уменьшилось в  $\frac{4}{3}$  раза  
 4) не изменилось

4. При постоянной температуре масса газа уменьшилась в 2 раза, объем уменьшился в 2 раза. Как изменилось давление?

- 1) увеличилось в 4 раза  
 2) уменьшилось в 2 раза  
 3) увеличилось в 2 раза  
 4) не изменилось

5. При неизменной концентрации газа средняя квадратичная скорость молекул увеличилась в 2 раза. Как изменилось давление?

- 1) увеличилось в 2 раза  
 2) уменьшилось в 4 раза  
 3) увеличилось в 4 раза  
 4) не изменилось

#### Вариант 2

1. В цилиндре под поршнем находится воздух при давлении  $p_1 = 0,2$  МПа и  $T_1 = 300$  К. Каким должен быть вес груза, положенного на поршень, после нагре-

вания воздуха до температуры  $T_2 = 323 \text{ K}$ , чтобы объем воздуха в цилиндре был равен первоначальному? Площадь поршня  $S = 30 \text{ см}^2$ .

- 1) 4,6 кг                      2) 46 кг                      3) 46 Н                      4) 460 Н

2. Открытую пробирку с воздухом при атмосферном давлении  $p_1$  медленно нагрели до температуры  $t_1$ , затем герметически закрыли и охладили до  $t_2 = 10^\circ\text{C}$ . Давление при этом упало до  $p_2 = 0,7p_1$ . До какой температуры была нагрета пробирка?

- 1) 440К  
2) 490К  
3) 404К  
4) 410К

3. Температура воды увеличилась от 300 до 350 К за 5 мин. На сколько увеличилась средняя энергия движения молекул воды? Масса воды 2 кг.

- 1) на 400 кДж  
2) на  $4,2 \cdot 10^{-15}$  Дж  
3) на  $10^{-21}$  Дж  
4) на 623,2 кДж

4. Открытый сосуд нагрет до температуры  $T_1 = 723 \text{ K}$ . Какая часть воздуха осталась в нем по сравнению с тем количеством, какое в нем было при  $T = 300 \text{ K}$ ? Расширением сосуда пренебречь.

- 1) 0,45                      2) 0,415                      3) 0,35                      4) 0,535

5. Какова средняя квадратичная скорость движения молекул газа, если при давлении 250 кПа газ массой 8 кг занимает объём  $15 \text{ м}^3$ ?

- 1) 1245 м/с  
2) 1186 м/с  
3) 1320 м/с  
4) 1200 м/с

### Вариант 3

1. За 5 суток вода массой 50 г полностью испарилась. Сколько в среднем молекул вылетало с поверхности воды за время, равное 1 с?

- 1)  $6,62 \cdot 10^{-23}$   
2)  $2,1 \cdot 10^5$   
3)  $3,9 \cdot 10^{18}$   
4)  $3,9 \cdot 10^{10}$

2. Вертикальный цилиндр с тяжелым поршнем наполнен кислородом, масса которого  $m = 10$  г. После увеличения температуры на  $\Delta T = 50$  К поршень, имеющий площадь  $S = 100$  см<sup>2</sup>, поднялся на высоту  $h = 7$  см. Определить вес поршня, если над поршнем нормальное давление  $p_0 = 0,1$  МПа. Трение поршня о стенки цилиндра не учитывать.

- 1) 1250 Н
- 2) 850 Н
- 3) 85 кг
- 4) 125 кг

3. Газ нагрет от температуры  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 39^\circ\text{C}$ . На сколько процентов увеличился объем, если давление осталось неизменным?

- 1) 4%
- 2) 0,4%
- 3) 0,04%
- 4) 0,004%

4. Тонкий резиновый шар радиусом  $r_1 = 2$  см наполнен воздухом при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении  $p_0 = 0,1$  МПа. Каков будет радиус шара, если его опустить в воду с температурой  $t_2 = 4^\circ\text{C}$  на глубину  $h = 20$  м?

- 1) 8 см
- 2) 4 см
- 3) 13,7 см
- 4) 1,37 см

5. Средняя энергия поступательного движения молекул газа в баллоне равна  $4,14 \cdot 10^{-21}$  Дж. Чему равна температура газа в этом баллоне?

- 1)  $200^\circ\text{C}$
- 2) 200 К
- 3)  $300^\circ\text{C}$
- 4) 300 К



## Тема 2. Первый закон термодинамики

### Основные понятия и законы

- Термодинамическая система – макроскопическое тело или система тел, обменивающиеся энергией с окружающей средой.
- Среда – все, что окружает термодинамическую систему.
- Термодинамические параметры – физические величины, описывающие состояние термодинамической системы (давление  $p$ , объем  $V$ , температура  $T$ , количество вещества  $\nu$  и т.д.).
- Параметры состояния – параметры, однозначно определяющие состояние системы (внутренняя энергия  $U$ , энтропия  $S$ , свободная энергия  $F$ ).
- Стационарное состояние термодинамической системы – состояние, при котором параметры не изменяются с течением времени.
- Равновесное состояние – стационарное состояние, при котором неизменность параметров поддерживается за счет процессов, происходящих в самой системе. В координатах  $p, V$  изображается точкой.
- Равновесный процесс – цепочка равновесных состояний. В координатах  $p, V$  изображается линией.
- Время релаксации – время, в течение которого система, выведенная из состояния равновесия, сама возвращается в равновесное состояние.
- Все реальные процессы неравновесны. Близкие к равновесным – квазиравновесные – это такие процессы, для которых выполняется условие  $\frac{dT}{dt} \ll \frac{dT}{d\tau}$  (скорость изменения какого-либо параметра много меньше скорости его релаксации). Квазиравновесные – это процессы бесконечно медленные, когда параметры меняются на бесконечно малые величины  $dp, dT, dV$ .
- Внутренняя энергия системы – это энергия движения и взаимодействия частиц, из которых состоит термодинамическая система. Функция состояния системы.
- Работа – мера передачи энергии упорядоченного движения. Функция процесса.  
 $\delta A = pdV$ .

- Теплообмен – форма передачи энергии неупорядоченного движения. Функция процесса.

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (2.1)$$

представляет собой I закон термодинамики в дифференциальной форме. Соотношение

$$Q = \Delta U + A \quad (2.2)$$

является I законом термодинамики в интегральной форме.

Поскольку внутренняя энергия  $U$  – функция состояния, значит, она является

полным дифференциалом, т.е.  $\oint dU = 0$ .

Вычисление работы: Элементарная работа  $\delta A = p dV$ , значит,

$$A = \int p dV \quad (2.3)$$

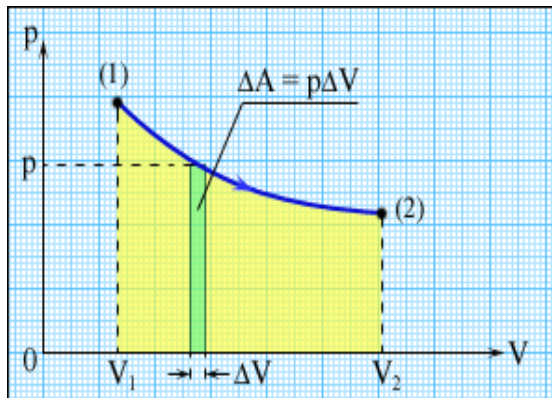


Рис. 17

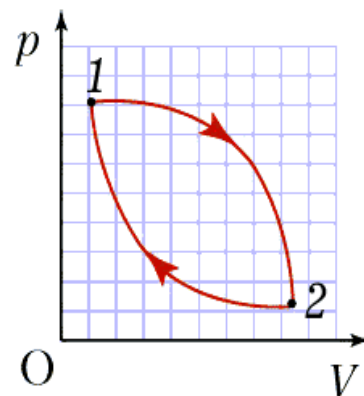


Рис. 18

Геометрический смысл интеграла – площадь. Поэтому работа равна площади фигуры  $V_1 1 2 V_2$  в координатах  $p, V$ , где 1–2 – процесс, изображающий зависимость  $p = f(V)$  (рис. 17).

Из (2.3) следует, что при  $dV > 0$  (расширение)  $A > 0$  – работа совершается системой; при  $dV < 0$  (сжатие)  $A < 0$  – работа совершается над системой. Если процесс круговой (циклический), то работа за цикл равна площади цикла (рис 18.), т.е.  $\oint dA \neq 0$ . Значит, работа не является полным дифференциалом (не является функцией состояния). Это функция процесса.

Теплоемкость. Теплоемкостью называют количество теплоты, необходимое для нагрева на 1 градус 1 кг (удельная) или 1 моль (молярная) вещества.

$$c = \frac{dQ}{mdT} \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}} \right); \quad C = \frac{dQ}{\nu dT} \left( \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}} \right).$$

Связь между удельной и молярной теплоемкостями:

$$C = cM. \quad (2.4)$$

Для газов различают  $C_p = \frac{dQ_p}{\nu dT}$  и  $C_v = \frac{dQ_v}{\nu dT}$ , где индексы  $p$  и  $V$  означают, что подвод тепла происходит при  $p = \text{const}$  или при  $V = \text{const}$ .

$$C_p = \frac{i+2}{2} R; \quad C_v = \frac{i}{2} R. \quad (2.5)$$

Отношение теплоемкостей (коэффициент Пуассона) имеет вид:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (2.6)$$

Здесь  $i$  – число степеней свободы, число независимых координат, определяющих положение тела в пространстве. Принимает следующие значения:  $i = 3$  для одноатомных молекул,  $i = 5$  для двухатомных молекул и  $i = 6$  для многоатомных.

Внутренняя энергия идеального газа определяется по формуле

$$U = \nu \frac{i}{2} RT, \quad (2.7)$$

при этом  $dU = \nu C_v dT$ .

Работа в изотермическом процессе

$$A_T = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (2.8)$$

Работа в изобарическом процессе

$$A = p \Delta V. \quad (2.9)$$

Адиабатный – процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой.  $\delta Q = 0$ . Близкий к адиабатному – очень быстрый процесс (взрыв, удар и т.д.) или процесс в адиабатной оболочке (термос, сосуд Дьюара).

Уравнение Пуассона, описывающее адиабатный процесс, имеет вид

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (2.10)$$

## Работа в адиабатном процессе

$$A = \frac{p_1 V_1}{(\gamma - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]. \quad (2.11)$$

Теплоемкость в адиабатном процессе  $C = 0$ , а в изотермическом  $C \rightarrow \infty$ . Это означает, что эти процессы идеальные, т.е. в реальной жизни невыполнимы. Реальные процессы, т.е. с конечным значением теплоемкости, называются политропными.

Уравнение политропных процессов имеет вид

$$pV^n = const, \quad (2.12)$$

где  $n$  – показатель политропы. Определить показатель политропы можно по формуле

$$n = \frac{C_p - C}{C_v - C}. \quad (2.13)$$

В этой формуле за  $C$  обозначена теплоемкость политропного процесса. При этом  $1 < n < \gamma$ . Из (2.12) вытекают уравнения (2.10) (при  $C = 0$ ), при  $C = \infty$  ( $n = 1$ ) – закон Бойля-Мариотта.

## Задания для самопроверки

### Вариант 1

1. Какая теплоемкость больше: удельная ( $c$ ) или молярная ( $C$ )?
2. Какой процесс наиболее выгоден для превращения теплоты в работу?
3. Какой процесс изображен на рисунке 19?
4. Азот переходит из состояния 1 ( $p_1 = 3 \cdot 10^5$  Па,  $V_1 = 1$  л) в состояние 2 ( $p_2 = 1$  атм,  $V_2 = 6$  л) сначала по адиабате, затем по изохоре. Изобразить процессы на графике. Найти количество теплоты, переданной газу, изменение его внутренней энергии и работу, совершенную газом.
5. Определить работу (в Дж) за цикл, приведенный на рисунке 20.

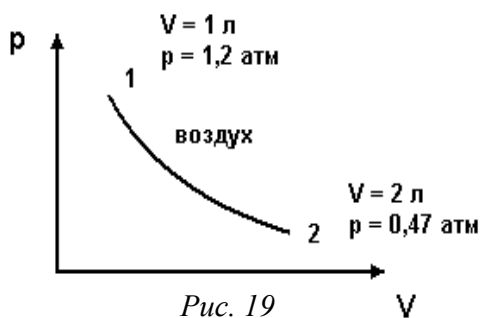


Рис. 19

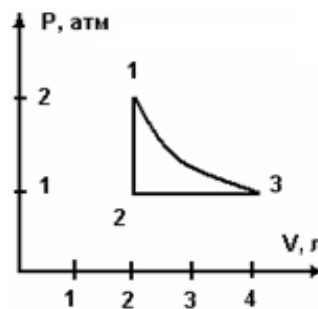


Рис. 20

### Вариант 2

1. Определить удельную теплоемкость гелия, воздуха, паров воды.
2. Какой процесс наиболее выгоден для нагрева системы?
3. Какой процесс изображен на рисунке 21?
4. Гелий переходит из состояния 1 ( $p_1 = 3$  атм,  $V_1 = 2$  л) в состояние 2 ( $p_2 = 1$  атм,  $V_2 = 6$  л) сначала по адиабате, потом по изохоре. Изобразить процессы на графике. Найти количество теплоты, переданной газу, изменение его внутренней энергии и работу, совершенную газом.
5. Определить работу (в Дж) за цикл, приведенный на рисунке 22.

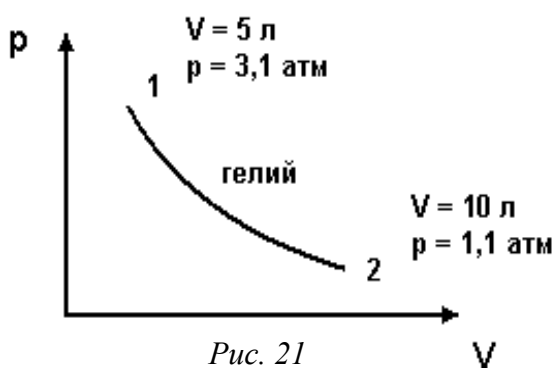


Рис. 21

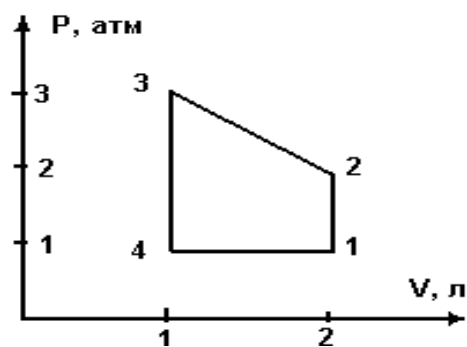


Рис. 22

### Вариант 3

1. У какого газа удельная теплоемкость больше: аргона (Ar) или углекислого ( $\text{CO}_2$ )?
2. Как изменяется температура при адиабатном сжатии газа и где это применяется?
3. Какой процесс изображен на рисунке 23?



Рис. 23

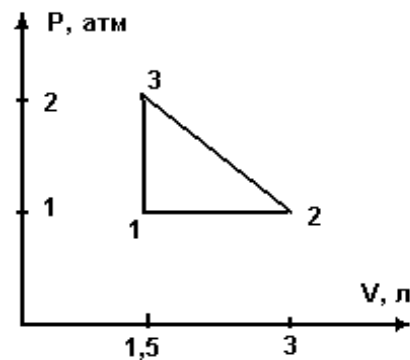


Рис. 24

4. Двухатомный газ переходит из состояния 1 ( $p_1 = 3$  атм.,  $V_1 = 2$  л) в состояние 2 ( $p_2 = 1$  атм,  $V_2 = 5$  л) сначала по изохоре, потом по изотерме. Изобразить процессы на графике. Найти количество теплоты, переданной газу, изменение его внутренней энергии и работу, совершенную газом.

5. Определить работу (в Дж) за цикл, приведенный на рисунке 24.

#### Вариант 4

1. 1 моль гелия и 1 моль водорода нагрели на одинаковое число градусов. В каком процессе затрачивается больше тепла?

2. Для некоторого газа  $\gamma = 1,66$ . Сколько атомов входят в состав молекулы этого газа?

3. Какой процесс изображен на рисунке 25?

4. Как изменяется температура при адиабатном расширении газа и где это применяется?

5. Найти работу за цикл, изображенный на рисунке 26.

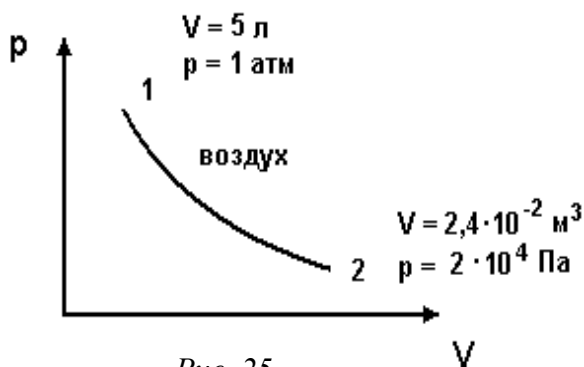


Рис. 25

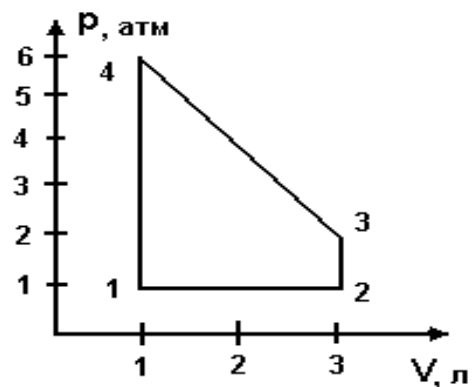


Рис. 26

## Задания для самопроверки в тестовой форме

Вариант 1

1. Какую работу совершает газ при переходе из состояния 1 в состояние 3 (рис. 27)?

- 1) 1 кДж                      2) 2 кДж                      3) 3 кДж                      4) 4 кДж

2. Какую работу совершает газ при переходе из состояния 1 в состояние 2 (рис. 28)?

- 1) 330 Дж                      2) 660 Дж                      3) 230 Дж                      4) 430 Дж

3. Определите, у какого газа, водорода или гелия, молярная теплоемкость при  $V = const$  больше?

- 1) у водорода                      2) у гелия                      3) одинаковые

- 4) данных для ответа на вопрос

недос-

таточно

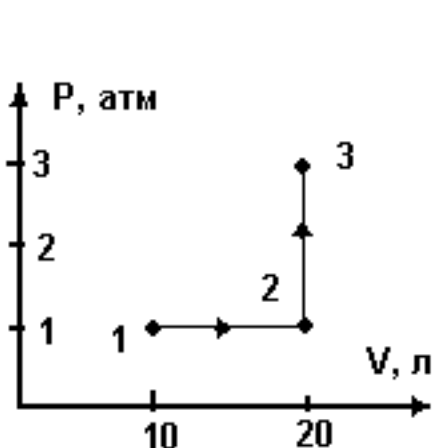


Рис. 27

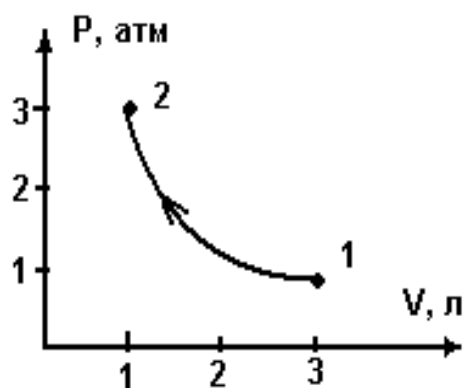


Рис. 28

4. Как соотносятся молярные теплоемкости при  $p = const$  следующих газов:

1 – аргон, 2 – кислород, 3 – углекислый газ.

1)  $c_1 > c_2 > c_3$

2)  $c_3 > c_2 > c_1$

3)  $c_3 > c_2 < c_1$

4)  $c_1 < c_2 > c_3$

5. У какого газа (1 – азот, 2 – водород) энергия одного моля при одинаковой температуре больше?

1)  $U_1 > U_2$

2)  $U_1 < U_2$

3)  $U_1 = U_2$

- 4) для ответа на вопрос данных недостаточно

## Вариант 2

1. Сани массой 6 кг скатываются с горы, образующей с горизонтом угол  $30^\circ$ . Пройдя по склону расстояние 50 м, сани достигают скорости 4,5 м/с. Определите количество теплоты, выделенное при трении полозьев о снег.

- |            |            |
|------------|------------|
| 1) 1000 Дж | 2) 1200 Дж |
| 3) 1300 Дж | 4) 1400 Дж |

2. При какой скорости свинцовая пуля, ударившись о преграду, полностью расплавится, если температура пули до удара была равна  $100^\circ\text{C}$ ? При ударе 60% энергии пули превращается в её внутреннюю энергию. Температура плавления меди  $1085^\circ\text{C}$ . Удельная теплоемкость меди  $0,38\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , удельная теплота плавления  $180\text{ Дж}/\text{кг}$ .

- |            |            |
|------------|------------|
| 1) 350 м/с | 2) 348 м/с |
| 3) 410 м/с | 4) 525 м/с |

3. С какой высоты упал без начальной скорости свинцовый шар, если при падении температура его повысилась на  $10\text{ К}$ ? Считать, что 0,8 энергии шара пошло на его нагревание. Сопротивлением воздуха пренебречь. Удельная теплоём-

кость свинца  $c = 130 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ .

- |          |          |
|----------|----------|
| 1) 123 м | 2) 145 м |
| 3) 166 м | 4) 173 м |

4. В электрический чайник налили холодную воду при температуре  $10^\circ\text{C}$ . Через 10 мин после включения чайника вода закипела. Через какое время она полностью испарится? Удельная теплоемкость воды  $4200\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , удельная теплота парообразования  $2,3\text{ МДж}/\text{кг}$ .

- |             |             |
|-------------|-------------|
| 1) 45,3 мин | 2) 32,3 мин |
| 3) 61 мин   | 4) 59,7 мин |

5. Рассчитайте, на какую примерно высоту можно было бы поднять гирию массой 1 кг за счёт теплоты, выделяемой чаем в стакане (240 мл) при охлаждении чая от температуры  $100^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$ . Удельную теплоемкость чая принять равной удельной теплоемкости воды  $4200\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

- |          |          |
|----------|----------|
| 1) 100 м | 2) 1 км  |
| 3) 5 км  | 4) 10 км |



# Тема 3. Второй закон термодинамики

## Основные понятия и законы

### 1. Тепловые и холодильные машины

Круговым процессом (циклом) называют процесс, в результате которого термодинамическая система возвращается в исходное состояние. На диаграмме  $p, V$  циклы изображаются в виде замкнутых кривых. Круговые процессы лежат в основе работы всех тепловых машин (ДВС, паровых и газовых турбин) и холодильных машин, поэтому их изучение имеет важное значение.

Рассмотрим произвольный круговой процесс  $1a2b1$ , совершаемый идеальным газом (рис. 29).

В процессе  $1a2$  (расширение газа) газ совершает работу  $A_1$ , равную площади  $1a2V_2V_1$ .  $A_1 > 0$ . Газ совершает работу.

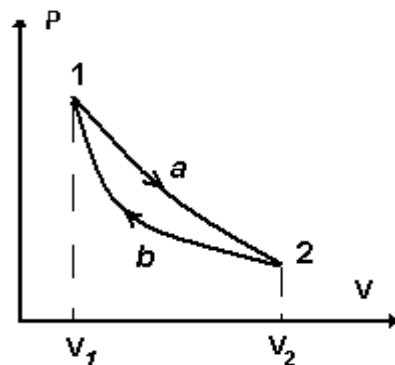


Рис. 29

В процессе  $2b1$  (сжатие) работа  $A_2 = S_{2b1V_1V_2} < 0$ . Работу совершают внешние силы.

Работа за цикл равна площади цикла  $A_{\text{ц}} = A_1 - A_2 > 0$ . Такой цикл называют прямым. Если процесс идет в обратном направлении  $2a1b2$ , то  $A_{\text{ц}} < 0$ . Такой цикл называется обратным.

В круговом процессе  $\Delta U = 0$ , и из 1-го закона термодинамики

$$\delta Q = \delta A, \text{ и } Q = A, \quad (3.1)$$

где  $Q$  – полное количество теплоты, сообщаемое газу за цикл,  $A$  – работа газа за цикл.

В прямом цикле  $A > 0$  и  $Q > 0$ , т.е. газ совершает работу за счет подводимого тепла. Машина, в которой рабочее тело совершает прямой цикл, называется тепловой машиной.

В обратном цикле над газом совершается работа  $-A$  ( $A < 0$ ) и от него отводится эквивалентное ей количество теплоты. Это холодильная машина.

Для того, чтобы работа за цикл  $A_{ц} \neq 0$ , необходимо, чтобы процесс расширения  $1a2$  протекал при более высокой температуре  $T_1$ , чем процесс сжатия  $2b1$ .  $T_1 > T_2$ . Поэтому при расширении газа к нему следует подводить тепло  $Q_1$ , а при сжатии – отводить тепло  $Q_2$ . Следовательно, теплота  $Q$  из (1) состоит из суммы  $Q_1$  и  $-Q_2$ .

$$A = Q_1 - Q_2. \quad (3.2)$$

Т.к. передача тепла может идти только от горячего тела к холодному, то для работы тепловой машины необходим нагреватель (сообщающий рабочему телу  $Q_1$ ) и холодильник (отбирающий  $Q_2$ ).

Схема тепловой машины приведена на рисунке 30. КПД тепловой машины определится отношением

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (3.3)$$

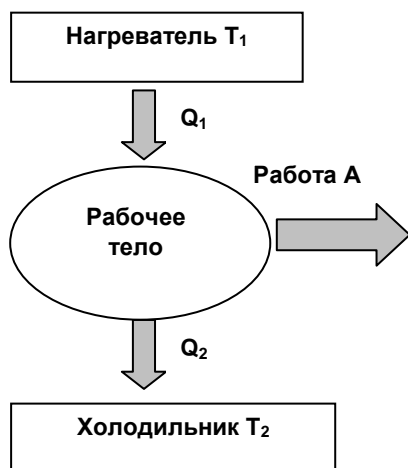


Рис. 30

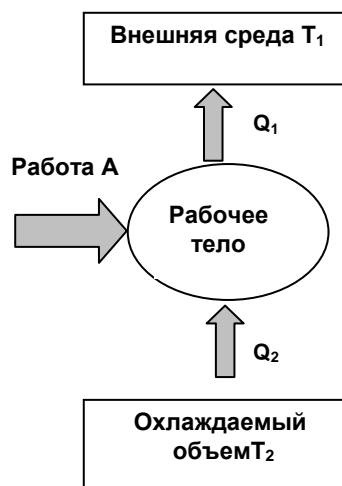


Рис. 31

В холодильной машине (рис.31) за счет работы внешнего источника энергии от охлаждаемого объема отнимается количество теплоты  $Q_2$  и передается во внешнюю среду  $Q_1$  (в соответствии с формулой (3.2)).

КПД и тепловой машины, и холодильника определяется формулой (3.3) и не может быть равным 100%. (Всю теплоту, взятую от нагревателя, превратить в эквивалентную ей работу нельзя).

Иногда для характеристики работы холодильника вводят холодильный коэффициент  $\eta_x = \frac{Q_2}{A}$ , который может быть равным 1, но это не КПД.

Как только появились первые тепловые машины и была осмыслена формула (3.3) ( $\eta < 1$ ), сразу возник вопрос, каким может быть максимальное значение КПД тепловой машины?

## 2. Цикл и теорема Карно

В 1824 г. французский инженер Сади Карно предложил схему идеальной тепловой машины с наивысшим КПД. Из каких процессов должен состоять этот цикл?

Т.к. самый выгодный процесс с точки зрения превращения тепла в работу изотермический ( $dU = 0$ ), то подвод тепла при  $T_1$  ( $Q_1$ ) и отвод ( $Q_2$ ) при  $T_2$  должны быть изотермическими. А замкнуть эти две изотермы выгоднее всего адиабатами (и работа совершается и теплота не расходуется  $\delta Q = 0$ ).

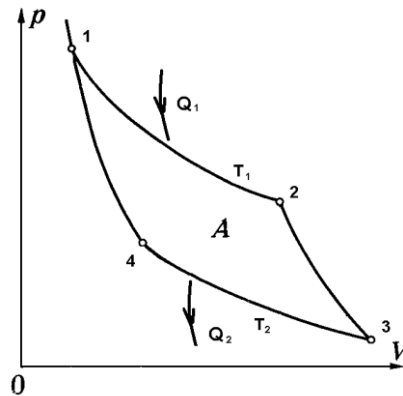


Рис. 32

На рис. 32 изображен идеальный обратимый цикл Карно, состоящий из двух изотерм и двух адиабат.

1→2 при  $T_1 = \text{const}$  к рабочему телу (идеальный газ) подводится количество теплоты  $Q_1$ .

2→3 – газ адиабатно расширяется, при этом температура снижается до  $T_2$ .

3→4 – изотермическое сжатие при  $T_2 = \text{const}$ , тепло  $Q_2$ , в которое превращается работа сжатия газа, передается холодильнику.

4→1 – адиабатическое сжатие (газ нагревается до  $T_1$ ).

Карно доказал, что КПД идеальной обратимой машины не зависит от природы рабочего тела и конструкции машины, а определяется только температурами нагревателя ( $T_1$ ) и холодильника ( $T_2$ ) – теорема Карно.

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (3.4)$$

Из (3.4) следуют два важных вывода:  $\eta$  не может быть равным 1 и единственный способ повысить КПД тепловой машины – это повышать температуру на-

гревателя  $T_1$ , т.к.  $T_2$  – это температура окружающей среды, которую мы не можем менять.

### 3. Второй закон термодинамики

1-й закон термодинамики рассматривает вопросы обмена энергией термодинамических систем со средой с количественной стороны (закон сохранения энергии) и ничего не говорит о направлении протекания процессов с теплообменом. На этот вопрос отвечает 2-й закон термодинамики, являющийся обобщением всего опыта человечества. Он имеет три формулировки.

1. Теплота сама собой не может переходить от менее к более нагретому телу без одновременных изменений в этих телах и окружающей среде. (Р. Клаузиус)

2. Невозможен процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу. (Кельвин – Томсон).

3. Невозможен вечный двигатель второго рода (М. Планк), т.е. двигатель с КПД = 1.

КПД реальных тепловых машин значительно ниже КПД цикла Карно из-за потерь тепла в окружающую среду, сил трения и т.д. Приблизительные цифры таковы: паровоз – 0,05 – 0,07, ДВС – 0,25 – 0,30, Дизель – 0,30 – 0,35. И только у газовых турбин (мощностью сотни тысяч лошадиных сил) он достигает порядка 0,6.

### 4. Энтропия и свободная энергия

2-й закон термодинамики позволяет ввести еще две функции состояния термодинамической системы – энтропию и свободную энергию.

Энтропия – аддитивная функция состояния системы, являющаяся мерой беспорядка и мерой обесцененности энергии и численно равная

$$dS = \frac{\delta Q}{T}; \Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}. \quad (3.5)$$

Ниже мы раскроем смысл этого определения.

Оказалось, что изменение энтропии в обратимых процессах равно нулю, в необратимых больше нуля. В общем случае  $\Delta S \geq 0$ , знак «больше» относится к необратимым процессам, «равно» – к обратимым. Но, т.к. все реальные процессы необратимы, то

$$\Delta S > 0. \quad (3.6)$$

Это неравенство получило название неравенства Клаузиуса и является математической формулировкой 2-го закона термодинамики. «Энтропия изолированных систем растет».

С учетом (3.5) можно записать уравнение (3.7), объединяющее 1-й и 2-й законы термодинамики:

$$TdS = dU + \delta A. \quad (3.7)$$

Если из (3.7) определить работу в обратимом изотермическом процессе, то получим  $\delta A_{изот} = -dF$ , или  $A_{изот} = F_1 - F_2$ , где

$$F = U - TS \quad (3.8)$$

называется свободной энергией.

И, т.к.  $U = F + TS$ , то свободная энергия – это та часть внутренней энергии, которая может быть превращена в работу в обратимом изотермическом процессе.

Величина  $TS$  называется «связанной энергией» – это та часть внутренней энергии, которая не может быть передана в форме работы. Это как бы «обесцененная» часть внутренней энергии, и она тем больше, чем больше энтропия. Отсюда энтропию можно считать мерой обесцененности энергии.

### 5. Статистический смысл 2-го закона термодинамики

В термодинамике состояние термодинамической системы определялось рядом параметров ( $p, T, V, S, U$ ). При этом внутреннее строение системы (с точки зрения молекулярно-кинетической теории) не рассматривалось. Это сделал Л. Больцман.

С точки зрения МКТ каждому состоянию системы (например, газа) соответствует определенное распределение молекул по скоростям и по объему.

Больцман ввел понятие вероятности  $\omega$  данного распределения (микрораспределения)

$$\omega = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Delta t}{t},$$

здесь  $t$  – время наблюдения за состоянием системы,  $\Delta t$  – та часть времени  $t$ , в течение которой реализуется данное распределение.

Вероятность термодинамического состояния системы  $W$  больше вероятности микрораспределения в  $P$  раз, т.к. молекулы неразличимы

$$W = \omega P.$$

$P$  – термодинамическая вероятность состояния. Она равна числу возможных микросостояний (микрораспределений) частиц, соответствующих данному термодинамическому состоянию (макросостоянию).

Больцман показал, что  $S = k \ln P + const.$

Формула Больцмана позволяет дать следующее статистическое толкование 2-го закона термодинамики (энтропия изолированной системы не убывает  $\Delta S \geq 0$ ):

$$\Delta S = k \ln \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.9)$$

Это означает (из (3.9)): термодинамическая вероятность состояния изолированной системы при всех происходящих в ней процессах не убывает.

При обратимых процессах система переходит от одного состояния к другому равновероятному ( $P_1 = P_2$ ,  $\ln \frac{P_2}{P_1} = 0$ ,  $\Delta S = 0$ ). Механическая модель – шарик на горизонтальной поверхности (рис. 33а). Оба состояния равновероятны, т.к. потенциальная энергия одинакова.

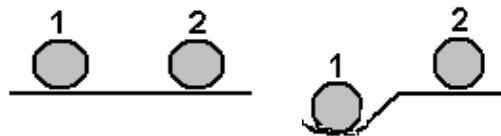


Рис. 33а

Рис. 33б

При необратимых процессах прямой переход означает переход от менее вероятного к более вероятному состоянию ( $P_1 < P_2$ ), что происходит самопроизвольно, а обратный переход означает переход от более вероятного к менее вероятному, что маловероятно будет идти самопроизвольно,  $\Delta S > 0$  ( $\ln \frac{P_2}{P_1} > 0$ ). Механическая модель – шарик в ямке и на горизонтали (рис. 33б).

Таким образом, статистический смысл 2-го закона термодинамики состоит в том, что он применим к системам, состоящим из огромного числа частиц, где действуют вероятностные (статистические) закономерности.

Равномерное распределение частиц по объему наиболее вероятно, и это состояние характеризуется максимальным значением энтропии (т.к. его можно реализовать бесчисленным числом способов). Наоборот, упорядоченное расположение частиц в конкретном идеальном кристалле можно реализовать только одним способом ( $P = 1$ ,  $\ln P = 0$ ,  $S = 0$ ).

Возрастание энтропии в изолированных идеальных системах означает переход от порядка к беспорядку (хаосу).

Поэтому энтропию можно считать мерой беспорядка.

## 6. Границы применимости 2-го закона термодинамики

Выше уже отмечалось, что 2-й закон термодинамики не применим к системам с малым числом частиц, или к процессам, в которых участвует малое число частиц. Это, образно говоря, нижняя граница применимости. Типичным примером, иллюстрирующим это, является броуновское движение – движение частиц, взвешенных в жидкости под действием теплового движения молекул жидкости.

Молекулы жидкости сталкиваются с броуновской частицей и сообщают ей некоторый импульс. Но т.к. число молекул, толкающих частицу с разных сторон, различно и все время меняется, то частица движется хаотично в разных направлениях. И при этом (особенно важно) и вверх, а это противоречит 2-му закону термодинамики. Движение броуновских частиц вверх (т.е. возрастание их потенциальной энергии) происходит за счет кинетической энергии молекул, т.е. за счет местного охлаждения жидкости, это своего рода тепловая машина с одним источником теплоты – жидкости.

Ряд ученых, распространяя 2-й закон термодинамики на всю Вселенную, выдвинули так называемую «теорию тепловой смерти Вселенной»: энтропия все время растет, градиенты исчезают, энергия обесценивается и все виды энергии в конечном итоге превращаются в энергию хаотического теплового движения молекул, вся Вселенная – хаос с какой-то одинаковой везде температурой, звезды погаснут.

Но Вселенная – система открытая, и к ней неприменим 2-й закон термодинамики. Это, образно говоря, верхняя граница применимости второго закона термодинамики.

Доказательством служат следующие экспериментально доказанные факты:

1. Все звезды имеют разный возраст.
2. Наблюдается рождение новых и сверхновых звезд.
3. Академиком В. Амбарцумяном открыты т.н. «звездные ассоциации» – большие группы звезд одного возраста, т.е. рождаются не только отдельные звезды, но и целые ассоциации звезд. Рождение звезд – процесс с уменьшением энтропии и никакой тепловой смерти Вселенной не будет.

### **Задания для самопроверки**

Вариант 1

1. Когда машина развивает большую силу тяги: зимой или летом?
2. Какой цикл изображен на рис. 34?
3. Найти КПД цикла (рис. 34).

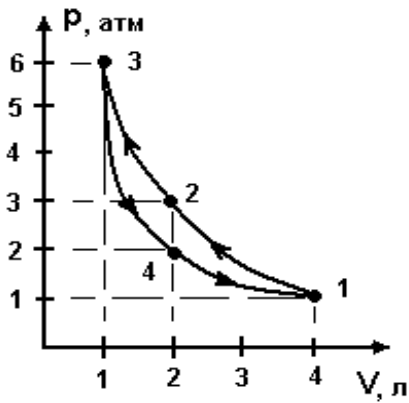


Рис. 34

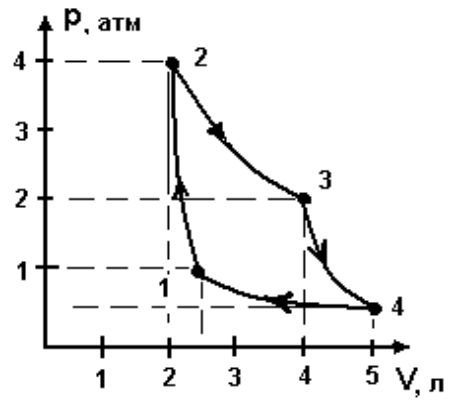


Рис. 35

4. Найти изменение энтропии при превращении в воду 1 кг льда, взятого при температуре  $-10^\circ\text{C}$ .

5. Вычислить работу за цикл (рис. 34). Рабочее тело – фреон.

Вариант 2

1. Как повысить КПД тепловой машины?

2. Какой цикл изображен на рис. 35?

3. Найти КПД цикла (рис. 35).

4. Найти изменение энтропии при переходе 8 г кислорода от объема 10 л при температуре  $80^\circ\text{C}$  к объему 40 л при температуре  $300^\circ\text{C}$ .

5. Вычислить работу за цикл (рис. 35). Рабочее тело – воздух.

Вариант 3

1. Схема работы холодильной машины.

2. Какой цикл изображен на рис. 36?

3. Определить КПД цикла (рис. 36).

4. Найти изменение энтропии при изотермическом расширении 6 г водорода от 1 атм. до 0,5 атм.

5. Вычислить работу за цикл (рис. 36).

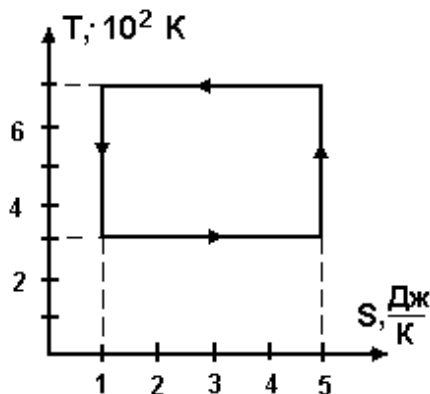


Рис. 36

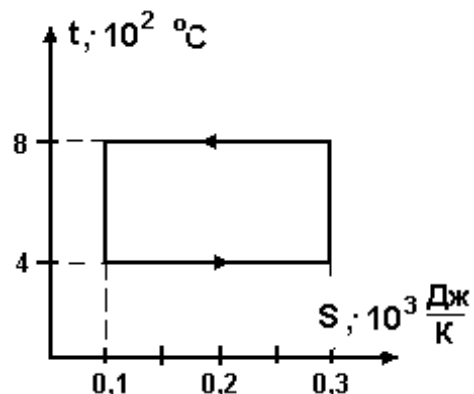


Рис. 37



#### Вариант 4

1. Схема работы тепловой машины.
2. Какой цикл изображен на рис. 37?
3. Определить КПД цикла (рис. 37).
4. Найти изменение энтропии при изобарическом пятикратном расширении 10 г гелия.
5. Вычислить работу за цикл (рис. 37).

#### Задания для самопроверки в тестовой форме

##### Вариант 1

1. На подъем груза весом 1000 кН на высоту 6 м пошло 80% всей механической работы, полученной в результате работы идеальной тепловой машины, у которой разность температур нагревателя и холодильника равна 125 К, а отношение количества теплоты, полученной от нагревателя, к его абсолютной температуре равно 300 Дж/К. Сколько циклов было совершено за время подъема груза?

- 1) 2000
- 2) 20
- 3) 700
- 4) 200

2. Идеальный газ совершает цикл Карно. Абсолютная температура нагревателя в 4 раза больше абсолютной температуры холодильника. Определите долю (в процентах) теплоты, отдаваемой холодильнику.

- 1) 4%
- 2) 2,5%
- 3) 25%
- 4) 20%

3. Рабочее тело идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, получает от нагревателя с температурой 273°C количество теплоты 80 кДж. Роль холодильника играет окружающий воздух, температура которого 0°C. На какую максимальную высоту эта машина может поднять груз массой 400 кг? (Принять  $g=10 \text{ м/с}^2$ ).

- 1) 100 м
- 2) 10 м
- 3) 135 м
- 4) 13 м

4. Найти КПД цикла (рис. 38).

- 1) 44,6%
- 2) 55,8%
- 3) 54%
- 4) 48%

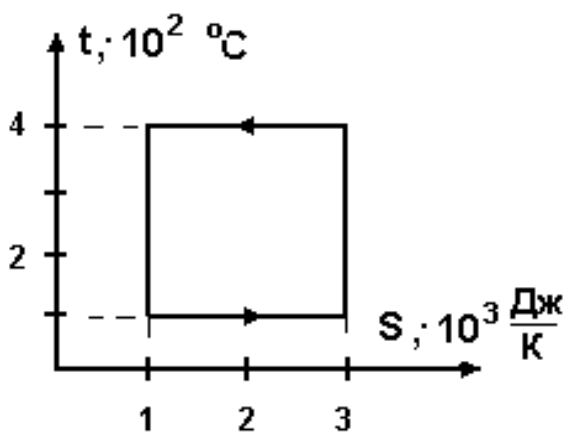


Рис. 38

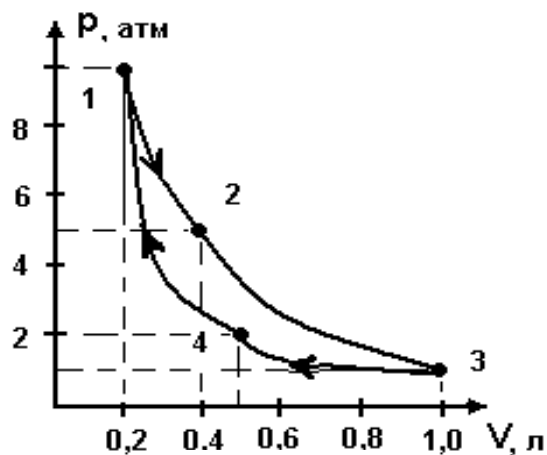


Рис. 39

5. Найти КПД цикла (рис. 39).

- 1) 45%
- 2) 50%
- 3) 52,3%
- 4) 36,8%

## Тема 4. Реальные газы

### Основные понятия и законы

#### 1. Отклонение свойств газов от законов идеального газа

Уравнение состояния идеального газа довольно точно описывает свойства газов, но лишь при не очень высоких давлениях и умеренных температурах. Наш основной газ (воздух) вплоть до давлений в 200 атмосфер ведет себя почти как идеальный газ (отклонение от закона Бойля-Мариотта всего около 5%). А при более высоких давлениях отклонения значительные. При высоких давлениях расстояния между молекулами уменьшаются настолько, что уже нельзя пренебречь силами взаимодействия между молекулами и собственным объемом молекул.

При низких температурах тоже наблюдаются отклонения. При обычных средних температурах кинетическая энергия движения молекул ( $\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2}kT$ ) намного больше потенциальной энергии их взаимодействия ( $E_n$ ),  $E_k \gg E_n$ , поэтому последней можно пренебречь. При понижении температуры  $E_k$  становится сравнимой с  $E_n$  ( $E_k \approx E_n$ ), и тогда нельзя пренебречь потенциальной энергией взаимодействия молекул (т.е. нужно учитывать силы притяжения и отталкивания).

## 2. Изотермы реального газа (Эндрюса)

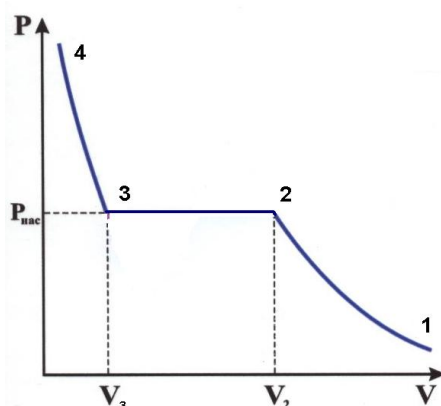


Рис. 40

Английский физик Т. Эндрюс в 1866 – 1869 гг. изучал зависимость  $p = f(V)$  (при  $T = \text{const}$ ) для углекислого газа. На рис. 40 показан вид изотермы реального газа.

1) Участок 1–2 изотермы соответствует ненасыщенному пару  $\text{CO}_2$ , подчиняющемуся закону Бойля-Мариотта.

2) В состоянии 2 при  $p = p_{\text{н.п.}}$  пар становится насыщенным ( $V_2$  – объем 1 моль насыщенного пара). Давление насыщенного пара не зависит от объема и при сжатии пар переходит в жидкость при постоянном давлении  $p_{\text{н.п.}}$ .

3) Участок 2–3 – это область одновременного существования пара и жидкости (двухфазная область).

4) В состоянии 3 весь пар превратился в жидкость ( $V_3$  – объем 1 моль жидкости).

5) Участок 3–4 – сжатие жидкости. Участок изотермы очень крутой, потому что жидкости малосжимаемы.

Далее Эндрюс расширил исследования и изучил изотермы  $\text{CO}_2$  при разных температурах. Семейства изотерм Эндрюса показаны на рис. 41.

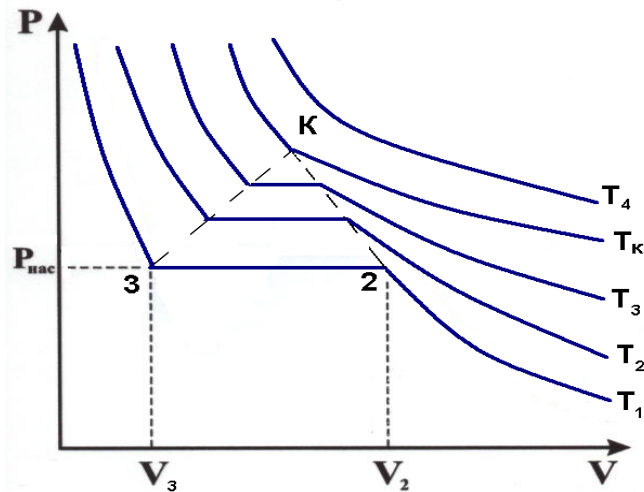


Рис. 41

Особенности: 1) С ростом температуры участок 2–3 становится короче. Давление насыщенного пара растет с температурой ( $p_{н.п.} \sim T$ ). А объем насыщенного пара с увеличением давления уменьшается, точка  $V_2$  сдвигается влево. Объем жидкости с температурой увеличивается и точка  $V_3$  сдвигается вправо.

2) При некоторой критической температуре  $T_k$  участок 2–3 исчезает, возникает точка перегиба К. Все параметры в точке К называются критическими ( $T_k, p_k, V_{ок}$ ). При критической температуре ненасыщенный пар переходит в жидкость, минуя стадию насыщения.

3) При  $T > T_k$  ни при каком давлении газ в жидкость не превращается.

Таким образом, уравнение состояния идеального газа не описывает изотерму реального газа и переход газа в жидкость.

### 3. Уравнение Ван дер Ваальса

В 1873 г. голландский физик И. Ван дер Ваальс усовершенствовал уравнение Менделеева - Клапейрона, введя в него две поправки, учитывающие силы притяжения и отталкивания и собственный объем молекул.

Для 1 моль газа

$$\left(p + \frac{a}{V_0^2}\right)(V_0 - b) = RT. \quad (4.1)$$

Здесь  $V_0$  – объем 1 моль газа,  $p_i = \frac{a}{V_0^2}$  – добавочное давление, обусловленное силами притяжения между молекулами ( $a$  – поправка, учитывающая силы притяжения). Поправка  $b$  учитывает собственный объем молекул и силы отталкивания.

Уравнение (4.1) для произвольной массы газа имеет вид

$$\left(p + v^2 \frac{a}{V^2}\right)(V - vb) = vRT. \quad (4.2)$$

Поправки  $a$  и  $b$  определяются для разных газов экспериментально и приводятся в таблицах.

$$a = \left[ \frac{H \cdot M^4}{\text{моль}^2} \right], \quad b = \left[ \frac{M^3}{\text{моль}} \right].$$

По расчетам Ван дер Ваальса, поправка  $b$  оказалась равна учетверенному собственному объему молекул. И, если объем одной молекулы  $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ , или

$$V = \frac{\pi d^3}{6}, \text{ то}$$

$$b = \frac{2}{3}\pi d^3 N_A. \quad (4.3)$$

#### 4. Исследование уравнения Ван дер Ваальса

Уравнение Ван дер Ваальса – это кубическое уравнение относительно объема. Такие уравнения имеют 3 корня: 1) все три корня вещественны, 2) один вещественный, два мнимых. Мнимые корни физического смысла не имеют. Чтобы выяснить физический смысл корней уравнения Ван дер Ваальса, сравним опытную изотерму Эндрюса с теоретической изотермой Ван дер Ваальса.

На рис. 42 приведена теоретическая изотерма Ван дер Ваальса (1,2,2',3',3,4) и опытная изотерма Эндрюса (1,2,3,4).

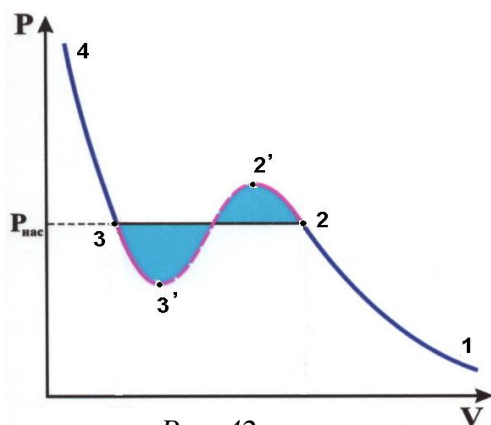


Рис. 42

Участки 1–2 (ненасыщенный пар) и 3–4 (жидкость) совпадают. Значит, уравнение Ван дер Ваальса описывает переход газ – жидкость.

Расхождения наблюдаются на участке 2–3. Но оказалось, что состояния 2–2' (пересыщенный пар) и 3–3' (перегретая жидкость) реализуются при особых условиях опыта.

*Пересыщенный пар.* При обычных условиях, когда пар достигает насыщения (т. 2), он конденсируется (переходит в жидкость – участок 2–3), если есть центры конденсации – ионы или взвешенные в воздухе частицы дыма, пыли и т.д. (Почему нужны центры конденсации, см. тему «Жидкости», вопрос «Капиллярная конденсация»).

Если в газе нет центров конденсации (например, воздух чистый), то по достижении т. 2 ( $p = p_{н.п.}$ ) конденсация не наступает и реализуется состояние 2–2'. По достижении состояния 2' наступает быстрая конденсация, давление падает до  $p_{н.п.}$  при данной температуре и дальше процесс идет по прямой до состояния 3.

Пересыщенный пар применяется в камере Вильсона (в ядерной физике) для регистрации следов элементарных частиц при ядерных реакциях (рис. 43).

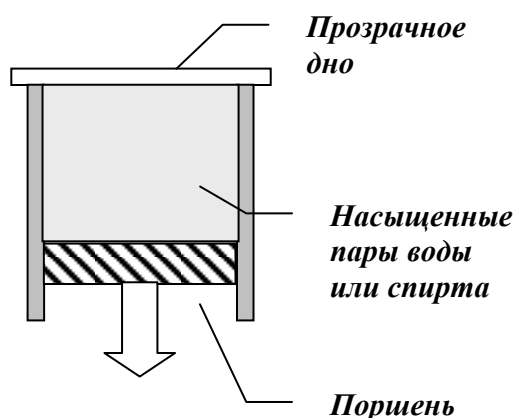


Рис. 43

Поршень резко опускают, объем увеличивается, а давление уменьшается, пар становится пересыщенным. Если в это время через камеру пролетают элементарные частицы, то они ионизируют молекулы пара, на получившихся ионах образуются капельки жидкости и след (трек) частиц становится виден, его фотографируют.

*Перегретая жидкость.* В жидкости всегда есть растворенный воздух в виде мельчайших пузырьков на дне и стенках сосуда. В пузырьках находится насыщенный пар. Если давление над жидкостью выше давления насыщенного пара  $p_{н.п.}$ , пузырьки не всплывают и не растут. При нагревании жидкости  $p_{н.п.}$  растет, и как только оно превысит внешнее давление, жидкость закипит. Таким образом, для кипения жидкости нужны зародыши пузырьков, которыми являются неровности стенок сосуда и взвешенные в жидкости инородные частицы. (Почему они нужны, см. тему «Жидкости», вопрос «давление Лапласа»).

Если нагревать чистую жидкость в сосуде с идеально гладкими стенками, то жидкость при достижении температуры кипения не будет кипеть – перегретая жидкость.

Перегретая жидкость тоже используется в ядерной физике для регистрации следов частиц (пузырьковая камера). Пузырьковой камерой является емкость с жидким водородом или пропаном. Над камерой снижают давление (откачивают воздух насосом), в результате чего реализуется состояние 3–3'. Если теперь пролетит элементарная частица, то на всем пути ее следования она будет зародышем пузырьков и жидкость вскипает вдоль траектории частицы (образуется след из пузырьков газа).

Уравнение Ван дер Ваальса позволяет теоретически рассчитать критические параметры.

$$p_k = \frac{a}{27b^2}, T_k = \frac{8a}{27Rb}, V_{0k} = 3b, V_k = \nu 3b. \quad (4.4)$$

Русские ученые М.П. Авенариус и Надеждин экспериментально измерили критические параметры для ряда веществ. А.Г. Столетов рассчитал их теоретически и показал, что результаты теории и эксперимента совпадают.

##### 5. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля-Томсона

Внутренняя энергия идеального газа является функцией только температуры  $U=f(T)$ .

$$U = \nu \frac{i}{2} RT, dU = \nu \frac{i}{2} R dT = \nu C_v dT.$$

Внутренняя энергия реального газа должна зависеть как от температуры, так и от объема  $U=f(T, V)$ . Для 1 моля газа

$$U = C_v T - \frac{a}{V_0}, dU = C_v dT + \frac{a}{V_0^2} dV_0. \quad (4.5)$$

Из (4.5) видно, что внутренняя энергия реального газа растет как с увеличением температуры, так и с увеличением объема.

Рассмотрим адиабатное расширение идеального газа без совершения работы. По первому закону термодинамики  $\delta Q = dU + \delta A$ . Т.к.  $\delta Q = \delta A = 0$ , то  $dU = 0$ . При этом условии  $dU = C_v dT = 0$  (температура не изменяется).

Для реального газа при этих же условиях получим другой результат.  $dU = 0$

$$C_v dT + \frac{a}{V_0^2} dV_0 = 0, \text{ отсюда}$$

$$\frac{a}{V_0^2} dV_0 = -C_v dT. \quad (4.6)$$

$dV$  и  $dT$  имеют разные знаки. При расширении газ охлаждается, при сжатии нагревается.

При экспериментальной проверке (4.6) выяснилось, что необходимо соблюдать особые условия: расширение надо проводить путем дросселирования от одного постоянного давления до другого (обычно  $p_{атм.}$ ). Дроссель – это устройство, представляющее сопротивление течению газа.

Изменение температуры газа при его адиабатном расширении дросселированием (без совершения работы) от одного постоянного давления до другого называется эффектом Джоуля-Томсона (Э.Д.-Т.).

При этом различают положительный Э.Д.-Т. (когда газ охлаждается согласно с (4.6)) и отрицательный Э.Д.-Т. (газ нагревается).

Температуру, при которой Э.Д.-Т. нулевой (температура не меняется), назвали точкой инверсии. Она равна  $T_{инв} = \frac{2a}{Rb}$ .

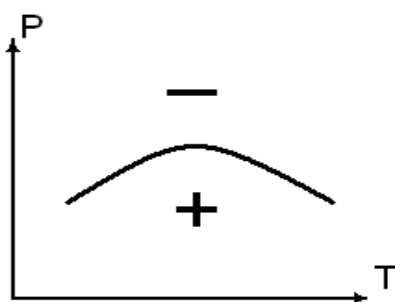


Рис. 44

Знак Э.Д.-Т., таким образом, зависит от того, какая из поправок Ван дер Ваальса ( $a$  или  $b$  преобладает).

Геометрическое место точек инверсии в координатах  $p, T$  разделяет области с разными знаками Э.Д.-Т. (см. рис. 44). При умеренных давлениях (не учитываются силы отталкивания) знак «+», при высоких давлениях «-».

## 6. Сжижение газов и получение низких температур

Из рис. 41 видно, что для того, чтобы газ перешел в жидкость, его необходимо охладить до температуры  $T < T_k$  и сжать. Так как критические температуры для многих газов очень низкие, то проблема сжижения газов сводится к проблеме получения низких температур ( $T_k(N_2) = -174$  °С,  $T_k(O_2) = -119$  °С,  $T_k(H_2) = -240$  °С,  $T_k(He) = -268$  °С).



Методы получения низких температур.

1. Метод Пиктэ. Для поддержания кипения жидкости к ней непрерывно нужно подводить тепло. Поэтому кипящие жидкости способны охлаждать (отнимать тепло) контактирующие с ними тела.

Сначала газ с  $T_k > T_{комн.}$  (например, аммиак  $NH_3$ ), сжимая, сжижают. Затем давление снижают, жидкость кипит, отнимая тепло от другого газа (т.к.  $T_{кип} \sim p$ ), пока он не охладится до своей  $T_k$ , потом его сжижают и т.д. Но этот метод не получил широкого распространения (в прошлом были холодильники на аммиаке, сейчас их практически нет).

2. Метод Дьюара-Линде (Д.-Л.) основан на положительном эффекте Джоуля-Томсона. Газ, сжатый до высокого давления и охлажденный до комнатной температуры, идет по трубе 1 в теплообменник Q (рис. 45).

В вентиле В газ адиабатически дросселируется до давления  $p \sim 1$  атм. При этом он охлаждается до температуры  $T$  (согласно формулы (4.6)). Если  $T$  недостаточна для сжижения (т.е.  $T > T_k$ ), то газ по трубе 2 возвращается в теплообменник Q, охлаждая новые порции газа. Охлаждение идет до тех пор, пока газ не станет жидким, собираясь в сосуде С. При  $\Delta p = 30$  атм  $\Delta T = 17$  К. В методе Линде газ совершает работу против внутренних сил (сил притяжения между молекулами).

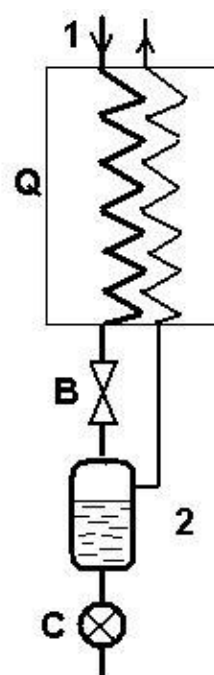


Рис. 45

3. Метод Клода. В этом методе 80% газа перед дросселированием предварительно охлаждается в детандере, совершая работу. (Адиабатное расширение газа с совершением внешней работы. Детандер – цилиндр с поршнем).  $\delta Q = 0$ ,  $pdV = -C_v dT$ .

Газ совершает работу за счет убыли внутренней энергии, следовательно, температура газа уменьшается. Метод Клода значительно эффективнее метода Линде. При тех же  $\Delta p$  перепад  $\Delta T = 150$  К.

Русский ученый П.Л. Капица усовершенствовал метод Клода, заменив поршневой детандер турбиной (турбодетандер). Турбина работает непрерывно, и весь газ проходит через турбину, при этом давление невелико (6,5 атм вместо

40 атм у Клода). Поэтому турбодетандеры Капицы являются наиболее производительными, экономичными и компактными типами холодильных установок.

### 7. Сверхнизкие температуры

Температура кипения жидкого гелия 4,21 К, чтобы получить еще более низкие температуры, заставляют гелий кипеть под пониженным давлением, откачивая пары над ним. Этим способом удалось получить температуры  $\sim 1$  К. Ниже не получить, т.к. не успевают откачивать пары гелия.

Для получения  $T < 1$  К используют адиабатное размагничивание парамагнитных солей. В этих веществах каждая молекула представляет собой маленький магнит. Без внешнего магнитного поля все они разориентированы (тепловым движением).

Во внешнем магнитном поле (рис. 46) молекулы ориентируются, при этом выделяется тепло, которое забирает жидкий гелий. При размагничивании кристаллы соли, наоборот, охлаждаются. Этим способом получают  $T \sim 0,00001$  К.

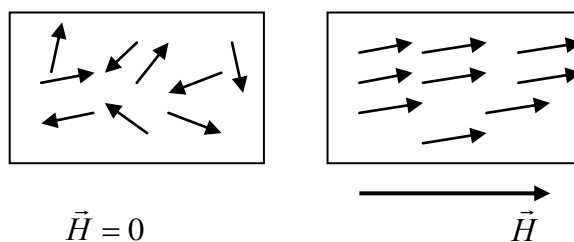


Рис. 46

### 8. Жидкий гелий. Фазовый переход II рода

Жидкий гелий по своим свойствам резко отличается от всех других жидких газов. Это самая холодная жидкость в природе. Его  $T_{кипен} = 4,21$  К. При этой температуре все другие газы существуют только в твердом состоянии (при  $p_{атм}$ ). Жидкий гелий вплоть до самых низких достижимых температур не переходит в твердое состояние. Впервые жидкий гелий был получен Г. Камерлинг-Оннесом в 1908 г. Твердый гелий был получен его учеником В. Кеезомом в 1926 г. ( $T = 1,19$  К,  $p = 23$  атм).

Одной из особенностей жидкого гелия является фазовый переход при температуре 2,19 К. Не I, существующий при  $T > 2,19$  К, переходит без выделения тепла в Не II, существующий при  $T < 2,19$  К. При этом наблюдается скачок теплоемкости (рис. 47), т.н.  $\lambda$ -точка.

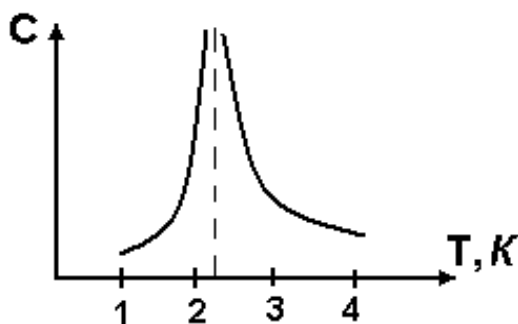


Рис. 47

Такие фазовые переходы, не связанные с поглощением или выделением тепла, и сопровождающиеся скачкообразным изменением свойств (теплоемкости, сжимаемости и др.) называются фазовыми переходами II рода. Такими являются переходы металлов в сверхпроводящее состояние, переход He I в He II.

Гелий I – бесцветная, бурно кипящая жидкость с обильным выделением пузырьков. Переход через  $\lambda$ -точку внешне сильно заметен – сразу прекращается бурное кипение и выделение пузырьков.

Самой разительной особенностью гелия II является открытое в 1938 г. академиком П.Л. Капицей явление сверхтекучести. Оно заключается в том, что жидкий He II при течении через тончайшие капилляры и щели не испытывает никакого трения (вязкость  $\approx 0$ ).

$\eta$  (He I) =  $2 \cdot 10^{-5}$  Пуаз – как у газообразного гелия,

$\eta$  (He II)  $\cong 10^{-11}$  Пуаз ( в миллион раз меньше).

Для обычной жидкости при вытекании из капилляра справедлив закон Пуазейля  $V = \frac{\pi r^4 \Delta p}{8l \eta}$ , где  $V$  – скорость течения.

Для жидкого He II скорость течения не зависит от  $r$ ,  $\Delta p$  и  $l$ , мало того, с увеличением радиуса капилляра скорость не растет, а уменьшается.

Сверхтекучесть нельзя объяснить с помощью обычных представлений о жидкостях, в которых основную роль играет тепловое движение. При температурах жидкого гелия энергия теплового движения очень мала. Таким образом, сверхтекучесть является квантовым эффектом, объяснимым только с позиций квантовой механики. Теория сверхтекучести была дана Л.Д. Ландау. И Ландау, и Капица получили за свои открытия Нобелевские премии по физике.

## 9. Фазовый переход I рода

По изотермам реального газа (рис. 40) видно, что могут существовать два различных агрегатных состояния (фазы) одного и того же вещества при одних и тех же температуре и давлении. Эти фазы в первую очередь отличаются плотностью.

Фазами системы называются граничащие друг с другом однородные части системы, находящиеся в физически различных состояниях.

Фазовое равновесие – такое состояние, при котором несколько фаз существуют одновременно и при этом масса каждой из фаз не меняется (т.е. ни одна из фаз не растет за счет другой).

Фазовый переход – переход вещества из одного состояния (фазы) в другое. Если на изотермах (рис.41) соединить точки перехода жидкости в пар и пара в жидкость, то получится такая диаграмма (рис. 48).

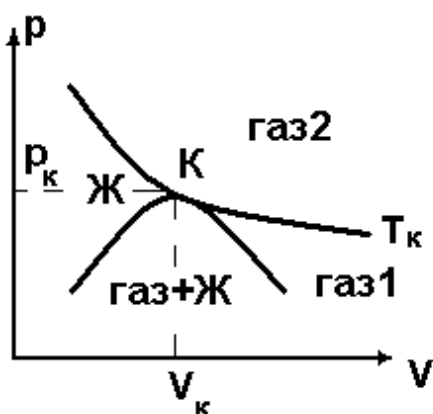


Рис. 48

Все точки под куполообразной кривой соответствуют двухфазным состояниям. Точка К – критическое состояние. Оно характеризуется критическими параметрами  $T_K$ ,  $p_K$ ,  $V_K$ . Зона «ж» – жидкое состояние, зона «газ 1» – ненасыщенный пар, который путем сжатия может быть переведен в жидкое состояние. Зона «газ 2» – ненасыщенный пар при  $T > T_K$ , который ни при каком давлении не перейдет в жидкость.

## 10. Фазовые диаграммы

При  $T < T_K$  равновесие между жидкостью и ее насыщенным паром имеет место при определенных давлениях и температурах. Причем  $p_{н.п.} \sim T$ .

Отсюда удобнее фазовое равновесие изображать в координатах  $p, T$ . Например, для воды (рис. 49).

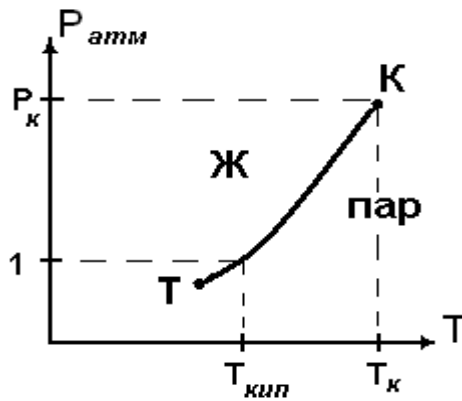


Рис. 49

Такая диаграмма называется фазовая диаграмма или диаграмма состояния. Она показывает зависимость давления насыщенного пара от температуры, или, что то же самое, зависимость температуры кипения от давления. Еще ее называют «кривая кипения». Она имеет начало в тройной точке (Т) и конец в критической точке (К).

Точки, лежащие на самой кривой, соответствуют фазовому равновесию. Здесь  $T_k = 374\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_k = 218\text{ атм}$ , при  $p = 1\text{ атм}$   $T_{кип} = 100\text{ }^\circ\text{C}$ .

#### 11. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса

Переход вещества из одной фазы в другую всегда связан с поглощением или выделением тепла, которое называют скрытой теплотой перехода. Она показывает, какую энергию надо затратить на преодоление сил притяжения между молекулами и на работу расширения  $p dV$ . При обратном переходе (при конденсации пара) эта теплота выделяется.

Уравнение, связывающее наклон кривой фазового равновесия  $\frac{dp}{dT}$  с теплотой перехода  $\lambda$ , температурой  $T$  и изменением объема ( $V_2 - V_1$ ) при переходе, называется уравнением Клапейрона-Клаузиуса.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T(V_2 - V_1)}. \quad (4.7)$$

Здесь  $\lambda \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$  – удельная теплота парообразования – количество теплоты, необходимое для превращения единицы массы жидкости в пар при температуре кипения,  $T$ ,  $V_1$  и  $V_2$  – удельные объемы жидкости и пара.

Фазовые превращения, протекающие при постоянной температуре и сопровождающиеся поглощением и выделением тепла и скачкообразным изменением объема, называются фазовыми переходами первого рода.

Замечания: 1. Если в формуле (4.7) стоит молярная теплота парообразования  $\lambda_0$ , то в знаменателе должны быть молярные объемы  $V_{01}$  и  $V_{02}$ . При этом  $\lambda_0 = \lambda M$ , где  $M$  – молярная масса.

2. Наклон кривой кипения не может быть отрицательным, т.к.  $V_2 > V_1$  (объем пара массой 1 кг всегда больше объема 1 кг жидкости).

### Задания для самопроверки

#### Вариант 1

1. Почему отклонения от законов идеальных газов наблюдаются при высоких давлениях?

2. Какой наибольший объем занимает 1 моль жидкости?

3. Может ли кривая кипения иметь отрицательный наклон и почему?

4. Как получить пересыщенный пар (пояснить) и где он применяется?

5. В закрытом цилиндре находится некоторое количество воды и насыщенный водяной пар. Как будет изменяться давление в цилиндре при изотермическом сжатии содержимого?

#### Вариант 2

1. Почему отклонения от законов идеальных газов наблюдаются при низких температурах?

2. Какой наименьший объем занимает 1 моль насыщенного пара?

3. Как получить перегретую жидкость (пояснить) и где она применяется?

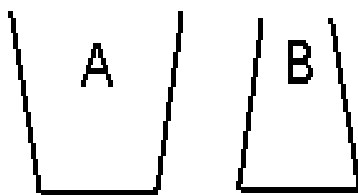


Рис. 50

4. Один литр воды налит в сосуды А и В (рис. 50), имеющие одинаковую площадь дна. В каком из этих сосудов вода закипит быстрее и почему?

5. Какое явление лежит в основе работы скороварки?

#### Вариант 3

1. Почему на высокой горе трудно сварить мясо?

2. Почему большие капли в облаках «съедают» маленькие?

3. Почему горизонтальный участок в семействе изотерм уменьшается с ростом температуры?

4. Почему при кипении температура остается постоянной, несмотря на непрерывный подвод тепла?

5. Почему для кипения жидкости нужны зародыши пузырьков? Что может выступать в качестве таких зародышей?

Вариант 4

1. Почему для конденсации пара нужны зародыши (центры конденсации), что ими служит?

2. Что учитывают поправки «а» и «b»? Укажите их размерность. Чему равна поправка «b»?

3. Чем отличается метод Линде от метода Клода?

4. Почему чайник перед закипанием «шумит»?

5. Почему кислород и азот при обычных условиях находятся в газообразном состоянии?

Вариант 5

1. Внутренняя энергия идеального и реального газа.

2. Основные идеи сжижения газов.

3. Особенности изотерм реального газа.

4. Почему дождь чаще идет в городе, чем в сельской местности?

5. Как зависит температура кипения воды от давления?

### Задания для самопроверки в тестовой форме

Вариант 1

1. В замкнутом сосуде объемом  $V = 1 \text{ м}^3$  находится вода массой  $m = 0,012 \text{ кг}$  и некоторое количество ее насыщенного пара. Плотность и давление данного пара при данной температуре равны соответственно  $\rho = 0,008 \text{ кг/м}^3$  и  $p = 1,1 \text{ кПа}$ . Какое давление установится при увеличении объема в 5 раз при неизменной температуре?

1) 0,5 кПа

2) 0,35 кПа

3) 0,55 кПа

4) 3,5 кПа

2. Закрытый сосуд объемом  $V = 0,5 \text{ м}^3$ , содержащий воду массой  $m = 0,5 \text{ кг}$ , нагрели до температуры  $T = 420 \text{ К}$ . На какую величину следует изменить объем сосуда, чтобы в нем содержались только насыщенные пары воды? Давление насыщенных паров воды при  $T = 420 \text{ К}$  равно  $p = 0,47 \text{ МПа}$ .

1)  $0,13 \text{ м}^3$

- 2)  $0,23 \text{ м}^3$
- 3)  $-0,23 \text{ м}^3$
- 4)  $-0,29 \text{ м}^3$

3. В сосуде находится воздух, относительная влажность которого при  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  равна  $\varphi = 60\%$ . Какова будет относительная влажность после уменьшения объема в  $n = 3$  раза и нагревания до температуры  $t_2 = 100^\circ$ ? Плотность насыщенных паров при температуре  $t_1$  равна  $\rho = 0,0094 \text{ кг/м}^3$ .

- 1) 29%
- 2) 38%
- 3) 3,85%
- 4) 2,9%

4. Какое количество теплоты необходимо сообщить льду, взятому при температуре  $-10^\circ\text{C}$ , массой 2 кг, чтобы его расплавить, а полученную воду нагреть до температуры  $100^\circ\text{C}$ , а затем выпарить? Удельная теплоемкость льда  $2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ , воды  $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ , удельная теплота плавления льда  $0,34 \text{ МДж/кг}$ , удельная теплота парообразования воды  $3,3 \text{ МДж/кг}$ .

- 1) 3 кДж
- 2) 45 МДж
- 3) 6 МДж
- 4) 3 Дж

5. Для приближённого определения удельной теплоты парообразования воды был проделан следующий опыт. На электроплитке нагрели воду, причём оказалось, что на нагревание её от  $t_1 = 10^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 100^\circ\text{C}$  потребовалось  $\tau_1 = 18$  мин, а для обращения  $k = 0,2$  её массы в пар  $\tau_2 = 23$  мин. Какова удельная теплота парообразования воды по данным опыта? Удельная теплоёмкость воды  $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$ .

- 1)  $2,1 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$
- 2)  $2,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$
- 3)  $3,5 \text{ Дж/кг}$
- 4)  $2,4 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$

6. Как зависит удельная теплота парообразования от температуры?

- 1) растёт с ростом температуры
- 2) уменьшается с ростом температуры
- 3) не зависит



4) у разных веществ по-разному

7. Чему равна удельная теплота парообразования при критической температуре?

1) у разных веществ различная, в зависимости от  $T_k$

2)  $\sim 2 \cdot 10^6$  Дж/кг

3) 0

4) среди ответов 1) – 3) нет правильного

## Тема 5. Молекулярные явления в жидкостях

### Основные понятия и законы

#### 1. Строение жидкостей

Жидкости имеют квазикристаллическое дырочное строение с ближним порядком расположения молекул. Молекулы в жидкостях «ведут оседло-кочевой образ жизни»: некоторое время (время «оседлой жизни») колеблются около положения равновесия и затем кочуют в ближайшее свободное место (дырку), чем и объясняется текучесть жидкости. Все свойства жидкостей определяются силами притяжения между молекулами (жидкости, в отличие от газов, не занимают весь предоставленный объем, малосжимаемы, коэффициент объемного расширения и удельная теплоемкость жидкостей мало отличается от таковых для твердых тел).

#### 2. Поверхностный слой. Поверхностное натяжение

Рассмотрим молекулу жидкости на поверхности и внутри жидкости. Окружим каждую сферой радиуса  $r \sim 10^{-9}$  м (сфера молекулярного действия) и покажем силы, действующие на молекулу со стороны других молекул (рис. 51). Результирующая сила притяжения, действующая на молекулы на поверхности со стороны других молекул направлена вниз ( $F_{поe}$ ), т.к. над жидкостью газ и там молекул в сфере мало и расстояния между ними велики.

Внутри жидкости эта сила равна нулю. В итоге поверхностный слой жидкости оказывает на нижележащие слои давление (молекулярное давление), которое

по Ван дер Вальсу равно  $p_i = \frac{a}{V_0^2}$ . Для воды это давление составляет 17 тысяч

атмосфер! Поэтому вода практически несжимаема.

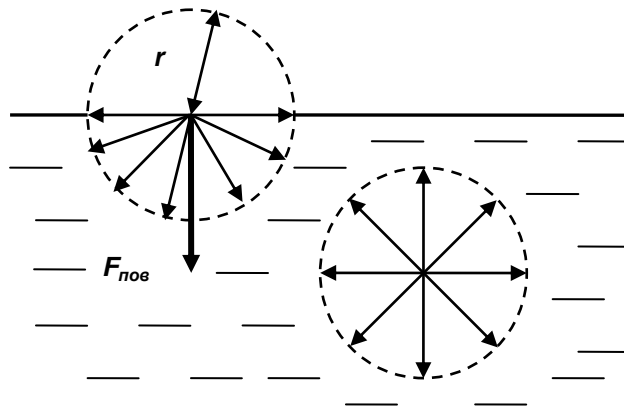


Рис. 51

Кинетическая энергия молекул на поверхности и внутри одинакова (т.к. температура одна и та же). А потенциальная энергия молекул на поверхности больше, чем внутри ( $E_n^{пов} > E_n^{вн}$ ), т.к., чтобы молекула изнутри поднялась на поверхность, ей надо совершить работу против сил молекулярного давления. А работа против внутренних сил идет на увеличение потенциальной энергии.

Согласно принципу минимума энергии всякая система устойчива в состоянии, когда ее потенциальная энергия минимальна. Поэтому жидкость принимает форму с минимальной площадью поверхности (при данном объеме). А это шар. Опыт Платó, иллюстрирующий этот факт: капля анилина в крепком растворе соли в воде имеет форму шара. В условиях Земли (из-за действия силы тяжести) – это плоскость.

Поверхностная энергия пропорциональна площади поверхности  $E = \alpha S$ , здесь  $\alpha = \frac{E}{S} \left( \frac{Дж}{м^2} \right)$  – коэффициент поверхностного натяжения (поверхностная энергия на единицу площади). Этой формуле можно придать другой вид. Рассмотрим рамку с движущейся стороной  $ab$  (длиной  $l$ ), затянутую мыльной пленкой. Под действием силы поверхностного натяжения, стремящейся сократить площадь поверхности, сторона  $ab$  переместится на  $dx$  (рис. 52). Из механики известно, что сила равна производной от потенциальной энергии по координате со знаком «минус»

$$F = -\frac{dE}{dx} = -\frac{d(\alpha dS)}{dx} = -\frac{d(\alpha l dx)}{dx} = -\alpha l, \text{ т.е.}$$

$$F = -\alpha l. \tag{5.1}$$

Знак «–» показывает, что сила поверхностного натяжения направлена внутрь поверхности (по касательной к поверхности). У мыльной пленки две поверхности, поэтому  $F = -2\alpha l$ .

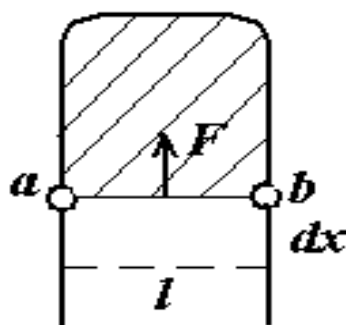


Рис. 52

Из (5.1) следует  $\alpha = \frac{F}{l} \left( \frac{H}{m} \right)$  – сила на единицу длины границы жидкости и твердого тела. Формула (5.1) используется для экспериментального определения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей.

С ростом температуры коэффициент поверхностного натяжения жидкостей уменьшается. Объяснение: при нагревании объем жидкости увеличивается, значит, увеличивается расстояние между молекулами, и силы притяжения уменьшаются.

### 3. Поверхностно-активные вещества (ПАВ)

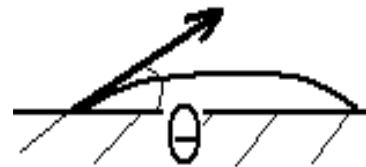
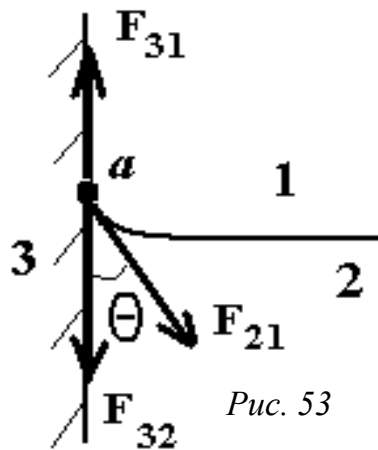
Вещества, адсорбируемые поверхностным слоем жидкости и уменьшающие тем самым ее поверхностное натяжение, называются поверхностно-активными. Жидкость – это, в основном, вода. Силы притяжения между молекулами ПАВ меньше, чем у воды, поэтому молекулы ПАВ вытесняются на поверхность. Примерами ПАВ являются мыло, стиральные порошки, шампуни и т.д., по своему химическому строению – это соли жирных кислот, общая формула которых  $\text{CH}_3\text{--R--COOH}$ . R – радикал – углеродная цепь  $\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--CH}_2\text{--}$  у разных веществ разной длины. Гидрофильная часть молекулы (COOH) притягивается молекулами воды, а гидрофобная ( $\text{CH}_3$ ) – отталкивается. По мере увеличения концентрации ПАВ в поверхностном слое воды коэффициент поверхностного натяжения уменьшается от  $\alpha$  воды до  $\alpha$  кислоты. ПАВ применяются как моющие средства, при обогащении руд полезных ископаемых (флотация), при бурении скальных горных пород.

#### 4. Смачивание. Краевой угол

Рассмотрим жидкость, налитую в сосуд (рис. 53). В точке  $a$  имеет место контакт трех сред: 1 – газ, 2 – жидкость, 3 – твердое тело.  $F_{31}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{32}$  – силы поверхностного натяжения вдоль соответствующих границ раздела сред. В равновесии имеет место равенство (вдоль вертикали):  $F_{31} = F_{32} + F_{21} \cos\Theta$ , где  $\Theta$  – краевой угол смачивания. Если взять силу, отнесенную к единице длины, то получим  $\alpha_{31} = \alpha_{32} + \alpha_{21} \cos\Theta$ . Откуда

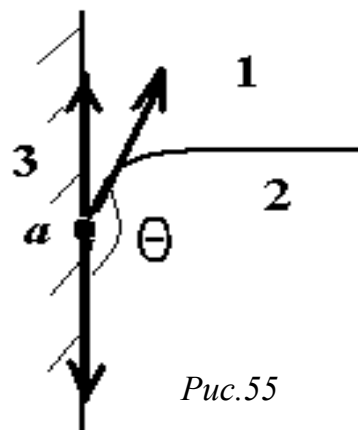
$$\cos\Theta = \frac{\alpha_{31} - \alpha_{32}}{\alpha_{21}}. \quad (5.2)$$

Краевой угол зависит только от природы соприкасающихся сред. Здесь возможны два состояния.



- 1) Если  $\alpha_{31} > \alpha_{32}$ , то  $\cos\Theta > 0$ , т.е.  $\Theta < \frac{\pi}{2}$  (угол острый).

Это смачивание. Различают полное смачивание ( $\Theta = 0$ ) и частичное ( $0 < \Theta < \frac{\pi}{2}$ ). Жидкость, смачивающая подложку, растекается по ней и капля выглядит так, как показано на рис. 54.



2) Если  $\alpha_{31} < \alpha_{32}$ , то  $\cos\Theta < 0$ , т.е.  $\Theta > \frac{\pi}{2}$  (угол тупой). (Рис. 55)

Это несмачивание. При полном несмачивании  $\Theta = \pi$ , при частичном ( $\frac{\pi}{2} < \Theta < \pi$ ). Капля жидкости, не смачивающая подложку, выглядит как на рис. 56.

Объяснение с помощью формулы (5.2) действия моющих средств, флотации и бурения горных пород выглядит так. Холодная вода без ПАВ не смачивает пятна грязи (т.к. они жирные). Нагревание воды уменьшает  $\alpha_{12}$ , а добавка ПАВ еще сильнее снижает его, и согласно (5.2)  $\cos\Theta$  увеличивается, а  $\Theta$  уменьшается – смачивание возрастает.

Флотация – это способ обогащения руд полезных ископаемых. Руда всегда содержит в себе пустую породу, от которой надо избавиться. Руду измельчают, погружают в чан с водой, добавляют ПАВ такое, которое смачивает, например, кусочки пустой породы, и они всплывают (каждый кусочек заключен в мыльный пузырек). Чтобы образовалась пена, через отверстия в дне чана продувают сжатый воздух, все содержимое «кипит» (т.н. кипящий слой). Всплывшую в пузырьках пустую породу сливают, а в чане остается руда.

При бурении скальных горных пород даже алмазные буры часто выходят из строя. Если при бурении добавить воды с ПАВ, таким, чтобы порода смачивалась, тогда вода попадает в микротрещины, расширяется и бурение в десятки раз облегчается.

### 5. Давление Лапласа

Давление в жидкости с искривленной поверхностью отличается от такового под плоской поверхностью (рис. 57). Силы поверхностного натяжения стремятся уменьшить площадь поверхности, и поскольку площадь искривленной больше, чем плоской, то возникают силы давления, направленные вниз для выпуклой поверхности и вверх для вогнутой. Это давление Лапласа  $p_L$ . Оно отрицательно, если центр кривизны лежит вне жидкости, и положительно, если центр кривизны находится внутри жидкости.

$$p_L = \frac{2\alpha}{R}. \quad (5.3)$$

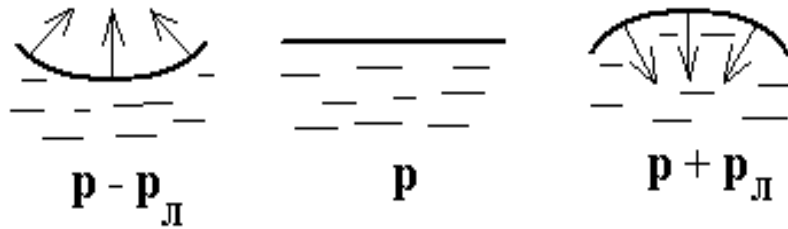


Рис. 57

Для сферы  $R$  – радиус кривизны. Если поверхность не шаровая (рис. 58), где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений, то, введя понятие средней кривизны, можно обобщить формулу Лапласа (5.3). Кривизна  $H$  – это величина, обратная радиусу.  $H = \frac{1}{R}$ . Средняя кривизна  $H_{cp} = \frac{1}{2}(H_1 + H_2)$ .

И тогда

$$p_x = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (5.4)$$

Частные случаи:

- 1) Для сферы  $R_1 = R_2$  и из (5.4) получается  $p_x = \frac{2\alpha}{R}$ .

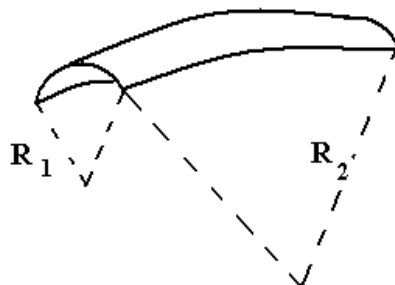


Рис. 58

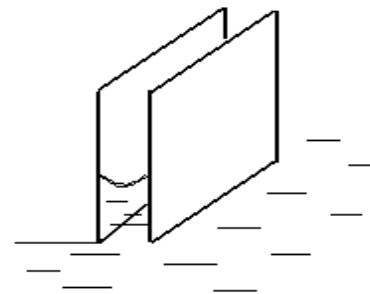


Рис. 59

- 2) Если в жидкость опущены две пластины, между которыми жидкость имеет мениск (рис. 59), то  $R_1 = R$ ,  $R_2 = \infty$  и из (5.4) имеем  $p_x = \frac{\alpha}{R}$ . При малом расстоянии  $d$  между пластинами  $R \approx \frac{d}{2}$ , тогда  $p_x = \frac{2\alpha}{d}$ .

- 3) У мыльного пузыря два поверхностных слоя, внешний выпуклый и внутренний вогнутый; в обоих случаях  $p_л$  направлено к центру пузыря и, т.к.  $R_1 \approx R_2 = R$ , то

$$p_x = \frac{4\alpha}{R}. \quad (5.5)$$

Объяснение вопроса «Почему для кипения жидкости нужны зародыши пузырьков воздуха?» Жидкость закипает, когда  $p_{н.п.} = p_{вн}$  – внешнему давлению. В пузырьке на дне сосуда  $p = p_{атм} + \rho gh + p_{л}$ . Если радиусы зарождающихся пузырьков воздуха очень малы (жидкость чистая, стенки сосуда гладкие), то давление Лапласа может быть очень большим, и оно «захлопывает» эти пузырьки и жидкость не кипит (хотя нагрета до  $T_{кип}$  – перегретая жидкость). Если в жидкости есть центры зарождения пузырьков (мелкие частицы, неровности стенок сосуда), то пузырьки будут большие, давление Лапласа в них будет меньше (им можно пренебречь) и кипение наступит, как и должно быть в соответствии с формулой  $T_{кип} \sim p_{атм}$ . По этой же причине чайник перед закипанием «шумит». Это захлопываются давлением Лапласа зарождающиеся многочисленные пузырьки воздуха.

## 6. Капиллярные явления

Под капиллярными явлениями понимают подъем или опускание жидкости в узких трубках – капиллярах – по сравнению с уровнем жидкости в широких трубках.

### 1) Капиллярное поднятие

Если капилляр, смачиваемый жидкостью, опустить в жидкость, то благодаря давлению Лапласа жидкость поднимается по капилляру на высоту  $h$  (рис.60, а). При несмачивании – наоборот (рис. 60, б).

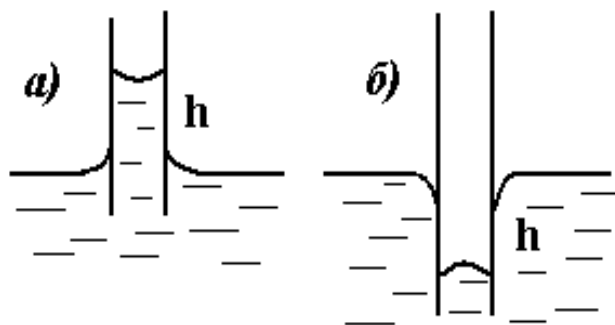


Рис. 60

$$P_{л} = P_{з/стат}$$

$$\frac{2\alpha}{R} = \rho gh; h = \frac{2\alpha}{\rho g R}; R = \frac{r}{\cos\Theta} \quad (\text{см. рис. 61}), \text{ где } R \text{ – радиус кривизны, } r \text{ – радиус капилляра. Тогда можно записать формулу Жюрена}$$

диуса капилляра. Тогда можно записать формулу Жюрена

$$h = \frac{2\alpha \cos\Theta}{\rho g r}. \quad (5.6)$$

Капиллярное поднятие имеет большое значение в природе и технике:

- влага в почве поднимается к поверхности по капиллярам. Для сохранения влаги капилляры разрушают – пашут и боронят землю;
- кровь в тонких кровеносных сосудах (капиллярах) достигает всех клеток тела благодаря капиллярности;
- вода из корней растений и деревьев поднимается вверх по капиллярам;
- применение полотенец, салфеток для вытирания мокрых мест на столе или полу возможно благодаря наличию в них капилляров;

• в строительном деле приходится учитывать подъем влаги из почвы по порам строительных материалов, приводящий к отсыреванию стен зданий. Для защиты фундамента и стен от воздействия грунтовых вод и сырости применяют гидроизоляцию, покрывая фундамент горячим (жидким) битумом или обкладывая водонепроницаемым рулонным материалом (толь или рубероид).

## 2) Капиллярная конденсация

Равновесие в системе «жидкость – насыщенный пар» зависит от температуры.  $p_{н.п.} \sim T$ . Причем это равновесие динамическое – число молекул, покидающих жидкость, равно числу молекул, возвращающихся обратно. Но для искривленной поверхности жидкости  $p_{н.п.}$  зависит от формы мениска. Над вогнутым мениском давление насыщенного пара меньше, чем над плоской поверхностью жидкости (т.к. давление газа убывает с высотой), над выпуклым – больше.

Понижение давления насыщенного пара над вогнутой поверхностью приводит к явлению капиллярной конденсации – конденсации ненасыщенного пара в пористых телах. Ненасыщенный пар, попадая в поры (там поверхность вогнутая и для нее  $p_{н.п.}$  меньше), становится насыщенным и конденсируется – в пористом теле появляется вода.

Примеры:

- в тундре земля покрыта мхом, в нем конденсируется влага из воздуха и грунт всегда сырой, отсюда и заболоченность;
- в Челябинске ветры чаще северо-западные, поэтому кирпичные стены зданий с наветренной стороны могут отсыревать. Кирпич – пористое тело, и в нем может произойти капиллярная конденсация;

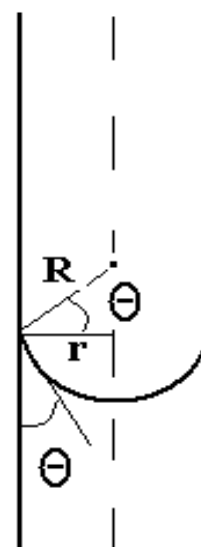


Рис. 61



- способ добычи воды в пустыне: вырыть яму ~ 70 см, накрыть ее пленкой с мелкими отверстиями в центре и насыпать на пленку бугор песка. Ночью температура снизится и в порах песка реализуется капиллярная конденсация, вода из бугра будет стекать с сосуд на дне ямы.

3) Для выпуклой поверхности  $p_{н.п.}$  будет выше, чем над плоской поверхностью. Пусть в замкнутом пространстве с жидкостью при какой-то температуре установилось равновесие (пар стал насыщенным). Рассмотрим там две капли – большую и маленькую. Для большой капли пар насыщенный, а для маленькой – нет, она испарится. Тогда для большой капли пар станет пересыщенным и часть его (равная объему малой капли) сконденсируется на большую каплю. Большая капля «съела» маленькую, не прикасаясь к ней.

Это объясняет, почему для конденсации пара нужны центры конденсации. При чистом воздухе зарождающиеся капли будут маленькими (выпуклая поверхность), для них  $p_{н.п.}$  выше и они тут же испарятся. А при наличии центров конденсации (пылинок, ионов и т.д.) зарождающиеся на них капли будут большими, они будут «поедать» мелкие капли и пойдет дождь. Поэтому в городе дожди идут чаще, чем в сельской местности.

Над аэродромами, чтобы очистить небо от туч, распыляют с небольших самолетов мелкодисперсные порошки, происходит конденсация, проливается короткий дождь, небо очищается, и большие самолеты безопасно производят посадку.

### 7. Вязкость жидкостей и ее зависимость от температуры

В газах внутреннее трение (вязкость) объясняется переносом импульса направленного движения молекул из слоя в слой за счет теплового движения молекул. Все явления переноса в газах определяются длиной свободного пробега  $\bar{\lambda}$ . И т.к.  $\bar{\lambda}$  с ростом температуры растет, то и вязкость газов с температурой растет.

В жидкостях понятие длины свободного пробега теряет смысл. Поэтому и неприменим «газовый» механизм вязкости. Вязкость жидкости связана с передачей импульса за счет ударов молекул друг с другом, как передача импульса вдоль ряда соприкасающихся упругих шаров.

Число соударений молекул обратно пропорционально свободному объему между молекулами  $V_0 - b$ . Поэтому и вязкость

$$\eta = \frac{C}{V_0 - b}. \quad (5.7)$$

Формула (5.7) представляет собой формулу А.И. Бачинского (1913 г.). Здесь  $V_0$  – молярный объем,  $b$  – поправка Ван дер Ваальса, учитывающая собственный объем молекул,  $C$  – константа, определяемая экспериментально.

Я.И. Френкель, исходя из квазикристаллического строения жидкостей показал, что

$$\eta = A \cdot e^{\frac{E_n}{kT}}, \quad (5.8)$$

где  $A$  – константа,  $E_n$  – потенциальная энергия молекулы,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. Из обеих формул следует, что вязкость жидкостей с ростом температуры уменьшается. Простое качественное объяснение: с ростом температуры объем жидкости растет, расстояние между молекулами увеличивается, значит, уменьшаются силы притяжения между молекулами, уменьшается вязкость.

### Задания для самопроверки

#### Вариант 1

1. Строение жидкостей.
2. Поверхностная энергия жидкости.
3. Почему при стирке используют горячую воду, мыло и стиральный порошок?
4. В горизонтальном стеклянном капилляре находится столбик воды. Изобразите его. Что произойдет, если правый край столбика нагреть?
5. Изобразите каплю воды на стекле и на жирной сковородке.

#### Вариант 2

1. Характер теплового движения молекул жидкости.
2. Почему жидкости малосжимаемы?
3. От чего, как и почему зависит коэффициент поверхностного натяжения жидкости?
4. На стекле находятся две одинаковые по объему капли воды, но разной температуры. Изобразите это. Поясните.
5. В двух стаканах находится ртуть, в первом горячая, во втором холодная. В стаканы опущены одинаковые стеклянные капилляры. Изобразите это. Поясните.

#### Вариант 3

1. Какую форму имеет свободная жидкость? Почему? Как ее продемонстрировать?

2. На стекле находятся две одинаковые по объему капли ртути, но разной температуры. Изобразите это. Поясните.

3. В двух стаканах находится вода, в первом горячая, во втором холодная. В стаканы опущены одинаковые стеклянные капилляры. Изобразите это. Поясните.

4. Как облегчить бурение скальных горных пород?

5. В центре открытого горизонтального стеклянного капилляра находится столбик ртути. Изобразите его. Что произойдет, если правый край столбика ртути нагреть?

Вариант 4

1. Что связывает стирку белья и краевого угол?

2. На двух концах горизонтальной трубки находятся мыльные пузыри, слева – большой, справа – маленький. Посередине трубки кран, он закрыт. Что произойдет, если кран открыть?

3. Обогащение руд полезных ископаемых методом флотации.

4. Как зависит вязкость жидкостей от температуры и почему?

5. Имеется тонкая стеклянная трубка, расширяющаяся к одному концу. В трубку вводят каплю так, что она находится посередине трубки (рис. 62). Что будет происходить с каплей? Что изменится, если вместо воды взять ртуть?



Рис. 62

### Задания для самопроверки в тестовой форме

Вариант 1

1. Давление воздуха внутри мыльного пузыря на 2 мм рт. ст. выше атмосферного. Найти радиус пузыря.  $\alpha = 0,045$  Н/м.

- 1) 0,4 мм                      2) 6,7 мм                      3)  $6,7 \cdot 10^{-4}$  м                      4) 7,8 мм

2. Вода в тонком стеклянном капилляре радиусом 1 мм поднялась на высоту 1,44 см. Считая смачивание полным, найти коэффициент поверхностного натяжения воды.

- 1)  $6,8 \cdot 10^{-2}$  Н/м                      2)  $7,2 \cdot 10^{-2}$  Н/м                      3)  $5,4 \cdot 10^{-3}$  Н/м                      4)  $4,5 \cdot 10^{-2}$  Н/м

3. Чему равно давление поверхностного слоя воды, обусловленное силами притяжения между молекулами? Поправка Ван дер Ваальса для воды равна

$$a = 5,47 \frac{\text{атм} \cdot \text{л}^2}{\text{моль}^2}.$$

- 1)  $2 \cdot 10^8$  Па      2)  $2,2 \cdot 10^4$  атм      3)  $1,7 \cdot 10^4$  атм      4)  $3,4 \cdot 10^9$  Па

4. Какую форму принимает свободная жидкость?

- 1) не имеет формы  
2) форму сосуда, в который налита  
3) сфера  
4) любую с горизонтальной поверхностью

5. Как зависит вязкость жидкостей от температуры?

- 1) прямо пропорционально  
2) не зависит  
3) обратно пропорционально  
4) у разных жидкостей по-разному

## Тема 6. Твердые тела

### Основные понятия и законы

#### 1. Строение твердых тел

Отличительной особенностью твердых тел является сохранение и упругость формы.

По своему строению твердые тела делятся на кристаллические и аморфные. Аморфные тела по структуре подобны затвердевшим жидкостям.

Кристаллические тела делятся на монокристаллы и поликристаллы.

Монокристалл – это большой одиночный кристалл. Его основное отличие – анизотропия (физические свойства по разным направлениям различны). Форма кристаллов бывает разной, но углы между ребрами и гранями постоянны для каждого типа кристаллов.

Правильная геометрическая форма кристаллов – результат упорядоченного расположения частиц в узлах так называемой кристаллической решетки (дальний порядок).

Форма кристаллов определяется родом частиц и принципом минимума поверхностной энергии.

Поликристаллы состоят из множества хаотически ориентированных мелких кристалликов. Поэтому они изотропны. Это, в основном, металлы.

Характер теплового движения частиц в твердых телах – частицы колеблются около положений равновесия (в узлах решетки) и очень редко переходят в свободные места (вакансии). Поэтому диффузия в твердых телах очень незначительная.

## 2. Классификация кристаллов по типу кристаллической решетки

а) Элементарная ячейка – минимальный объем, повторением которого можно получить весь кристалл (рис. 63). Ребра  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  и углы между гранями  $\alpha, \beta, \gamma$  – параметры элементарной ячейки. Ячейка бывает простая (P) – атомы располагаются только в узлах решетки, и сложная: объемноцентрированная (J) – еще один атом в центре ячейки, гранецентрированная (F) – на гранях, и базоцентрированная (C) – на верхней и нижней гранях.

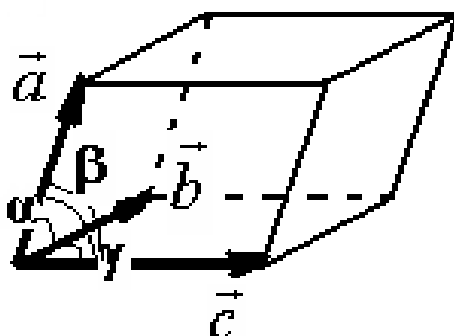


Рис. 63

б) Симметрия – свойство структуры совпадать с самой собой при различных пространственных перемещениях. Виды симметрии: 1) трансляционная – совпадение достигается перемещением на величину периода решетки ( $a, b, c$ ); 2) ось симметрии n-ого порядка – совпадение при повороте вокруг оси на угол  $\varphi = \frac{2\pi}{n}$ ,  $n = 1, 2, 3, 4, 6$  (оси симметрии 5-го порядка нет, т.к. нельзя плотно заполнить плоскость пятиугольниками – будут дыры. Поэтому Дж. Барнал предположил, что осью симметрии 5-го порядка обладают жидкости); 3) плоскость симметрии – одна часть структуры совпадает с другой как отражение в зеркале; 4) центр симметрии – в любом направлении, если на расстоянии  $\vec{r}$  от какого-либо атома имеется другой атом, то и на  $-\vec{r}$  тоже.

в) Основные кристаллические системы

По форме ячейки и по ее заполнению все кристаллы делятся на 7 кристаллографических систем (сингоний), представляемых 14 решетками (решетки Бравэ).

Таблица 2

№	Система	Параметры элементарной ячейки	Число решеток	Решетка
1.	Триклинная	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$	1	P
2.	Моноклинная	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	2	P, C
3.	Ромбическая	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	4	P, J, F, C
4.	Тетрагональная	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	2	P, J
5.	Тригональная (ромбоэдрическая)	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	1	P
6.	Гексагональная	$a = b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta = 120^\circ$	1	P
7.	Кубическая	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	3	P, J, F,

г) Выбор элементарной ячейки (симметрия ячейки должна быть не ниже симметрии структуры в целом).

д) Определение числа атомов, входящих в ячейку, можно сделать двумя способами: 1) сдвиг по диагонали; 2) расчет.

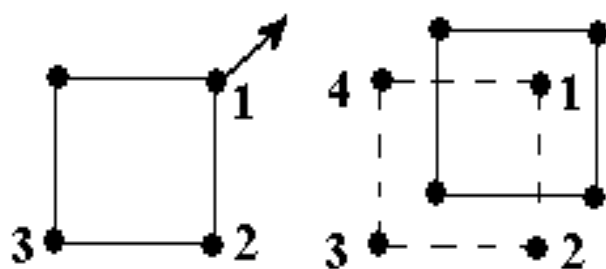


Рис. 64

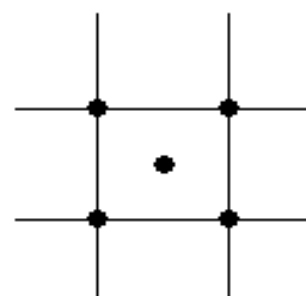


Рис. 65

Например: 1) найти число атомов в простой плоской квадратной ячейке методом сдвига (рис. 64). Если ячейку сдвинуть по диагонали в направлении стрелки, то атом 1 войдет в ячейку, а атомы 2, 3, 4 – выйдут. Значит, ячейка содержит один атом.  $N = 1$ .

2) найти число атомов в центрированной плоской квадратной ячейке методом расчета (рис. 65).

$N = 1 + 4 \cdot \frac{1}{4} = 2$ . Здесь первое слагаемое – 1 атом в центре, второе слагаемое – 4 атома в узлах, но т.к. каждый из них входит в 4 ячейки, то вклад в одну из них равен  $\frac{1}{4}$ .

е) Полиморфизм – одно и то же вещество (вид атомов) может иметь разные кристаллические решетки. Примеры: 1. Алмаз (кубическая) и графит (гексагональная). 2. Белое олово (тетрагональная) – мягкий пластический материал, им паяют, и серое олово (кубическая) – серый порошок.

ж) Вычисление периода решетки поваренной соли NaCl. Невооруженным глазом видно, что решетка кубическая. Если  $z$  – число ячеек в 1 моль, то объем

1 моль можно записать двумя способами  $V = \frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A \cdot a^3}{z}$ , отсюда  $a = \sqrt[3]{\frac{z \cdot \mu}{\rho \cdot N_A}}$ . Для NaCl  $z = 4$ , и  $a = 5,64 \cdot 10^{-10}$  м.

### 3. Классификация кристаллов по роду частиц и по характеру сил взаимодействия (или по типам связи)

3.1 Ионные кристаллы. В узлах «+» и «-» ионы, связь ионная, решетка гетерополярная, силы связи – электростатические (по закону Кулона). Связь прочная, и она тем прочнее, чем выше заряд ионов (например, у NaCl  $T_{пл.} = 800^\circ\text{C}$ , а у CaO  $T_{пл.} = 2570^\circ\text{C}$ ). Не проводят электрический ток, в растворах и расплавах – проводят (носители тока – ионы).

3.2 Атомные кристаллы. В узлах нейтральные атомы. Связь ковалентная (осуществляется парой электронов), прочная, решетка гомополярная. Примеры: алмаз, германий. Не проводят ток даже в расплавах.

3.3 Металлы. В узлах положительные ионы, валентные электроны обобществлены и образуют электронный газ, который может перемещаться внутри кристаллов. Высокая электро- и теплопроводность и металлический блеск объясняются свойствами электронного газа. Связь – металлическая, обусловлена коллективным взаимодействием всех ионов и электронов, прочная. Большинство металлов – поликристаллы – состоят из многочисленных хаотично ориентированных кристаллов, поэтому изотропны.

3.4 Молекулярные кристаллы. В узлах нейтральные молекулы. Связь силами Ван дер Ваальса, слабая, поэтому у них низкая  $T_{пл.}$ , большая сжимаемость и коэффициент объемного расширения. Примеры: сухой лед (в узлах  $\text{CO}_2$ ), лед ( $\text{H}_2\text{O}$ ), парафин.

3.5 Жидкие кристаллы. Это органические жидкости с очень большими молекулами, либо в форме нитей, либо в форме блинов. Молекулы обладают хаотичностью перемещения (и это объясняет текучесть), но не обладают хаотичностью вращения (поэтому анизотропия). Свойства жидких кристаллов уникальны тем, что сильно зависят от внешних условий (температуры, давления, освещенности и т.д.). На этом и основано их применение в качестве датчиков, индикаторов (в экранах телевизоров, компьютеров, калькуляторов, мобильных телефонов и т.п.).

#### 4. Несовершенства (дефекты) структуры кристаллов

1) Точечные дефекты: а) тепловые колебания, б) внедрение своих атомов в междоузлия, в) внедрение чужеродных атомов в узлы и междоузлия, г) вакансии – отсутствие атома в узле.

2) Линейные дефекты (дислокации) – геометрические искажения решетки. а) простая (краевая) – лишняя плоскость, или плоскость не до конца, б) винтовая – часть кристалла сдвинута на один период.

3) Блочная структура. Кристалл состоит из блоков, внутри которых сохраняется дальний порядок, а по границам блоков – всевозможные дефекты. К блочной структуре приводит движение дислокаций при деформациях.

#### 5. Связь структуры кристаллов с физическими свойствами. Влияние дефектов на физические свойства

Все физические свойства кристаллов определяются их структурой и ее дефектами.

Примеры: 1) графит – черный, мягкий (твердость = 1), непрозрачный; алмаз – прозрачный, самый твердый (10).

2) Германий – диэлектрик. А если в него ввести 1 атом бора (В) на миллион атомов германия, – получим полупроводник *p*-типа (носители положительные «дырки»), а если фосфора (Р) – полупроводник *n*-типа (носители электроны).

3) Диффузия в идеальных кристаллах очень мала. Если в кристалле много дефектов – скорость диффузии резко увеличивается. Диффузия сводится к движению дефектов.

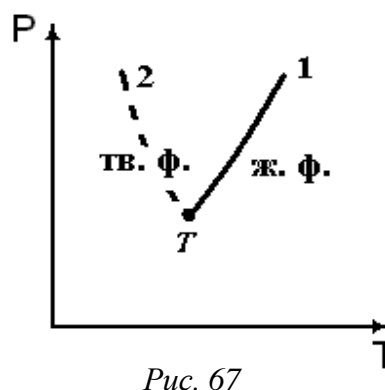
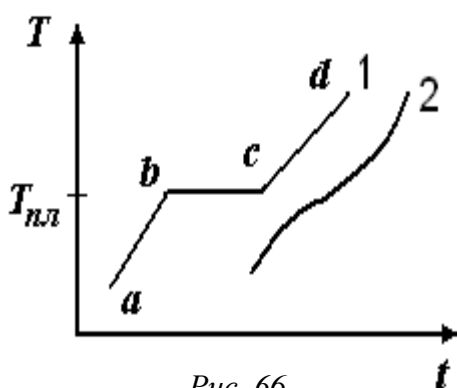
4) Пластическая деформация кристаллов связана с движением дислокаций (наблюдается сдвиг блоков). При этом сдвиговые усилия уменьшаются в сотни раз, и наблюдается явление наклепа – упрочнения материала при многократной пластической деформации (ковка – отбивка косы, прокат – когда из толстого бруса металла прокатывают тонкий лист, он значительно упрочняется). Причина



упрочнения: при пластической деформации дефекты выходят на поверхность и при этом внутренняя структура становится более совершенной.

## 6. Плавнение и кристаллизация

При нагревании твердые тела плавятся. Кривые нагрева  $T = f(t)$  для кристаллических (1) и аморфных (2) тел отличаются (рис. 66). Участок  $ab$  – нагревание твердого тела,  $bc$  – плавление, на этом участке все подводимое тепло (удельная теплота плавления  $L\left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right)$ ) идет на разрушение кристаллической решетки (на разрыв связей), поэтому  $T_{\text{пл.}} = \text{const}$ , участок  $cd$  – нагрев жидкой фазы.



При охлаждении процесс идет в обратном направлении и при  $T_{\text{пл.}} = T_{\text{кр.}}$  идет процесс кристаллизации, при котором  $L$  выделяется. Поэтому около замерзающего водоема теплее.

Это типичный фазовый переход 1-го рода, подчиняющийся уравнению Клапейрона-Клаузиуса:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}. \quad (6.1)$$

Здесь  $L$  – удельная теплота плавления,  $T$  – температура плавления,  $V_2$  и  $V_1$  – удельные объемы ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) жидкой и твердой фаз.  $\frac{dp}{dT}$  – наклон кривой плавления на диаграмме состояния (фазовой диаграмме) (рис. 67, кривая 1). Кривая 1 означает, что для большинства веществ  $T_{\text{пл.}} \sim p$ .

Для некоторых веществ (аномальных – вода, чугун)  $V_1 > V_2$  и кривая плавления для них имеет отрицательный наклон (т.е.  $T_{\text{пл.}} \sim \frac{1}{p}$ ) (рис. 67, кривая 2). Эта аномалия для воды имеет огромное значение. Благодаря этой аномалии существ-

вует жизнь на Земле. Если бы у воды  $T_{пл.} \sim p$ , то водоемы замерзали бы до дна, живности в океане бы не было, и вообще Земля была бы ледяным шаром.

Для начала кристаллизации необходимы центры кристаллизации, которыми являются инородные примеси и флуктуации плотности. И, т.к. их много, то получается поликристалл. Чтобы получить монокристалл, необходимо в расплав ввести специальную затравку и поддерживать определенные температуру и давление. Выращивание кристаллов – целая наука.

## 7. Сублимация

Сублимация – это переход твердой фазы в газообразную. Примеры: 1) лед испаряется (мокрое белье на морозе сначала замерзает, а потом лед испаряется и белье становится сухим); 2) графит при  $4000^\circ\text{C}$  переходит в газообразное состояние; 3) сухой лед ( $\text{CO}_2$ ) при  $-50^\circ\text{C}$  испаряется.

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса для сублимации имеет вид:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T(V_2 - V_1)}. \quad (6.2)$$

Здесь  $r$  – удельная теплота сублимации (Дж/кг),  $V_2$  и  $V_1$  – удельные объемы газообразной и твердой фазы, и, т.к.  $(V_2 - V_1)$  велико, то наклон кривой сублимации мал. (рис.68)

Т.к.  $r$  характеризует переход твердой фазы в газообразную,  $L$  – твердой в жидкую, а  $\lambda$  – жидкой в газообразную, то

$$r = L + \lambda \quad (6.3)$$

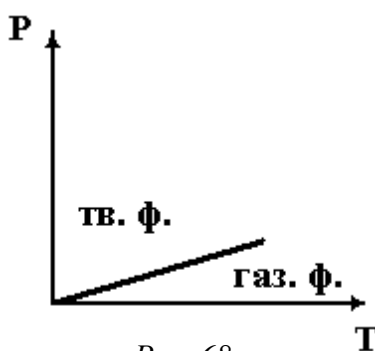


Рис. 68

## 8. Тройная точка. Полиморфизм

Если на одной диаграмме изобразить кривые сублимации, плавления и кипения, то из-за их разного наклона они пересекутся в так называемой тройной точке  $T$  (рис.69). Тройная точка – это точка пересечения линий фазового равновесия, характеризуемая  $T_m$  и  $p_m$ , при которых все три фазы находятся в равновесии.

Рис. 69 – это фазовая диаграмма или диаграмма состояния вещества. Она определяет область температур и давлений, при которых устойчивой является та или иная фаза. Значение такой диаграммы для каждого вещества имеет большое значение. Примеры:

1) Для сухого льда ( $\text{CO}_2$ )  $p_m = 5 \text{ атм.}$ ,  $T_m = -57^\circ\text{C}$ . Поэтому при обычном атмосферном давлении он сублимирует. А в жидкое состояние его можно перевести только при  $p > 5 \text{ атм.}$

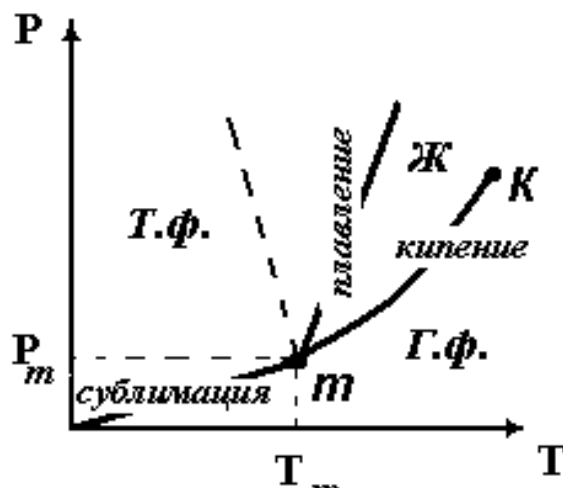


Рис. 69

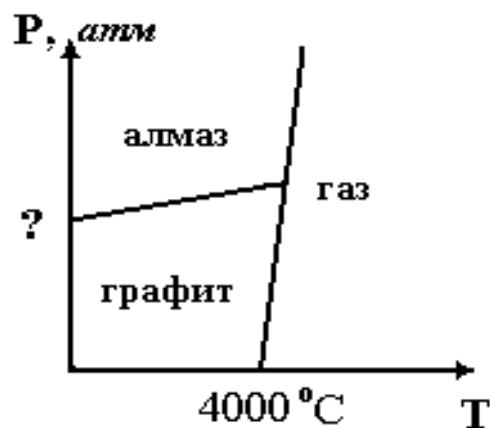


Рис. 70

2) Более сотни лет среди ученых шла т.н. алмазная лихорадка – попытки превратить графит в алмаз. Но эти попытки не имели успеха, т.к. диаграмма состояния углерода была неизвестна. Было известно следующее: при  $4000^\circ\text{C}$  графит сублимирует, при низких давлениях устойчив графит, а при высоких – алмаз (природные алмазы образовались в жерлах потухших вулканов при высоких  $T$  и  $p$ ). Чтобы получить искусственные алмазы, надо было знать цифру (вместо ? на рис. 70).

В 1939 г. наш академик А.И. Лейпунский теоретически рассчитал эту величину, и сразу же во всем мире был налажен синтез искусственных алмазов.

Полиморфизм – это существование одного и того же вещества с разной кристаллической структурой (а значит, и свойствами).

Примеры: 1) Графит и алмаз; 2) Белое и серое олово; 3)  $\alpha$  – Fe и  $\gamma$  – Fe.  $\alpha$  (ОЦК-2 – объемноцентрированная кубическая решетка с 2 атомами в ячейке) – мягкое железо.  $\gamma$  (ГЦК-4) – твердое железо.  $\alpha \xrightarrow{910^\circ\text{C}} \gamma$ . На этом основано упрочнение железа методом закали. Железо нагревают выше  $910^\circ\text{C}$ ,  $\alpha \rightarrow \gamma$ , а затем резко охлаждают, при этом структура  $\gamma$  не успевает перестроиться в  $\alpha$ , и железо

остаётся твердым при обычных температурах. 4) Лед имеет 8 разных структур. Например, лед-V существует при  $p = 6000$  атм.,  $T = 80^\circ\text{C}$  (горячий лед), тяжелее воды. Лед-VIII – имеет твердость, близкую к алмазной. Он может образоваться в подшипниках валов гидротурбин больших гидроэлектростанций при очень высоких давлениях, если в смазку попадет вода. Валы и подшипники разрушаются, и возможны аварии.

## 9. Тепловые свойства твердых тел

### 1) Тепловое расширение

Объем и линейные размеры твердых тел при нагревании растут пропорционально температуре

$$l = l_0 (1 + \alpha \Delta t) \quad (6.4)$$

$$V = V_0 (1 + \beta \Delta t) \quad (6.5)$$

Здесь  $l_0$  и  $V_0$  – длина и объем тела при  $0^\circ\text{C}$ .  $\alpha = \frac{1}{l} \frac{\Delta l}{\Delta t}$  и  $\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta t}$  – коэффициенты линейного и объемного расширения, численно равные отношению изменению длины и объема при нагревании на 1 градус.

$$\alpha \approx 10^{-5} - 10^{-6} \frac{1}{\text{K}}, \quad \beta = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3, \quad \text{где } \alpha_i - \text{коэффициенты линейного расширения по соответствующим осям. Для кубической структуры } \beta \approx 3\alpha.$$

Причина теплового расширения – агармоничность колебаний атомов в твердом теле, которая объясняется различной зависимостью сил притяжения и отталкивания от расстояния между атомами  $F_{\text{прит}} \sim \frac{1}{r^7}$ ,  $F_{\text{отт}} \sim \frac{1}{r^9}$ .

Качественно: с ростом температуры амплитуда колебаний атомов возрастает и при этом силы отталкивания нарастают быстрее сил притяжения. Значит, при более высокой температуре расстояние между атомами увеличивается.

Количественно: 1) расстояние между атомами  $r = r_0 + \bar{x}$ . Если колебания гармонические, то  $F = -ax$ ,  $|\bar{x}| = \frac{\bar{F}}{a}$ ,  $\bar{F} = 0$ ,  $\bar{x} = 0$ , т.е. расширения нет. ( $\bar{x}$  – увеличение расстояния при нагревании).

2) Если колебания негармонические, то  $\bar{F} = -a\bar{x} + b\bar{x}^2 = 0$ , и  $\bar{x} = \frac{b}{a}\bar{x}^2$ ,

$\frac{a\bar{x}^2}{2} = kT$ ,  $\bar{x}^2 = \frac{2kT}{a}$ ,  $\bar{x} = \frac{2bk}{a^2}T = AT$ , и тогда  $r = r_0 + AT$  – расстояние между атомами линейно зависит от температуры, что и отражают формулы (6.4) и (6.5).

Учет теплового расширения в технике: 1) рельсы укладывают с зазором; 2) провода электролиний укрепляют с провисом и т.д.

## 2) Теплоемкость твердых тел

Теплоемкость – это  $\frac{dQ}{dT}$ ,  $dQ = dU + pdV$ .

Т.к. изменения объема твердых тел невелики, вторым слагаемым можно пренебречь, и тогда для молярной теплоемкости можно записать

$$C = \frac{dQ}{\nu \cdot dT} \left( \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right).$$

Измерения теплоемкости многих твердых тел близки к 25 Дж/(моль·К). На основании этих опытов французские ученые П. Дюлонг и А. Пти постулировали: «Теплоемкость твердых тел равна 25 Дж/(моль·К)». Это утверждение стали называть законом Дюлонга и Пти. И классическая теория теплоемкости твердых тел объяснила этот факт. Внутренняя энергия 1 моль твердого тела может быть записана  $U = 3N_A \cdot \bar{E}$ . 3 – число колебательных степеней свободы,  $\bar{E}$  – средняя энергия, приходящаяся на 1 степень свободы колебательного движения ( $kT$ ). Тогда

$$U = 3N_A \cdot kT = 3RT; \quad C = \frac{dU}{dT} = 3R \approx 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

Казалось бы, все хорошо, но опыты при низких температурах показали, что это не так. (рис. 71)

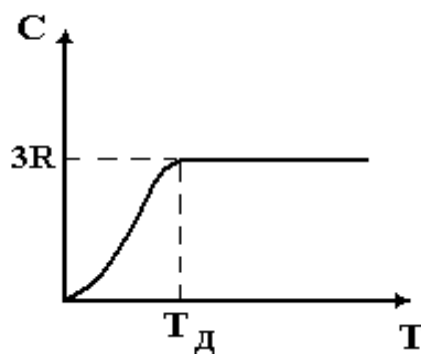


Рис. 71

При  $T > T_D$  выполняется закон Дюлонга и Пти, а при  $T < T_D$  – нет. В этой области необходимо учитывать квантовые законы. Квантовую теорию теплоемкости разработали А. Эйнштейн (1905 г.) и П. Дебай (1916 г.), поэтому  $T_D$  – температура Дебая. Все дело в энергии осциллятора  $\bar{E}$ . В классической теории  $\bar{E} = kT$  и  $C = 3R$ . А в квантовой теории энергия осциллятора (колеблющегося атома) определяется формулой, которую предложил М. Планк (1900 г.):

$$\bar{E} = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (6.6)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $\nu \approx 10^{-13} \frac{1}{c}$ , и  $h\nu \sim 10^{-20}$  Дж  $\approx kT$  (при  $T = 300$  К).

Из формулы Планка вытекает закон Дюлонга и Пти при высоких температурах. (Принцип преемственности: всякая новая теория содержит старую как частный случай, указывая тем самым границы ее применимости). При высоких температурах  $kT \gg h\nu$ ,  $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$  ( $e^x \approx 1 + x$  при  $x \ll 1$ ). Из (6.6)  $\bar{E} = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{kT} - 1} = kT \rightarrow$

закон Дюлонга-Пти. При низких температурах большинство атомов совершают т.н. нулевые колебания  $\frac{h\nu}{2}$  и, т.к.  $h\nu \gg kT$ , то нагрев не меняет внутреннюю энергию и  $C \rightarrow 0$  при  $T \rightarrow 0$ , как и должно быть по 3-му закону термодинамики.

### Задания для самопроверки

#### Вариант 1

1. Кривая нагрева  $T = f(t)$  кристаллических и аморфных тел.
2. Число атомов в объемноцентрированной кубической ячейке.
3. У каких веществ кривая плавления на диаграмме состояний имеет отрицательный наклон и какое это имеет значение?
4. Строение и свойства атомных кристаллов.
5. Какова причина теплового расширения твердых тел?

#### Вариант 2

1. Связь удельных теплот сублимации, кипения и плавления.
2. Строение и свойства жидких кристаллов.
3. Почему при плавлении и кристаллизации температура тела остается постоянной?
4. Что такое температура Дебая?
5. Когда вероятность разрыва телеграфных проводов выше: зимой или летом?

#### Вариант 3

1. У какого кристалла ( $\text{NaCl}$  или  $\text{CaSO}_4$ ) температура плавления выше? Объясните, почему?
2. Строение и свойства кристаллов с металлической связью.

3. Какая из кривых кипения, плавления или сублимации имеет наибольший наклон и почему?

4. Почему вода в глубине Северного Ледовитого океана не замерзнет, хотя температура там ниже нуля?

5. Строение и свойства молекулярных кристаллов.

Вариант 4

1. Число атомов в простой кубической ячейке.

2. Строение и свойства ионных кристаллов.

3. Привести примеры учета теплового расширения твердых тел в технике.

4. Почему сухой лед ( $\text{CO}_2$ ) при обычных условиях сублимирует? ( $p_T = 5$  атм.)

Как из сухого льда получить жидкую углекислоту?

5. Что происходит при прокатке стального бруса в лист и при отбивке косы?

## Тема 7. Газодинамика

### Основные понятия и законы

#### 1. Основные понятия

Газодинамика – раздел физики, изучающий движение газов с учетом их сжатия и теплообмена. Это синтез аэродинамики и термодинамики. Выводы газодинамики применяются в скоростной авиации, реактивной технике, при проектировании паровых и газовых турбин.

Газодинамика тесно связана с гидродинамикой, у них одни и те же законы. В гидродинамике изучают два круга вопросов: движение жидкости по трубе и движение тел в потоке жидкости. Т.к. движение относительно, то выбор системы отсчета (тело или жидкость) не имеет значения. Чаще считают тело покоящимся и говорят «на тело набегает поток».

Таким образом, газодинамика – это гидродинамика сжимающейся жидкости, т.е. газа.

Основные параметры, характеризующие движение газа, – давление  $p$ , плотность  $\rho$ , температура  $T$  и скорость  $v$ . Если параметры не меняются с течением времени в любом сечении трубы, то такое движение называют стационарным или установившимся.

#### 2. Основные уравнения газодинамики

Эти уравнения отражают законы сохранения массы, импульса и энергии.

1) Уравнение неразрывности (закон сохранения массы)

Расходом называют массу газа  $dm$ , протекающего через поперечное сечение трубы за единицу времени.

$$G = \frac{dm}{dt}; \quad dm = \rho S v dt, \quad \text{тогда } G = \rho S v.$$

При стационарном течении расход газа в любом сечении трубы постоянен. (Это следует из закона сохранения массы и условия стационарности)

$$\rho S v = \text{const} \quad \text{или} \quad \rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2. \quad (7.1)$$

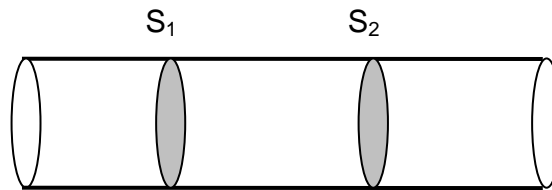


Рис. 72

Доказательство: пусть в трубе (рис. 72)  $G_1 > G_2$ . Это значит, что через сечение  $S_1$  за единицу времени проходит газа больше, чем через сечение  $S_2$ . Значит, между  $S_1$  и  $S_2$  газ скапливается, т.е. повышаются  $\rho$  и  $p$ , т.е. нарушается условие стационарности.

2) Уравнение импульса (закон сохранения импульса)

По 2-му закону Ньютона  $F = \frac{d(mv)}{dt}$ . Учитывая постоянство скорости в данном сечении, можно записать:

$$F_1 - F_2 = \frac{dmv_2 - dmv_1}{dt}, \quad \text{где } F_1 = p_1 S_1, \quad F_2 = p_2 S_2 - \text{силы давления в сечениях}$$

$S_1$  и  $S_2$ , учитывая, что  $\frac{dm}{dt} = \rho S v$ , а также (7.1), получим

$$p_1 S_1 - p_2 S_2 = \rho_2 S_2 v_2^2 - \rho_1 S_1 v_1^2, \quad \text{или} \\ S_1 \left( p_1 + \rho_1 v_1^2 \right) = S_2 \left( p_2 + \rho_2 v_2^2 \right). \quad (7.2)$$

Полученное уравнение называют уравнением импульса для потока идеальной сжимаемой жидкости (т.е. газа).

3) Уравнение энергии (Бернулли) (закон сохранения энергии)

Рассмотрим поток газа по трубе АВ (рис. 73). С – техническое устройство, преобразующее энергию потока в работу (турбина) или сообщаемое потоку энергию за счет работы, подводимой извне (компрессор).



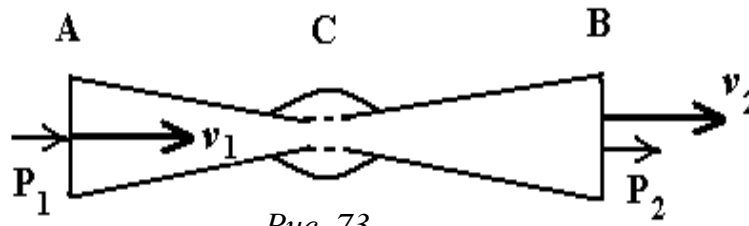


Рис. 73

По 1-му закону термодинамики количество тепла, подведенного к данной массе газа ( $Gdt$ ), равно полной энергии.

$$Q = \Delta U + \Delta E + A_p + A_{\text{техн}} + A_{\text{тр}}, \text{ где } \Delta U = U_2 - U_1, \Delta E = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}, A_p = p_2V_2 - p_1V_1.$$

Величина  $U + pV = H$  называется энтальпия (или теплосодержание), тогда можно записать

$$Q = H_2 - H_1 + \Delta E + A_{\text{техн}} + A_{\text{тр}}. \quad (7.3)$$

Это основное уравнение газодинамики. Из него следует, что главную роль в термодинамической характеристике газового потока играет энтальпия газа. Она определяет работоспособность газа.

Обычно течение в газах происходит адиабатно, т.е.  $Q = 0$ , и, кроме того  $\Delta E$  отработанных газов можно пренебречь, тогда мы имеем (при  $A_{\text{тр}} = 0$ ), что  $A_{\text{техн}} = -\Delta H = H_{\text{нач}} - H_{\text{выхл}}$ , т.е. работа определяется убылью энтальпии.

И т.к.  $dH = d(U + pV) = dU + pdV + Vdp$ , учитывая, что  $dU + pdV = dQ = 0$ , получаем, что  $dH = Vdp$ , можно записать:

$$A_{\text{техн}} = - \int_1^2 Vdp. \quad (7.4)$$

Учитывая геометрический смысл работы, можно отметить, что  $A_{\text{техн}}$  можно определить как площадь под графиком адиабаты. (рис. 74)

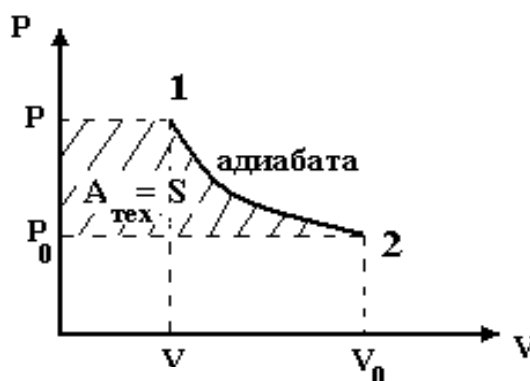


Рис. 74

### 3. Адиабатное течение газа

Рассмотрим адиабатное течение газа по трубе без производства работы ( $Q = 0$ ,  $A_{\text{техн}} = 0$ ,  $A_{\text{мп}} = 0$ ). Тогда получается термодинамическое обобщение уравнения Бернулли

$$H_1 + \frac{mv_1^2}{2} = H_2 + \frac{mv_2^2}{2}. \quad (7.5)$$

Различают течение с расширением ( $v \uparrow$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $T \downarrow$ ) и течение со сжатием ( $v \downarrow$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $T \uparrow$ ).

#### 1) Течение с расширением

Примеры: 1) сопло реактивного самолета обледеневаает, 2) зимой в карбюраторе ДВС (если идет забор холодного воздуха) в диффузоре конденсируется вода и двигатель глохнет. Вывод: воздух, идущий в карбюратор, необходимо подогреть.

Для единицы массы из уравнения (7.5) имеем, учитывая, что  $U = C_V T$  и  $pV = RT$ ,

$$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + H_1 - H_2 \approx C_p (T_1 - T_2). \quad (7.6)$$

По уравнению Пуассона

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\gamma-1}.$$

Выполним подстановку в (7.6), получим

$$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) + C_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = C_p T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right].$$

Пусть газ вытекает из большого баллона с давлением  $p_1$  и температурой  $T_1$  через сечение  $S_1$ , испытывая противодействие окружающей среды  $p_0$ . Так как  $S_1$  (баллон)  $>$   $S_2$  (отверстие), то  $v_1 = 0$ , тогда скорость истечения газа из баллона определяется формулой

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\gamma RT_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right]} \quad (*) \quad C_p = \frac{\gamma R}{\gamma-1}$$

Расход  $G = \rho_2 S v_2$ . Расход будет максимальным при  $v_2 = v_{\text{max}}$ . Чтобы найти эту скорость, надо исследовать формулу (\*) на экстремум. ( $\frac{p_2}{p_1} = x$ ,  $\frac{dv_2}{dx} = 0$ ).

Получается, что  $v_{max} = \sqrt{\gamma RT_1} = c$ , где  $c$  – скорость звука. Таким образом, при любом сколь угодно большом давлении в баллоне  $p_1$  газ не может вытекать из отверстия со скоростью  $v > c$ .

### 2) Течение со сжатием ( $v \downarrow, p, \rho, T \uparrow$ )

Такой режим реализуется при торможении космических аппаратов в атмосфере. Из (7.6)  $\frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2) = H_2 - H_1 = C_p(T_2 - T_1)$ . При полном торможении  $v_2 = 0$ , и

тогда  $\frac{H_2}{H_1} = 1 + \frac{v_1^2}{2H_1}$ ,  $H_1 = C_p T_1 = \frac{\gamma RT_1}{\gamma - 1} = \frac{c^2}{\gamma - 1}$ .

Введем число Маха  $M = \frac{v}{c}$  и, отбросив 1, получим

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{\gamma - 1}{2} M^2. \quad (7.7)$$

Формула (7.7) позволяет вычислить относительные изменения температуры для различных  $M$  (а по уравнению Пуассона и  $\frac{p_2}{p_1}$ ).

**Таблица 3**

$M$	3	5	7
$\frac{\Delta T}{T}$	1,8	4,5	8,4
$\frac{p_2}{p_1}$	37	600	5900

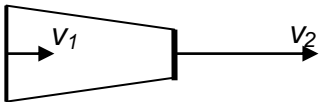
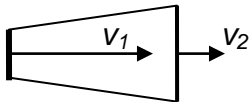
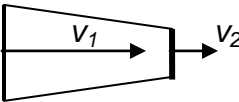
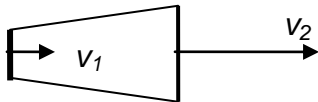
### 3) Изменение режима течения с помощью сопла

Соплом называется труба переменного сечения, преобразующая внутреннюю энергию потока газа в кинетическую. Главная задача – определить профиль сопла, чтобы  $v \rightarrow v_{max}$ .

Для несжимаемой жидкости вопрос решается просто: скорость максимальна в самой узкой части.

Для газа результат для  $M < 1$  и  $M > 1$  различен. Из уравнений (7.1) и (7.3) в форме (7.5) можно вывести  $\frac{\Delta v}{v} = -M^2 \frac{\Delta S}{S}$ , откуда видно, что при  $M < 1$   $\Delta v$  и  $\Delta S$  имеют противоположные знаки, при  $M > 1$   $\Delta v$  и  $\Delta S$  одного знака (см. таблицу 4).

Таблица 4

	$\Delta S < 0$ (сужающееся сопло)	$\Delta S > 0$ (расширяющееся сопло)
$M < 1$ дозвуковой поток	$\Delta v > 0$ (поток ускоряется) 	$\Delta v < 0$ (поток замедляется) 
$M > 1$ сверхзвуковой поток	$\Delta v < 0$ (поток замедляется) 	$\Delta v > 0$ (поток ускоряется) 

Сопло Лавала служит для получения сверхзвукового потока (рис. 75). Дозвуковой поток в сужающейся части достигает скорости звука  $c$ , а в расширяющейся части скорость еще сильнее растет.

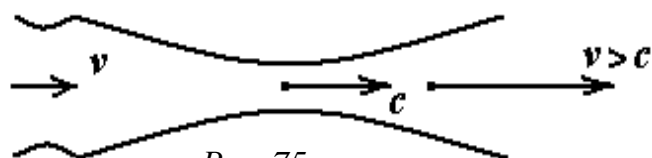


Рис. 75

#### 4. Движение со сверхзвуковой скоростью. Скачки уплотнения, ударные волны, ударная адиабата

При движении тела в газе распространяется волна упругих возмущений. Фронт волны – это граница возмущенного и невозмущенного газа. Фронт – геометрическое место точек постоянных параметров. Обычно систему отсчета связывают с фронтом. Тогда невозмущенный газ набегаёт на фронт с некоторой скоростью.

При скорости, меньшей  $c$  ( $M < 1$ ) тело все время движется внутри сферической волны, которая его опережает (рис. 76). При этом  $l = vt$  – путь, пройденный телом за время  $t$ .  $R = ct$  – радиус сферической волны.

Если  $M > 1$ , то тело перегоняет звуковую волну:  $l > R$ . Волны, излучаемые телом, представляют собой семейство сфер, вложенных в конус, в вершине которого находится движущееся тело (конус Маха). (рис. 77). Угол раствора конуса определяется выражением

$$\sin \alpha = \frac{R}{l} = \frac{c}{v} = \frac{1}{M}.$$

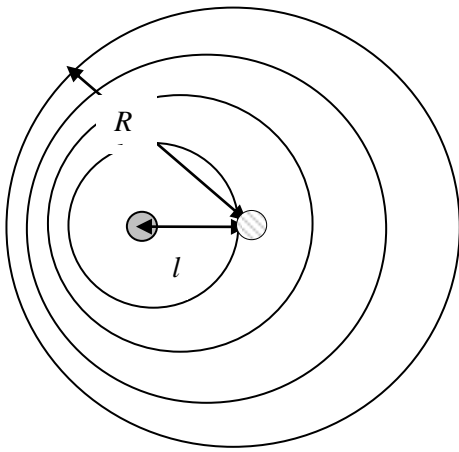


Рис. 76

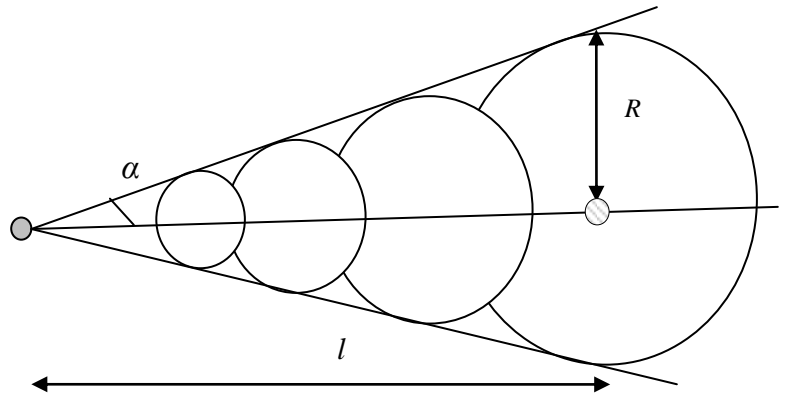


Рис. 77

Перед телом (при  $v > c$ ,  $M > 1$ ) возникает ударная головная волна (или скачок уплотнения) – очень тонкий слой размерами порядка  $\bar{\lambda}$ , на котором скачком меняются термодинамические параметры газа (рис. 78).

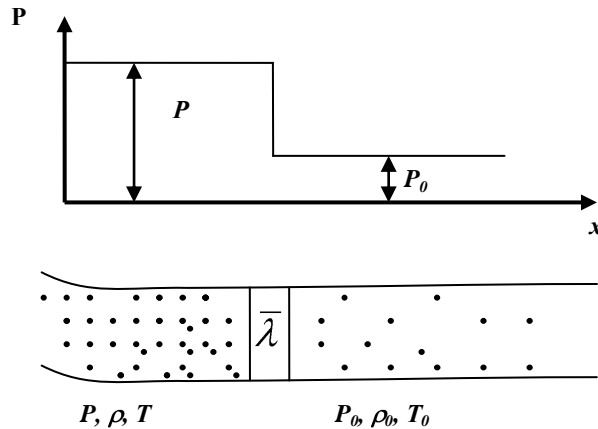


Рис. 78

Ударная волна распространяется со скоростью  $v > c$ . При этом сжатый газ распространяется в ту же сторону со скоростью, меньшей скорости движения фронта ударной волны. Скорость ударной волны тем больше, чем больше скачок уплотнения.

Т.к. плотность газа на скачке сильно меняется, это приводит к сильному изменению коэффициента преломления света, что позволяет сфотографировать фронт ударной волны.

Из основных уравнений газодинамики можно получить уравнение (7.8) ударной адиабаты (уравнение Гюгио), которое можно также представить на графике (рис. 79).

$$\frac{p}{p_0} = \frac{(\gamma+1) \frac{\rho}{\rho_0} - 1}{(\gamma-1) \frac{\rho}{\rho_0}}. \quad (7.8)$$

Формула (7.8) имеет смысл, если  $\frac{\rho}{\rho_0} < \frac{\gamma+1}{\gamma-1}$ . Это означает, что скачок давления и плотности не может быть сколь угодно большим, для одноатомного газа приблизительно в 4 раза, двухатомного в 6 раз или в 8 раз, если возбуждаются колебания атомов в молекулах.



Рис. 79

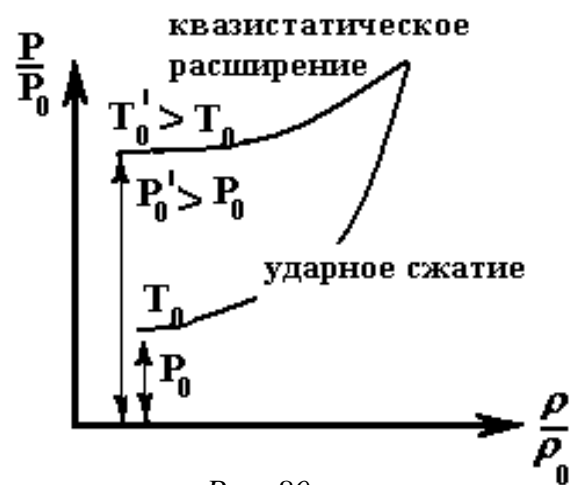


Рис. 80

Процесс ударного сжатия не квазистатичен, поэтому  $\Delta S > 0$ , он необратим, значит, нельзя получить ударное расширение газа. Расширение газа после ударного сжатия идет по адиабате Пуассона и газ в первоначальное состояние не вернется – его давление и температура (при одинаковой плотности) будут выше, чем до сжатия (рис. 80).

Тело, движущееся со сверхзвуковой скоростью, испытывает значительно большее сопротивление, чем при  $v < c$  (из-за скачка уплотнения). Это сопротивление называют волновым. Причем на косом скачке оно меньше, чем на прямом. Поэтому передняя кромка крыла заостренная, а самолеты имеют стреловидную форму.

Возникновение скачка уплотнения ведет к росту энтропии, при этом кинетическая энергия тела необратимо превращается во внутреннюю энергию газа. Это используется при торможении космических кораблей в атмосфере. Газ вокруг корабля нагревается до десятков тысяч градусов (оболочка корабля покрывается графитом, температура плавления которого 4000 °C). Необходимо точно рассчи-

тательный угол входа аппарата в атмосферу, чтобы обеспечить нужное для мягкой посадки торможение в заданных пределах перегрузок и перегрева.

### 5. Реактивные двигатели

Основной элемент реактивного двигателя – сопло Лаваля, чтобы получить максимальную скорость газа. Возникает реактивная сила, равная ежесекундному приросту импульса вытекающего газа.

Когда давление в вытекающей струе  $p$  (на выходе из сопла) будет больше противодействия среды, реакция газовой струи дополняется импульсом этих неуравновешенных сил давления

$$R = G(v_2 - v_1) + S_2(p_2 - p_1), \quad (7.9)$$

где  $v_2$  – скорость газа на выходе,  $v_1$  – на входе.

Реактивные двигатели бывают воздушными (ВРД) и ракетными. В воздушных реактивных двигателях есть только энергоноситель, а окислителем и рабочим веществом служит атмосферный воздух. Воздушные реактивные двигатели подразделяются на прямоточные и турбореактивные (ТРД).

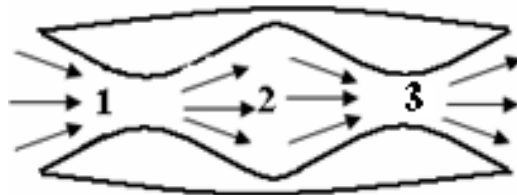


Рис. 81

Идея работы прямоточных ВРД такова: в зоне 1 (рис. 81) сверхзвуковой поток тормозится в самой узкой части до  $v < c$ , а в расширяющейся части зоны 2 еще сильнее тормозится ( $v \downarrow$ , а  $p$ ,  $\rho$  и  $T \uparrow$ ). В зоне 2 впрыскивается топливо, газ воспламеняется и поступает в сопло Лаваля 3, где ускоряется до  $v > c$ , и из сопла выходит сверхзвуковой поток. ПВРД просты, очень надежны, но работают только при  $v > c$ , поэтому для достижения летательным аппаратом скорости  $v > c$  на начальной стадии используют стартовые ракеты.

В ТРД сжатие воздуха осуществляется компрессором, установленным перед камерой сгорания. Энергия потока частично используется в газовой турбине, которая вращает компрессор, а иногда и пропеллер. Оставшаяся часть энергии создает реактивную тягу. ТРД работают при любых, даже самых малых скоростях.

Ракетные двигатели, в свою очередь, делятся на пороховые (ПРД), состоящие из камеры сгорания с порохом, запального устройства и сопла, и жидко-

стные (ЖРД), где тоже есть камера сгорания с форсунками, и помимо тех же запального устройства и сопла, имеется также компрессор.

### **Задания для самопроверки**

#### Вариант 1

1. Какие вопросы изучает газодинамика?
2. Основные параметры потока в газодинамике.
3. Уравнение неразрывности (доказательство).
4. Какова максимальная скорость истечения газа из баллона через малое отверстие?
5. Что такое течение с расширением и со сжатием? Приведите примеры.

#### Вариант 2

1. Число Маха, конус Маха.
2. Сопло Лавалья.
3. Что такое скачок уплотнения? Каким он может быть численно?
4. Какую форму имеют сверхзвуковые самолеты и почему?
5. Чем отличается ПВРД от ТКВРД?

## **Тема 8. Самоорганизующиеся системы**

### **Основные понятия и законы**

#### 1. Введение

Термодинамика, которую мы рассматривали до сих пор, изучает изолированные системы в состоянии равновесия. Процессы – равновесные или квазистатические, т.е. такие, когда изменения очень медленные, и обратимые. Это фактически термостатика. В термодинамике нет времени, нет развития и эволюции, поэтому и выводы из 2-го закона термодинамики ( $\Delta S > 0$ ) удручающие – переход всех видов энергии в энергию хаотического теплового движения, от порядка к хаосу (теория тепловой смерти Вселенной).

Классическая термодинамика не может объяснить теорию Ч. Дарвина – развитие живой материи от низших форм к высшим, т.е. усложнение организации в процессе эволюции.

А термодинамика, наоборот, предсказывает дезорганизацию (или разрушение) изначально заданной структуры в изолированной системе при эволюции к равновесию.



Реальные системы всегда открытые, процессы в них необратимые и неравновесные, поэтому выводы термодинамики неприменимы к реальному миру.

Реальные процессы изучает неравновесная термодинамика (И.Р. Пригожин, Нобелевская премия 1977 г.)

#### Основные понятия:

1) Открытая система – термодинамическая система, обменивающаяся с окружающей средой энергией, веществом и информацией.

2) Локальное равновесие – в неравновесной в целом системе в отдельных малых областях состояние близко к равновесному.

3) Точка бифуркации – состояние, по достижении которого система развивается далее по одному из двух направлений, выбор направления случаен (примеры – витязь на распутье, 11-классник, жених, шарик на горке).

4) Нелинейность. Уравнения равновесной термодинамики линейные, имеют точные решения, следовательно, возможно точное предсказание поведения системы в будущем.

Нелинейные уравнения (описывают поведение реальных систем) не имеют зачастую точных решений, а, значит, невозможна их экстраполяция.

5) Структура – объект, обладающий устойчивостью, «жесткостью» - сопротивляемостью внешним воздействиям. Бывают структуры регулярные (кристалл) и нерегулярные (живой организм).

6) Хаос – отсутствие порядка.

7) Самоорганизация – процесс рождения структуры из хаоса, протекающий самопроизвольно.

8) Катастрофа – скачкообразное изменение свойств системы при незначительном изменении управляющего параметра (спусковой крючок). Например, фазовый переход II рода (сверхпроводимость, сверхтекучесть, ферромагнетизм).

9) Кооперативность – коллективное и согласованное поведение частиц, из которых состоит система.

## 2. Самоорганизующиеся системы

Типичными неравновесными процессами являются явления переноса, например, диффузия и теплопроводность. Такие явления описываются общим уравнением

$$J = -kx. \quad (8.1)$$

В применении к указанным выше процессам поток  $J$  можно записать так:

диффузия  $J_M = \frac{m}{ST} \left( \frac{кг}{м^2 \cdot с} \right)$ , теплопроводность  $J_q = \frac{Q}{ST} \left( \frac{Дж}{м^2 \cdot с} \right)$ .

Здесь  $J$  – поток массы, тепла,  $k$  – коэффициент переноса,  $x$  – «термодинамическая» сила, роль которой выполняют градиенты  $\frac{\Delta \rho}{\Delta x}$ ,  $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ . Знак « $-$ » означает, что поток направлен против градиента.

Пока уравнение (8.1) является линейным, процесс является стационарным и, хотя в целом он неравновесный, можно говорить о его локальной равновесности.

Но по мере того, как растет градиент, система все дальше и дальше отходит от равновесия, появляются неустойчивость, бифуркации, и поведение системы описывается уже нелинейными уравнениями (появляются члены порядка выше первого, или принимается во внимание зависимость кинетических коэффициентов от термодинамических сил ( $K, D \neq const$ )). Графически это можно изобразить так, как показано на рис. 82. Здесь АВ – линейная, а ВС – нелинейная области, С – точка бифуркации, 1 и 2 – разные пути дальнейшего поведения системы.

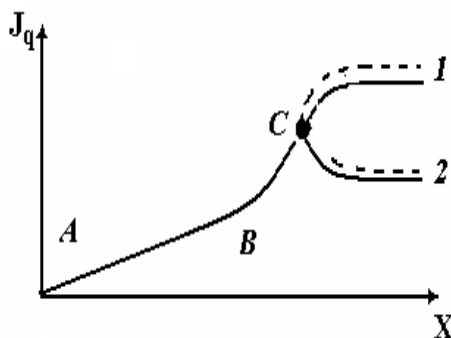


Рис. 82

Главное, вдали от равновесия в открытой системе начинаются процессы самоорганизации – возникновение структур из хаоса.

Примеры:

1) Переход ламинарного режима течения жидкости в турбулентный. Такой переход происходит при увеличении числа Рейнольдса  $R_e = \frac{\rho v l}{\eta}$ . Объяснение

Ландау (1944 г.): при малых  $R_e$  (например, при малых  $v$ ) режим ламинарный, возникающие небольшие отклонения (возмущения – флуктуации) затухают. С увеличением скорости некоторые из малых возмущений перестают затухать. Система теряет устойчивость и переходит в новый режим, – говорят о первой бифуркации. При дальнейшем увеличении  $R_e$  новый периодический режим опять становится неустойчивым, возникают незатухающие колебания с еще одной частотой и т.д.

Ландау предположил, что при непрерывном росте  $R_e$  интервалы между числами  $R_e$ , соответствующими последовательному появлению новых частот, быстро сокращаются, и эти новые движения имеют все более мелкие масштабы; таким образом, турбулентное движение есть результат бесконечного каскада бифуркаций.

В настоящее время проблема объяснения турбулентности существует, и она очень важна (погода, океанология, физика атмосферы, т.к. большая часть Вселенной заполнена средой, находящейся в турбулентном движении, отсюда физика планет, астрофизика).

2) Ячейки Бенара. Если слой жидкости сильно нагревать снизу, то при больших  $\Delta T$  градиент становится инверсным, т.к. жидкость внизу имеет меньшую плотность (тепловое расширение), чем вверху (рис. 83). Из-за сил тяжести и Архимеда такая система оказывается неустойчивой, т.к. «легкий» нижний слой и «тяжелый» верхний стремятся поменяться местами. Однако, вследствие вязкости, при малых  $\Delta T$  движение не возникает, и тепло передается только путем теплопроводности.

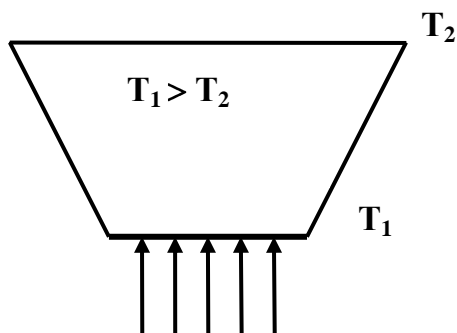


Рис. 83

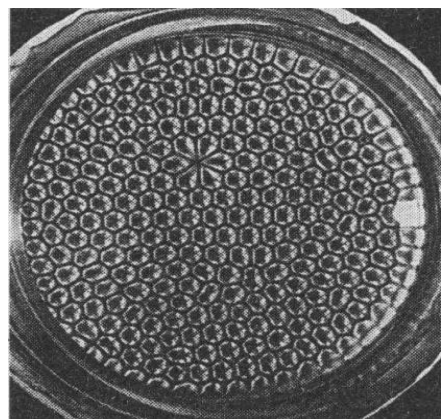
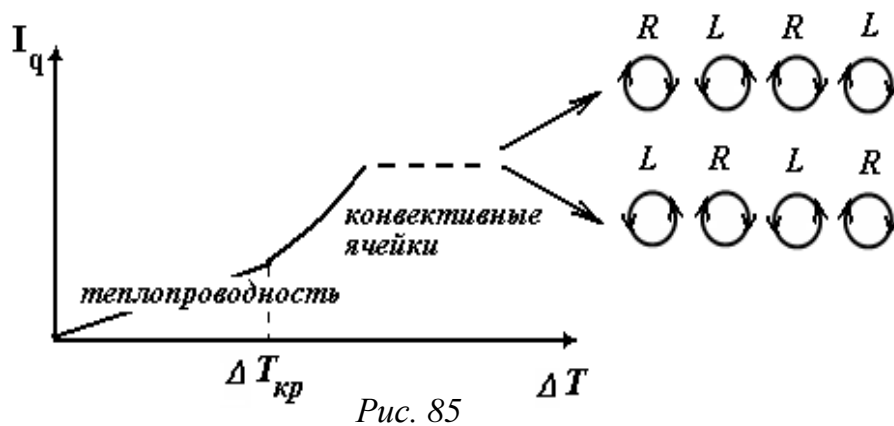


Рис. 84

При  $\Delta T_{кр}$  возникает конвективный поток, обладающий характерной структурой в виде шестиугольных ячеек (рис. 84). В центре ячейки поток движется вверх, а по краям вниз.

Конвективные ячейки (по сравнению с хаотичным распределением параметров в покоящейся жидкости) являются более высокоорганизованной структурой, возникающей в результате коллективного движения молекул в жидкости (рис. 85).



Т.к. система обменивается со средой только теплом и в стационарных условиях получает (при  $T_1$ ) столько тепла, сколько и отдает (при  $T_2 < T_1$ ), то выходит, что система отдает энтропию среде ( $\Delta S = \frac{q}{T_1} - \frac{q}{T_2} < 0$ ). Иными словами, внутренняя структура, или самоорганизация, поддерживается за счет поглощения отрицательной энтропии (негэнтропии – Бриллюэн).

На этом примере отчетливо виден процесс самоорганизации:  $\Delta T < \Delta T_{кр}$  – квазиравновесная линейная система,  $\Delta T_{кр}$  – бифуркация (при этом случайно определяется направление вращения, по часовой стрелке или против будет происходить движение жидкости в соседних ячейках), неустойчивость – нелинейность – самоорганизация. Иначе говоря, кооперативность – коллективное поведение частиц – конвекция.

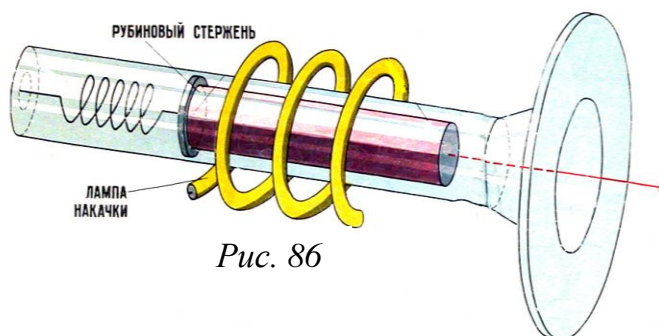
3) Модель самоорганизации биосферы. Ячейки Бенара упрощенно, как бы в миниатюре, воспроизводят условия, необходимые для существования жизни на Земле.

Жизнь на Земле стала возможна лишь благодаря негэнтропии солнечного излучения. Сфера жизни на Земле – это упорядоченная структура, которая питается негэнтропией. Энергия поступает на Землю от Солнца ( $T_1 = 6000$  К) и уходит от Земли в космическое пространство при  $T_2 = 300$  К. Если предположить, что энергия на Земле не накапливается, то поток энтропии от Солнца на Землю меньше потока от Земли в космическое пространство (как в случае ячеек Бенара).

Таким образом, Земля получает высококачественную энергию от Солнца (качество энергии определяется малым потоком энтропии), перерабатывает ее, что, конечно, сопровождается ростом энтропии, и выбрасывает в космическое пространство вместе с наработанной энтропией. Именно это обстоятельство обеспечивает жизнедеятельность на Земле.

Постоянство негэнтропийного рациона Земли в обозримые интервалы времени, видимо, и лежит в основе открытого академиком В.И. Вернадским закона сохранения биомассы на Земле. Таким образом, на уровне общих представлений проблема существования жизни на Земле понятна. Но вопросы молекулярной самоорганизации, принципы отбора и эволюции по-прежнему требуют объяснения на физическом уровне.

4) Возникновение когерентного излучения (лазер) можно рассматривать как неравновесный фазовый переход. Рассмотрим твердотельный рубиновый лазер (рис. 86).



Под действием излучения лампы накачки атомы переходят в возбужденное состояние и начинают излучать. При малых мощностях накачки ( $P$ ) атомы излучают независимо друг от друга (хаотично) и лазер работает как обычная лампа. При  $P_{кр}$  наступает кооперативность – все атомы начинают осциллировать в фазе и излучают согласованно и одновременно – в итоге появляется, во-первых, когерентное, и, во-вторых, мощное излучение. Зависимость интенсивности излучения от мощности накачки имеет вид, аналогичный рис. 82. Таким образом, в лазере наблюдается самоорганизация.

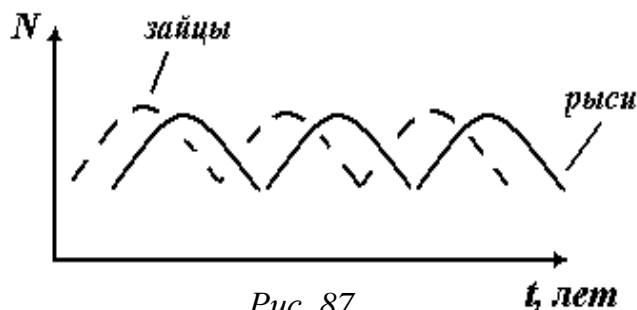
Такой же переход наблюдается в случае «парамагнетик – ферромагнетик». Критический параметр в этом случае  $T_k$  – температура Кюри.

Все неравновесные фазовые переходы связаны с диссипацией, т.е с производством энтропии. Поэтому они возможны лишь в открытых системах, где поток негэнтропии из окружающей среды компенсирует производство энтропии внутри системы. (Поэтому такие системы Пригожин называет диссипативными структурами).

5) Модель «хищник – жертва» – пример периодических процессов, происходящих в живой природе.

Выше были приведены примеры пространственных структур. Пример временных структур – эволюция численности зайцев и рысей (по данным канад-

ской компании «Хадсон Бей», проводившей наблюдения в течение 90 лет). Рыси питаются зайцами, зайцы – травой. Рост числа зайцев ведет к росту числа рысей, рост числа рысей приводит к уменьшению числа зайцев, что потом приводит к уменьшению числа рысей и т.д. (процесс Лотки-Вольтерра, рис. 87).



6) В химии известна реакция Белоусова-Жаботинского (Б-Ж), которая представляет собой пример временной (химические часы) и пространственной упорядоченности. Под реакцией Б-Ж понимается целый класс химических реакций, протекающих в колебательном режиме, при котором некоторые параметры реакции (цвет, концентрация компонентов, температура и др.) изменяются периодически, образуя сложную пространственно-временную структуру реакционной среды.

### Задания для самопроверки

#### Вариант 1

1. Основные положения и выводы равновесной термодинамики.
2. Понятия: открытая система, локальное равновесие, точка бифуркации, нелинейность, хаос.
3. Ячейки Бенара.

#### Вариант 2

1. Основные положения и выводы неравновесной термодинамики.
2. Понятия: структура (регулярная и нерегулярная), самоорганизация, катастрофа, кооперативность.
3. Лазер.

## Содержание

Тема 1. Идеальный газ	1
Тема 2. Первый закон термодинамики	17
Тема 3. Второй закон термодинамики	25
Тема 4. Реальные газы	34
Тема 5. Молекулярные явления в жидкостях	49
Тема 6. Твердые тела	60
Тема 7. Газодинамика	71
Тема 8. Самоорганизующиеся системы	80
Содержание	87

**Учебное издание**

**Пекин Петр Васильевич  
Беспаль Ирина Ивановна**

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА  
Учебно-методическое пособие  
для самостоятельной работы  
студентов**

Издательство ЧГПУ  
454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Редактор Ю.В. Тихонова

Подписано в печать 06.10.2009

Объем 4,3 уч.-изд. л.

Формат 60x84/16

Бумага офсетная

Тираж 100 экз.

Заказ №

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