

**И.И. Беспаль**  
**В.П. Андрейчук**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ**  
**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

**Учебно-методическое пособие**

Министерство просвещения Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Южно-Уральский государственный  
гуманитарно-педагогический университет»

**И.И. Беспаль**  
**В.П. Андрейчук**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ**  
**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА**

**Учебно-методическое пособие**

Челябинск  
2024

УДК 536.1(076)(021)  
ББК 22.36я73  
Б 53

Беспаль, И.И. Физический практикум. Молекулярная физика: учебно-методическое пособие / И.И. Беспаль, В.П. Андрейчук; Министерство просвещения Российской Федерации, Южно-Уральский государственный гуманитарно-педагогический университет. – Челябинск: Изд-во ЮУрГГПУ, 2024. – 160 с. – ISBN 978-5-907790-95-7. – Текст: непосредственный.

Пособие содержит описания лабораторных работ по разделу «Молекулярная физика» дисциплины «Общая и экспериментальная физика», а также основные соотношения, формулы и законы молекулярной физики и термодинамики, которые составляют теоретическое обоснование представленных работ. Для организации самостоятельной работы студентов при подготовке к лабораторным занятиям приведены вопросы для допуска к каждой лабораторной работе и ее защиты.

Пособие предназначено для преподавателей физики и студентов педагогических вузов.

Рецензенты: Л.М. Свирская, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры ФиМОФ ФГБОУ ВО «ЮУрГГПУ», доцент  
Н.А. Векессер, канд. физ.-мат. наук, доцент 6 кафедры математики и естественных наук ФГКВОУ ВПО «Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (филиал, г. Челябинск)

ISBN 978-5-907790-95-7

© Беспаль И.И., Андрейчук В.П., 2024  
© Издательство Южно-Уральского государственного гуманитарно-педагогического университета, 2024

## ВВЕДЕНИЕ

Раздел «Молекулярная физика» продолжает изучение дисциплины «Общая и экспериментальная физика», традиционно изучается в третьем семестре, после изучения раздела «Механика». Это обусловлено и историей развития физической науки, и усложнением предмета изучения.

Если в механике изучаются тела, их движение и взаимодействие без учета их внутреннего строения, в молекулярной физике основное внимание уделяется объяснению физических свойств тел именно на основании их молекулярного строения, с учётом движения и взаимодействия частиц, из которых состоят тела.

Древнегреческий ученый Демокрит, живший во II веке до нашей эры, размышляя о том, как устроено всё вокруг, представил себе эксперимент, который мы с легкостью можем повторить. Представьте себе яблоко. Разрежем его пополам, половину съедем, вторую снова разрежем пополам. Одну из получившихся четвертинок яблока снова мысленно съедем, а вторую разрежем пополам. Понятно, что мы получим сначала  $1/8$  часть яблока, потом  $1/16$  часть яблока, потом  $1/32$  и т. д. И вот вопрос, который задал себе Демокрит: «Мы всегда будем получать кусочек яблока с его запахом и вкусом, или мы получим в конце какую-то часть,

которую дальше уже разделить будет нельзя?» Демокрит пришел к выводу, что такая неделимая частица будет, и назвал ее атомом, что в переводе с греческого и означает «неделимый».

В течение многих столетий идеи Демокрита не находили подтверждения, так как никому не удавалось увидеть атомы. Идеи о том, что внутри веществ есть какие-то мелкие частицы, возродились только в XVI–XVII веках. И тут-то пригодилось слово, придуманное Демокритом, – *атом*. С современной точки зрения атом является мельчайшей структурной частицей вещества.

Представления о том, что атом невозможно разделить на части, просуществовало очень долго. Обнаружить частицу, входящую в состав атома, удалось только в конце XIX в. Это сделал в 1897 году английский физик Дж. Томсон, открыв электрон. Первые идеи о строении атома были высказаны в начале XX века. Строение атома подробно рассматривается при изучении разделов «Электричество и магнетизм» и «Квантовая физика». Обычно упрощенно говорят о том, что в атоме имеется ядро, состоящее из протонов и нейтронов, вокруг которого движутся электроны.

В зависимости от количества протонов атомы могут быть разными, но в природе их очень немного. Все известные сегодня атомы простых веществ можно найти в периодической таблице Д. И. Менделеева – это 118 элементов, из которых примерно четверть получены искусственно.

Молекула – электрически нейтральная система, состоящая из отдельных атомов. С химической точки зрения молекула – наименьшая частица вещества, сохраняющая

все химические свойства. Причем молекулы могут быть одноатомными (молекула металлов) или многоатомными (в молекуле серной кислоты 7 атомов). Бывают и макромолекулы, например молекулы, которые содержатся в клетках всех живых организмов – белки, ДНК и РНК, – могут содержать сотни тысяч и миллионы атомов.

Молекул (атомов) в составе одного тела очень много, например, в 1 см<sup>3</sup> воздуха содержится  $2,7 \cdot 10^{19}$  молекул, поэтому классические подходы к описанию поведения одной отдельно взятой частицы не используются. Многие параметры усредняются, а какие-то параметры применяются к описанию большого ансамбля частиц. В этом состоит суть статистического метода в молекулярной физике: описывается поведение совокупности частиц как целого с использованием математических статистических закономерностей.

Альтернативным является термодинамический метод, в котором физические свойства системы изучают, не вникая в ее строение. При этом используются понятия энергии, энтропии, которые описывают систему в целом.

Пособие состоит из двух частей. В первой части представлены краткие сведения о теоретических основах изучаемого раздела, во второй – описания лабораторных работ по разделу «Молекулярная физика» дисциплины «Общая и экспериментальная физика».

Авторы выражают благодарность старшему лаборанту кафедры физики и методики обучения физике Малёшиной Е.А. за помощь в подготовке данного издания.

## ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Молекулярная физика – раздел физики, изучающий те свойства вещества, которые обусловлены его молекулярным строением.

Молекула – электрически нейтральная система, состоящая из отдельных заряженных частиц, электронов и атомных ядер. С химической точки зрения молекула – наименьшая частица вещества, сохраняющая все химические свойства.

Моль – количество вещества, содержащее столько структурных элементов (атомов, молекул), сколько их содержится в 0,012 кг углерода  $C_6^{12}$ .

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

Число Авогадро ( $N_A$ ) – число молекул в 1 моле вещества, его значение  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup>.

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

Температура – мера средней кинетической энергии молекул. Обозначается  $T$ , измеряется в кельвинах ( $K$ ). Кельвин является основной единицей СИ (системы интернациональной – Международной системы единиц) и равен  $1/273,16$  части термодинамической температуры тройной точки воды (см. раздел 4).

# 1. Идеальный газ

Идеальный газ – модель газа, в которой не учитываются силы взаимодействия между молекулами и собственный объем молекул. Сами молекулы упрощенно считаются точечными упругими шариками, которые движутся по законам Ньютона.

## 1.1. Экспериментальные газовые законы

Закон Бойля – Мариотта (открыт в 1662 г. Робертом Бойлем и независимо от него в 1675 г. Эдмом Мариоттом): *для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления газа на его объем есть величина постоянная.*

Этот закон выражается формулой

$$pV = const \text{ при условии, что } m, T = const. \quad (1)$$

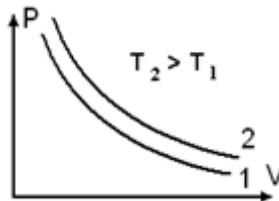


Рис. 1. Графическое изображение изотермического процесса

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

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

Этот закон выражает формула

$$V = V_0(1 + \alpha t) \text{ при условии, что } m, p = \text{const}, \quad (2)$$

где  $\alpha = \frac{\Delta V}{V \Delta t}$  – 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.

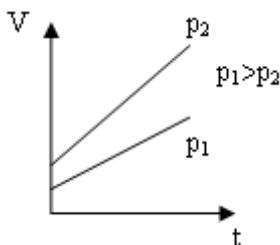


Рис. 2. Графическое изображение изобарного процесса

В школьном курсе физики чаще используют иную формулировку закона: *для данной массы газа отношение объема газа к его температуре остается постоянным, если давление не меняется.*

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

Математически этот закон представлен формулой

$$p = p_0(1 + \beta t) \text{ при условии, что } m, V = \text{const}, \quad (3)$$

где  $\beta = \frac{\Delta p}{p \Delta t}$  – термический коэффициент давления, численно равный относительному изменению давления при изменении температуры на 1 градус;  $p_0$  – давление газа при температуре  $0^\circ \text{C}$ .

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

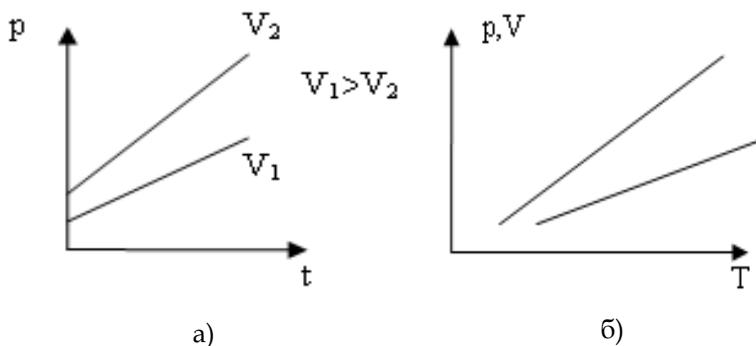


Рис. 3. Графическое изображение изобарного процесса (а), изобарного и изохорного процессов (б)

Примечание:  $\alpha = \beta = \frac{1}{273}$ , если в (2) и (3) перейти к температурной шкале Кельвина  $T = t + 273$  (К), 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 3б.

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

Записывается этот закон следующим образом:

$$\frac{pV}{T} = const. \quad (4)$$

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  $N_A$ ).*

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

$$pV = \nu RT, \quad (5)$$

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.

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

Этот закон выражается формулой

$$p = \sum p_i. \quad (6)$$

## 1.2. Основные теоретические закономерности

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

$$p = \frac{1}{3} m_0 n v_k^2, \quad (7)$$

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.

Массу молекулы и среднюю квадратичную скорость можно определить с помощью следующих соотношений:

$$m_0 = \frac{M}{N_A}, \quad (8)$$

$$v_k = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (9)$$

Уравнение (1.7) может быть выражено через другие параметры:  $pV = \frac{2}{3} \bar{\epsilon} N$ ;  $pV = NkT$ ;  $p = nkT$ ,

где  $k = \frac{R}{N_A} = 1.38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постоянная Больцмана,  $\bar{\epsilon}$  – средняя энергия одной молекулы, поэтому

$$\bar{\epsilon} = \frac{3}{2} kT. \quad (10)$$

Распределение молекул по скоростям (Д.К. Максвелл, 1860 г.)

Основываясь на статистическом поведении параметров частиц идеального газа, Максвелл вывел закон распределения молекул газа по скоростям, график которого представлен на рисунке 4, а формула имеет вид

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2. \quad (11)$$

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.

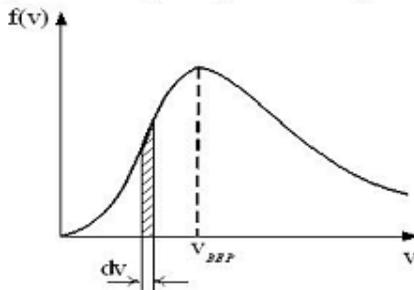


Рис. 4. Распределение Максвелла

Площадь заштрихованной фигуры на рисунке 4 равна  $\frac{\Delta N}{N}$ , где  $\frac{\Delta N}{N}$  – относительное число молекул, скорости которых лежат в интервале  $dv$ . Площадь под всей кривой численно равна вероятности того, что молекула газа имеет

какую-либо скорость от 0 до  $\infty$ , и так как все молекулы движутся, то вероятность равна 1 (т. е. достоверное событие). Напомним, что условие нормировки  $S = \int_0^{\infty} f(v)dv = 1$ .

Распределение (11) зависит от вида газа и температуры. Если перейти к относительной скорости  $u = \frac{v}{v_B}$ , то получится универсальная формула, не зависящая от рода газа и температуры

$$f(u) = \frac{dN}{Ndu} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-u^2} u^2. \quad (12)$$

Формулой (12) удобно пользоваться при решении задач, т. к. она задается таблично (или графически).

Распределение Больцмана – это зависимость концентрации молекул от высоты в поле силы тяжести, имеет вид

$$n = n_0 e^{-\frac{mgh}{kT}}, \quad (13)$$

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

Барометрическая формула выражает зависимость атмосферного давления от высоты над уровнем моря:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}, \quad (14)$$

где  $p_0$  – давление на уровне моря.

### 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.

Если обозначить среднее число столкновений одной молекулы с остальными за 1 с как  $\bar{Z} \left( \frac{1}{c} \right)$ , то

$$\bar{Z} = \sqrt{2}\pi d^2 \bar{v} n, \quad (15)$$

где  $n$  ( $\frac{1}{\text{м}^3}$ ) - концентрация молекул,  $\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$  - средняя арифметическая скорость,  $d$  - эффективный диаметр молекул (определяемый экспериментально из явлений переноса). Тогда общее число столкновений молекул в единице объема за единицу времени составит

$$Z = \frac{1}{2} \bar{Z} n \frac{1}{(\text{м}^3 \cdot \text{с})}. \quad (16)$$

Введем понятие средней длины свободного пробега, т. е. среднего расстояния, которое проходит молекула от столкновения до столкновения

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}, \quad (17)$$

где  $\bar{\lambda}$  (м) - средняя длина свободного пробега молекул,  $d$  - эффективный диаметр молекулы,  $n$  - концентрация молекул.

Если обозначить за  $\tau$  (с) среднее время столкновений, то есть время между двумя столкновениями, то получим

$$\tau = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}} = \frac{1}{Z}. \quad (18)$$

В таблице 1 приведены все явления переноса и их основные характеристики.

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).

Таблица 1

## Явления переноса

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

Зависимость эффективного диаметра молекул от температуры (У. Сёзерленд, 1890 г.)

Под эффективным диаметром молекул будем понимать минимальное расстояние, на которое сближаются центры двух молекул при столкновении. На расстояниях, больших эффективного диаметра молекул, преобладают силы притяжения. На меньших расстояниях – силы отталкивания. Как показал У. Сёзерленд, эффективный диаметр зависит от температуры следующим образом:

$$d_{эф} = d_{\infty} \sqrt{1 + \frac{C}{T}}, \quad (19)$$

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

## 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. Так как градиентов нет, явления, описанные выше: *диффузия, вязкость и теплопроводность*, – теряют смысл и называются *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 (так как  $\rho \sim p$ ,  $\lambda \sim \frac{1}{p}$ ). В вакууме  $\lambda = L = \text{const}$  и коэффициент теплопередачи  $\eta \sim p$ , а так как  $p$  мало, то и  $\eta$  низкое. Это используется в сосуде Дьюара (термос), то есть в сосуде с двойными стенками, откуда откачан воздух до состояния вакуума.

## **2. Первый закон термодинамики**

### **2.1. Основные понятия и законы**

- Термодинамическая система – макроскопическое тело или система тел, обменивающихся 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 –  $F$ , энтальпия –  $H$ ).

- 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 процессы – это процессы бесконечно медленные, когда макроскопические параметры меняются на бесконечно малые величины  $dp, dT, dV$ .

- Внутренняя энергия системы – это энергия движения и взаимодействия частиц, из которых состоит термодинамическая система, является функцией состояния системы.

Изменить внутреннюю энергию можно или совершением работы, или теплопередачей. Последнюю традиционно разделяют на три способа: теплопроводность, конвекцию и излучение. Изменение внутренней энергии определяется только начальным и конечными состояниями системы.

- Работа – мера передачи энергии упорядоченного движения, является функцией процесса.  $\delta A = p dV$ .
- Теплообмен – форма передачи энергии неупорядоченного движения, также является функцией процесса.

Выражение

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (20)$$

представляет собой I закон термодинамики в дифференциальной форме. Это же соотношение в интегральной форме имеет вид

$$Q = \Delta U + A. \quad (21)$$

Поскольку внутренняя энергия  $U$  – функция состояния, значит, она является полным дифференциалом, то есть  $\oint U = 0$ .

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

$$A = \int p dV. \quad (22)$$

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. 5).

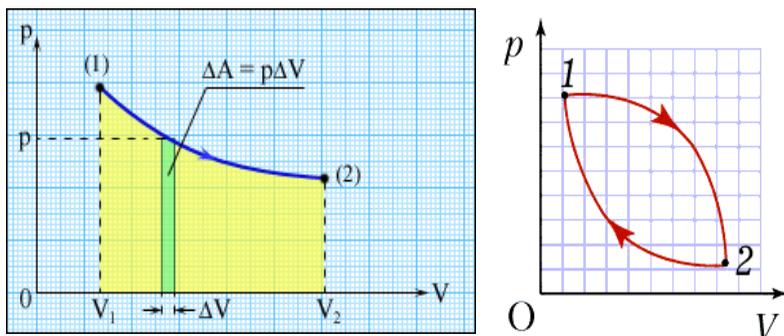


Рис. 5. Геометрическое представление работы газа

Из (22) 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.), то есть  $\oint dA \neq 0$ . Значит, работа не является полным дифференциалом (не является функцией состояния). Это функция процесса.

## 2.2. Теплоемкость

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

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

Связь между удельной и молярной теплоемкостями:

$$C = cM. \quad (23)$$

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  $V = \text{const}$ .

$$C_p = \frac{i+2}{2} R; C_v = \frac{i}{2} R. \quad (24)$$

Отношение теплоемкостей (коэффициент Пуассона) имеет вид:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (25)$$

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 и  $i = 6$  для многоатомных молекул.

Внутренняя энергия идеального газа определяется по формуле

$$U = \nu \frac{i}{2} RT, \quad (26)$$

при этом  $dU = \nu C_V dT$ .

Работа в изотермическом процессе:

$$A = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (27)$$

Работа в изобарическом процессе:

$$A = p \Delta V. \quad (28)$$

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

Уравнение Пуассона, описывающее адиабатный процесс, имеет вид

$$pV^\gamma = const, \quad (29)$$

где  $\gamma$  (также показатель адиабаты) определяется по формуле (25).

Работа в адиабатном процессе

$$A = \frac{p_1 V_1}{(\gamma-1)} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right]. \quad (30)$$

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

Уравнение политропных процессов имеет вид

$$pV^n = const, \quad (31)$$

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

$$n = \frac{c_p - C}{c_v - C}. \quad (32)$$

В этой формуле  $C$  обозначена теплоемкость политропного процесса. При этом  $1 < n < \gamma$ . Из (31) вытекает уравнение (29) (при  $C = 0$ ), при  $C = \infty$  ( $n = 1$ ) – закон Бойля – Мариотта.

### 3. Второй закон термодинамики

#### 3.1. 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 циклический процесс  $1a2b1$ , совершаемый идеальным газом (рис. 6).

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

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

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

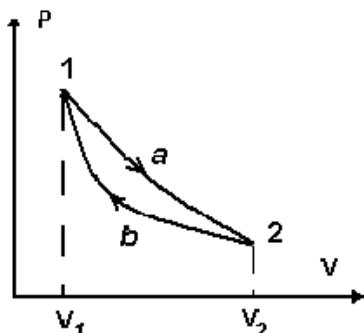


Рис. 6. Произвольный циклический процесс

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

$$\delta Q = \delta A, \text{ и } Q = A, \quad (33)$$

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

В прямом цикле  $A > 0$  и  $Q > 0$ , то есть 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  $-A$  ( $A < 0$ ), от газа отводится эквивалентное работе количество теплоты. Это холодильная машина.

Для того, чтобы работа за цикл совершалась ( $A_{ци} \neq 0$ ), 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 (33) состоит из суммы  $Q_1$  и  $-Q_2$ .

$$A = Q_1 - Q_2. \quad (34)$$

Так как 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 7а. КПД тепловой машины определится отношением

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}. \quad (35)$$

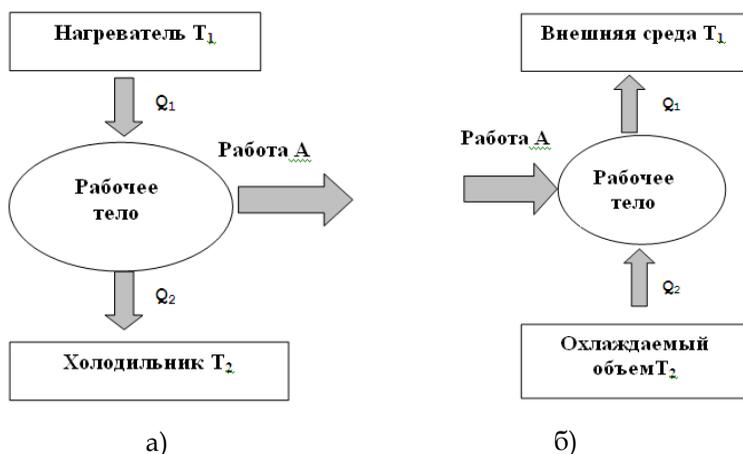


Рис. 7. Условные схемы работы а) тепловой и б) холодильной машин

В холодильной машине (рис. 7б) 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 (34)).

КПД и тепловой машины, и холодильника определяется формулой (35) и не может быть равным 100 %. (Всю теплоту, взятую от нагревателя, превратить в эквивалентную ей работу нельзя).

Как только появились первые тепловые машины и была осмыслена формула (35) ( $\eta < 1$ ), сразу возник вопрос: каким может быть максимальное значение КПД тепловой машины?

### 3.2. 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?

Так как 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).

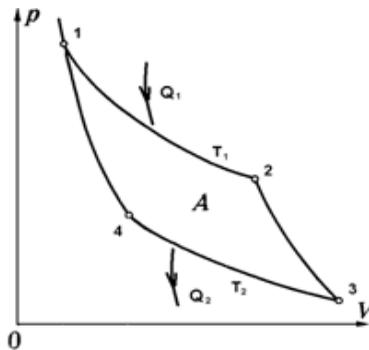


Рис. 8. Цикл Карно в координатах  $p, V$

На рис. 8 изображен идеальный обратимый цикл Карно, состоящий из двух изотерм и двух адиабат.

$1 \rightarrow 2$  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  $T_2 = \text{const}$ , при этом тепло  $Q_2$ , в которое превращается работа сжатия газа, передается холодильнику.

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

С. 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 ( $T_2$ ). Данное утверждение получило название теоремы Карно и описывается формулой

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (36)$$

Из (36) следуют два важных вывода:

- $\eta$  не может быть равным 1;
- единственный способ повысить КПД тепловой машины – это повышать температуру нагревателя  $T_1$ , так как  $T_2$  – это температура окружающей среды, которую мы не можем менять.

### 3.3. Различные формулировки 2-го закона 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), то есть 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 – 5–7 %, ДВС – 25–30 %, дизельный двигатель – 30–35 %. И только у газовых турбин (мощностью сотни тысяч лошадиных сил) он достигает порядка 60 %.

### 3.4. 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, численно равна

$$dS = \frac{\delta Q}{T}; \Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}. \quad (37)$$

Ниже 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, так как все реальные процессы необратимы, то

$$\Delta S > 0. \quad (38)$$

Это неравенство получило название неравенства Клаузиуса и является математической формулировкой 2-го закона термодинамики: энтропия изолированных систем растет.

С учетом (37) можно записать уравнение (39), объединяющее 1-й и 2-й законы термодинамики:

$$TdS = dU + \delta A. \quad (39)$$

Если из (39) определить работу в обратимом изотермическом процессе, то получим  $\delta A_{\text{изот}} = -dF$ , или  $A_{\text{изот}} = F_1 - F_2$ , где

$$F = U - TS \quad (40)$$

называется свободной энергией.

И, так как  $U = F + TS$ , 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.

### 3.5. 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):

$$\omega = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\Delta t}{t}, \quad (41)$$

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, так как молекулы неразличимы,

$$W = \omega P. \quad (42)$$

$P$  - 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  $\Delta S \geq 0$ ):

$$\Delta S = k \ln \frac{P_2}{P_1}. \quad (43)$$

Это означает (из (43)): термодинамическая вероятность состояния изолированной системы при всех происходящих в ней процессах не убывает.

При обратимых процессах система переходит от одного равновероятного состояния к другому ( $P_1 = P_2$ ,  $\ln \frac{P_2}{P_1} = 0$ ,  $\Delta S = 0$ ). Механическая модель - шарик на горизонтальной поверхности (рис. 9а). Оба состояния равновероятны, так как потенциальная энергия одинакова.

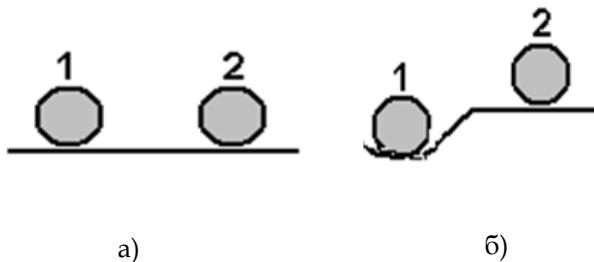


Рис. 9. Модели процессов: а) обратимого, б) необратимого

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. 9б).

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 (так как его можно реализовать неограниченным количеством 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.

### 3.6. 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 так как число молекул, толкающих частицу с разных сторон, различно и всё время меняется, частица движется хаотично в разных направлениях и при этом вверх (особенно важно), что противоречит 2-му закону термодинамики. Движение броуновских частиц вверх (возрастание их потенциальной энергии) происходит за счет кинетической энергии молекул, то есть 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 так называемые «звездные ассоциации» – большие группы звезд одного возраста, что свидетельствует о рождении не только отдельных звезд, но и целых ассоциаций звезд. Рождение звезд – процесс с уменьшением энтропии, никакой тепловой смерти Вселенной не будет.

## **4. Реальные газы**

### **4.1. 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 ( $\bar{\epsilon} = \frac{3}{2}kT$ ) 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)

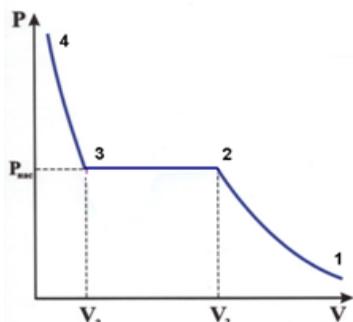


Рис. 10. Изотерма реального газа

Английский физик Т. Эндрюс в 1866–1869 гг. изучал зависимость  $p = f(V)$  (при  $T = \text{const}$ ) для углекислого газа. На рисунке 10 показан вид изотермы реального газа, на которой можно выделить следующие участки:

- 1) участок 1-2 изотермы соответствует ненасыщенному пару  $\text{CO}_2$ , подчиняющемуся закону Бойля – Мариотта;
- 2) в состоянии 2 при  $p = p_{н.н.}$  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  $p_{н.н.}$ ;

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 Т. Эндрюс расширил исследования и изучил изотермы  $\text{CO}_2$  при разных температурах. Семейства изотерм Эндрюса показаны на рисунке 11.

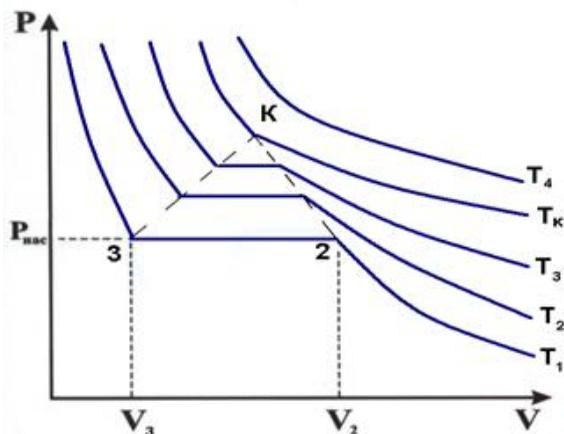


Рис. 11. Семейство изотерм Эндрюса

Особенности изотерм реального газа:

1. С ростом температуры участок 2-3 становится короче. Давление насыщенного пара растет с температурой ( $p_{н.п.} \sim T$ ). С увеличением давления объем насыщенного пара 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 ( $T_k, p_k, V_{0k}$ ). При критической температуре ненасыщенный пар переходит в жидкость, минуя стадию насыщения.

3. При  $T > T_k$  газ в жидкость не превращается при любом давлении.

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

Понятие критической температуры впервые ввел Д.И. Менделеев. Он считал, что при этой температуре (температуре абсолютного кипения жидкости) исчезают силы сцепления между молекулами и жидкость превращается в пар независимо от давления и температуры.

## 4.2. Уравнение Ван-дер-Ваальса

В 1873 г. голландский физик Я. Д. 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

$$\left(p + \frac{a}{V_0^2}\right)(V_0 - b) = RT. \quad (44)$$

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 (44) для произвольной массы газа имеет вид

$$\left(p + v^2 \frac{a}{v^2}\right)(V - vb) = vRT. \quad (45)$$

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

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

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  $V = \frac{\pi d^3}{6}$ , то

$$b = \frac{2}{3}\pi d^3 N_A. \quad (46)$$

### Исследование уравнения Ван-дер-Ваальса

Приведенное выше уравнение Ван-дер-Ваальса (45) является кубическим уравнением 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. 12 приведена теоретическая изотерма Ван-дер-Ваальса (1, 2, 2', 3', 3, 4) и опытная изотерма Эндрюса (1, 2, 3, 4).

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

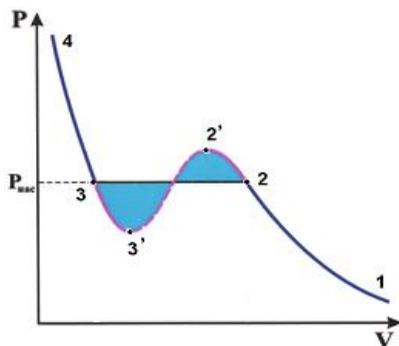


Рис. 12. Сопоставление опытной и теоретической изотерм реального газа

*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. (Подробнее о центрах конденсации см. п. 5.3. «Капиллярные явления») Если в газе нет центров конденсации (например, воздух чистый), то по достижении т. 2 ( $p = p_{н. н.}$ ) конденсация не наступает и реализуется состояние 2–2'. По достижении состояния 2' наступает быстрая конденсация, давление падает до  $p_{н. н.}$  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. 13). 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.

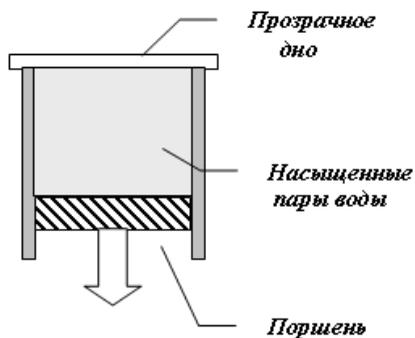


Рис. 13. Устройство камеры Вильсона

*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. (Подробнее о механизме кипения см. п. 5.3. «Давление Лапласа»)

Если нагревать чистую жидкость в сосуде с идеально гладкими стенками, то жидкость при достижении температуры кипения не будет кипеть – это будет 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 всём пути ее следования она будет зародышем пузырьков, и жидкость будет вскипать вдоль траектории частицы (образуется след из пузырьков газа).

Уравнение Ван-дер-Ваальса позволяет теоретически рассчитать критические параметры:

$$p_k = \frac{a}{27b^2}, \quad T_k = \frac{8a}{27Rb}, \quad V_{0k} = 3b, \quad V_k = v3b. \quad (47)$$

Русские ученые М.П. Авенариус, О.Э. Страус и А.И. Надеждин экспериментально измерили критические параметры для ряда веществ (1877-1886 гг.). А.Г. Столетов рассчитал их теоретически и показал, что результаты теории и эксперимента совпадают.

### 4.3. Внутренняя энергия реального газа.

#### Эффект Джоуля - Томсона

Внутренняя энергия идеального газа является функцией только температуры:  $U = f(T)$ , может быть определена следующими соотношениями:

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

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

$$U = C_v T - \frac{a}{V_0}, \quad dU = C_v dT + \frac{a}{V_0^2} dV_0. \quad (48)$$

Из формулы (48) 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

$\delta Q = dU + \delta A$ . Так как  $\delta Q = \delta A = 0$ , то  $dU = 0$ . При этом условии  $dU = C_v dT = 0$  (температура не изменяется).

Для реального газа при этих же условиях получим другой результат:  $dU = 0$ ,  $C_v dT + \frac{a}{V_0^2} dV_0 = 0$ , откуда

$$\frac{a}{V_0^2} dV_0 = -C_v dT. \quad (49)$$

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

При экспериментальной проверке (49) 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.

При этом различают положительный эффект Джоуля – Томсона (когда газ охлаждается согласно с (49)) и отрицательный эффект (газ нагревается).

Температуру, при которой эффект Джоуля – Томсона нулевой (температура не меняется), назвали точкой инверсии. Она равна  $T_{и} = \frac{2a}{Rb}$ .

Знак эффекта Джоуля – Томсона, 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 эффекта Джоуля – Томсона (рис. 14). При умеренных давлениях (не учитываются силы отталкивания) знак «+», при высоких давлениях «-».

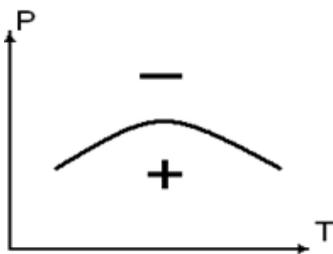


Рис. 14. Знаки эффекта Джоуля – Томсона

#### 4.4. Сжижение газов и получение низких температур

Из рис. 11 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, проблема сжижения газов сводится к проблеме получения низких температур ( $T_k(\text{N}_2) = -174\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_k(\text{O}_2) = -119\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_k(\text{H}_2) = -240\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_k(\text{He}) = -269\text{ }^\circ\text{C}$ ).

##### 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  $T_k > T_{\text{комн.}}$  (например, аммиак  $\text{NH}_3$ ), сжимая, сжижают. Затем давление снижают, жидкость кипит, отнимая тепло у другого газа (т. к.  $T_{\text{кип.}} \sim p$ ), 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 основан на положительном эффекте Джоуля – Томсона. Газ, сжатый до высокого давления и охлажденный до комнатной температуры, идет по трубе 1 в теплообменник Q (рис. 15).

В вентиле В газ адиабатически дросселируется до давления  $p \sim 1$  атм. При этом он охлаждается до температуры  $T$  (согласно формуле (49)). 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).

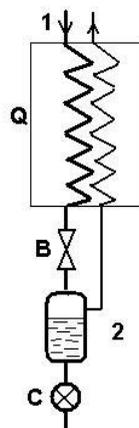


Рис. 15. Установка Дьюара - Линде

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.) Напомним, что при адиабатном процессе выполняются соотношения  $\delta Q = 0$ ,  $pdV = -C_v dT$ .

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.

Российский 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.

## Сверхнизкие температуры

Температура кипения жидкого гелия 4,21 К. Чтобы получить еще более низкие температуры, гелий заставляют кипеть под пониженным давлением, откачивая пары над ним. Этим способом удалось получить температуры  $\sim 1$  К. Более низкую температуру не получить, так как не получается 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 вследствие теплового движения.

Во внешнем магнитном поле (рис. 16) молекулы ориентируются, при этом выделяется тепло, которое забирает жидкий гелий. При размагничивании кристаллы соли охлаждаются. Этим способом получают температуру порядка 0,00001 К.

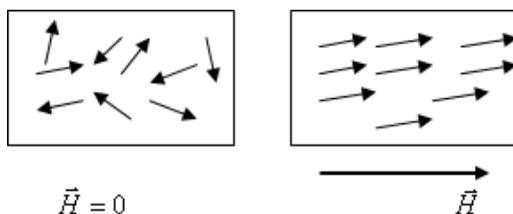


Рис. 16. Упорядочение вектора намагниченности парамагнетика

## 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  $T_{\text{кип.}} = 4,21$  К. При этой температуре все другие

газы существуют только в твердом состоянии (при атмосферном давлении). 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. ( $T = 1,19 \text{ К}$ ,  $p = 23 \text{ атм}$ ).

Одной из особенностей жидкого гелия является фазовый переход при температуре  $2,19 \text{ К}$ . Не I, существующий при  $T > 2,19 \text{ К}$ , переходит без выделения тепла в Не II, существующий при  $T < 2,19 \text{ К}$ . При этом наблюдается скачок теплоемкости (рис. 17), так называемая  $\lambda$ -точка (лямбда-точка).

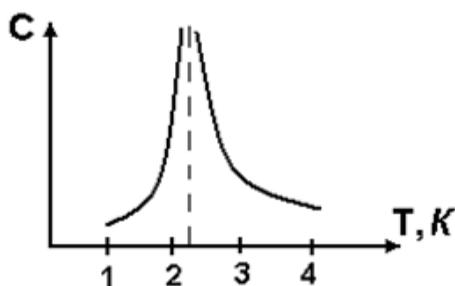


Рис. 17. Скачок теплоемкости жидкого гелия

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 Не I в Не 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.

Важнейшая особенность гелия II – сверхтекучесть. Это явление, открытое в 1938 г. академиком П.Л. Капицей, заключается в том, что жидкий He II при течении через тончайшие капилляры и щели не испытывает никакого трения (вязкость  $\approx 0$ ). Приведем значения вязкости:

$\eta$  (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  $V = \frac{\pi r^4}{8l} \frac{\Delta p}{\eta}$ , где  $V$  – объемный расход жидкости.

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 Л.Д. Ландау, и П.Л. Капица получили за свои открытия Нобелевские премии по физике.

#### 4.5. Фазовый переход I рода

По изотермам реального газа (рис. 10) 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 (то есть ни одна из фаз не растет за счет другой).

Фазовый переход – переход вещества из одного состояния (фазы) в другое. Если на изотермах (рис. 11) соединить точки перехода жидкости в пар и пара в жидкость, то получится такая диаграмма (рис. 18).

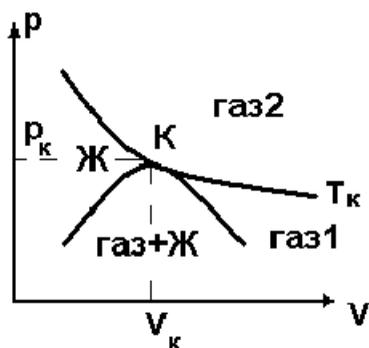


Рис. 18. Диаграмма фазовых переходов

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.

### 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. 19).

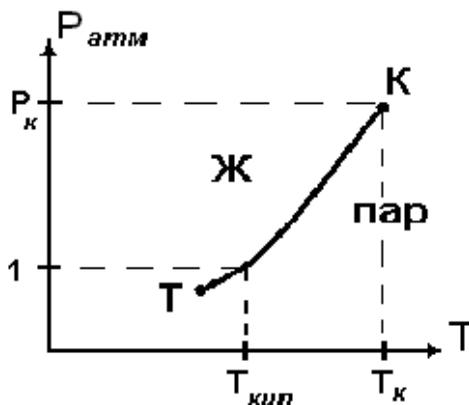


Рис. 19. Фазовая диаграмма воды

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, поэтому 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  $p = 1 \text{ атм}$   $T_{кип.} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ .

## 4.6. 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.

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T(V_2 - V_1)}. \quad (50)$$

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*.

Примечания: 1. Если в формуле (50) 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, так как  $V_2 > V_1$  (объем пара массой 1 кг всегда больше объема 1 кг жидкости).

## 5. Молекулярные явления в жидкостях

### 5.1. 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. 20). Результирующая сила притяжения, действующая на молекулу на поверхности со стороны других молекул, направлена вниз ( $F_{нов.}$ ), так как над жидкостью газ, в сфере мало молекул 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-Ваальсу равно  $p_i = \frac{a}{V_0^2}$ . Для воды это давление составляет 17 тысяч атмосфер. Поэтому вода практически несжимаема.

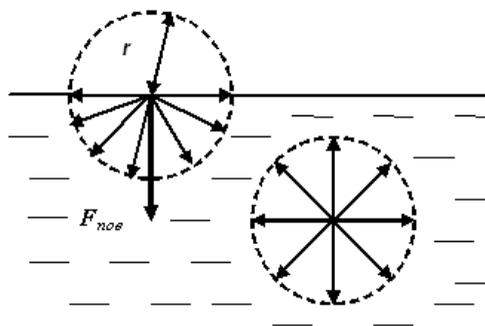


Рис. 20. Возникновение сил поверхностного натяжения

Кинетическая энергия молекул на поверхности и внутри одинакова (т. к. температура одна и та же). А потенциальная энергия молекул на поверхности больше, чем внутри ( $A_{\text{пов}} > A_{\text{вн}}$ ); это обусловлено тем, что для перемещения молекул изнутри на поверхность надо совершить работу против сил молекулярного давления. Таким образом, 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! Известен опыт Плато́, иллюстрирующий этот факт: капля анилина, помещенная в крепкий раствор 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  $\alpha = \frac{E}{S} \left( \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right)$  – коэффициент поверхностного натяжения (поверхностная энергия на единицу

площади). Этой формуле можно придать другой вид. Рассмотрим рамку с движущейся стороной  $ab$  (длиной  $l$ ), натянутую мыльной пленкой. Под действием силы поверхностного натяжения, стремящейся сократить площадь поверхности, сторона  $ab$  переместится на  $dx$  (рис. 21). Из механики известно, что сила равна производной от потенциальной энергии по координате со знаком «минус»:

$$F = -\frac{dE}{dx} = -\frac{d(\alpha dS)}{dx} = -\frac{d(\alpha l dx)}{dx} = -\alpha l, \text{ т. е. } F = -\alpha l. \quad (51)$$

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

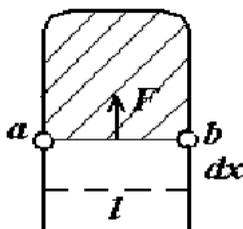


Рис. 21. Действие силы поверхностного натяжения

Из (51) следует, что  $\alpha = \frac{F}{l} \left( \frac{H}{M} \right)$  - это сила, действующая на единицу длины границы жидкости и твердого тела. Формула (51) используется для экспериментального определения коэффициента поверхностного натяжения жидкостей.

С ростом температуры коэффициент поверхностного натяжения жидкостей уменьшается. Это обусловлено увеличением объема жидкости при нагревании (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  $\text{CH}_3\text{-R-COON}$ . 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.

#### 5.2. Смачивание. Краевой угол

Рассмотрим жидкость, налитую в сосуд (рис. 22а). В точке *a* имеет место контакт трех сред: 1 – газа, 2 – жидкости, 3 – твердого тела.  $F_{31}$ ,  $F_{21}$ ,  $F_{32}$  – 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

$$\cos \Theta = \frac{\alpha_{31} - \alpha_{32}}{\alpha_{21}}. \quad (52)$$

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

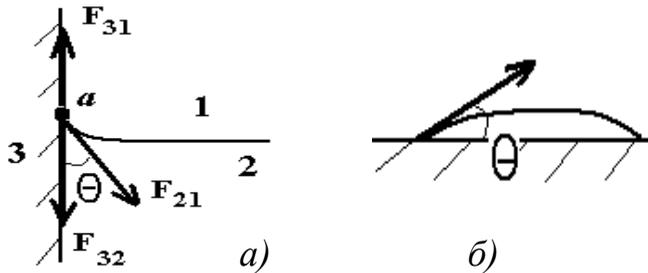


Рис. 22. Смачивание на границе жидкость – твердое тело

Состояние 1. Если  $\alpha_{31} > \alpha_{32}$ , то  $\cos\Theta > 0$ , то есть  $\Theta < \frac{\pi}{2}$  (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. 22б.

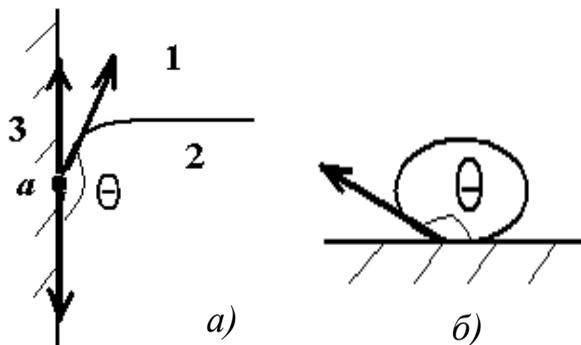


Рис. 23. Несмачивание на границе жидкость – твердое тело

Состояние 2. Если  $\alpha_{31} < \alpha_{32}$ , то  $\cos\Theta < 0$ , то есть  $\Theta > \frac{\pi}{2}$  (угол тупой), что проиллюстрировано на рис. 23а.

Это несмачивание. При полном несмачивании  $\Theta = \pi$ , при частичном ( $\frac{\pi}{2} < \Theta < \pi$ ). Капля жидкости, не смачивающая подложку, выглядит, как показано на рис. 23б.

Объяснение с помощью формулы (52) 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 (52)  $\cos\Theta$  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 такое ПАВ, 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 содержащее «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 воду с ПАВ, смачивающим породу вода попадет в микротрещины, расширится, и бурение в десятки раз облегчится.

### 5.3. Давление Лапласа

Давление в жидкости с искривленной поверхностью отличается от такового под плоской поверхностью (рис. 24). Силы поверхностного натяжения стремятся уменьшить площадь поверхности, и поскольку площадь искривленной

поверхности больше, чем плоской, 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. Определяется давление Лапласа по формуле

$$p_L = \frac{2\alpha}{R}. \quad (53)$$

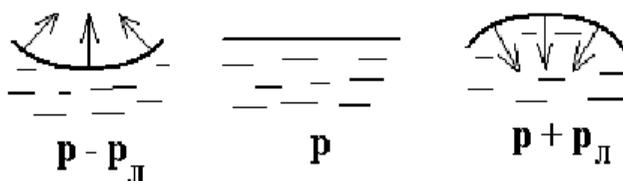


Рис. 24. Давление Лапласа

Для сферы  $R$  – радиус кривизны. Если поверхность не шаровая (рис. 25а), где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений, то, введя понятие средней кривизны, можно обобщить формулу Лапласа (53). Кривизна  $H$  – это величина, обратная радиусу.  $H = \frac{1}{R}$ .

Средняя кривизна  $H_{cp} = \frac{1}{2}(H_1 + H_2)$ . И тогда

$$p_L = \alpha \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (54)$$

Частные случаи:

1. Для сферы  $R_1 = R_2$  и из (54) получается  $p_L = \frac{2\alpha}{R}$ .

2. Если в жидкость опущены две пластины, между которыми жидкость имеет мениск (рис. 25б), то  $R_1 = R$ ,  $R_2 = \infty$  и из (54) имеем  $p_L = \frac{\alpha}{R}$ . При малом расстоянии  $d$  между пластинами  $R \approx \frac{d}{2}$ , тогда  $p_L = \frac{2\alpha}{d}$ .

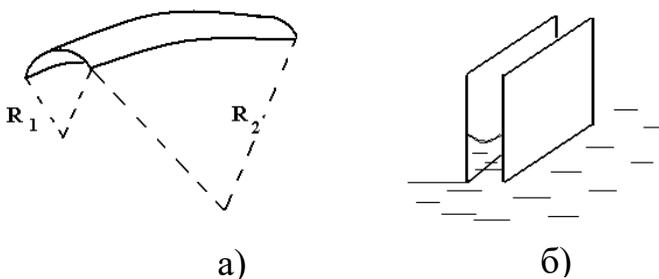


Рис. 25. Частные случаи давления Лапласа

3. У мыльного пузыря два поверхностных слоя: внешний выпуклый и внутренний вогнутый; в обоих случаях  $p_L$  направлено к центру пузыря и, так как  $R_1 \approx R_2 = R$ , то

$$p_L = \frac{4\alpha}{R}. \quad (55)$$

Объяснение вопроса «Почему для кипения жидкости нужны зародыши пузырьков воздуха?»

Жидкость закипает, когда  $p_{н.п.} = p_{вн.}$  ( $p_{вн.}$  - внешнее давление). В пузырьке на дне сосуда  $p = p_{атм} + \rho gh + p_L$ . Если радиусы зарождающихся пузырьков воздуха очень малы (жидкость чистая, стенки сосуда гладкие), то давление Лапласа может быть очень большим, и оно «захлопывает» эти пузырьки, 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.

## 5.4. Капиллярные явления

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

### 1. Капиллярное поднятие

Если капилляр, смачиваемый жидкостью, опустить в жидкость, то благодаря давлению Лапласа жидкость поднимается по капилляру на высоту  $h$  (рис. 26, а). При несмачивании – наоборот (рис. 26, б).

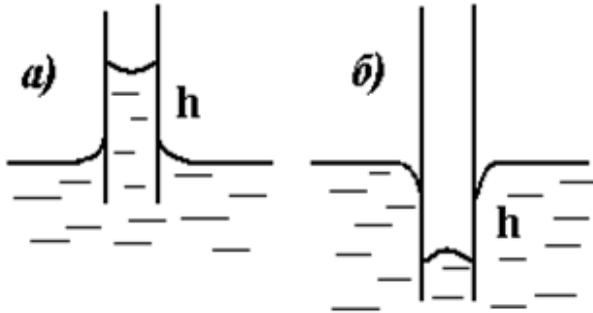


Рис. 26. Капиллярные явления:  
а) при смачивании, б) несмачивании

$$P_{\text{л}} = P_{\text{ст}}$$
$$\frac{2\alpha}{R} = \rho gh; h = \frac{2\alpha}{\rho g R}; R = \frac{r}{\cos\theta}$$
 (см. рис. 27), где  $R$  – радиус кривизны,  $r$  – радиус капилляра. Тогда можно записать формулу Жюрена

$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{\rho gr}. \quad (56)$$

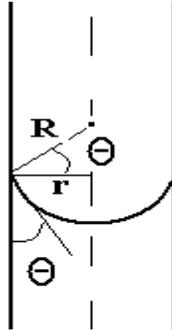


Рис. 27. К выводу формулы Жюрена

Капиллярное поднятие имеет большое значение в природе и технике:

- влага в почве поднимается к поверхности по капиллярам. Для сохранения влаги капилляры разрушают – пахуют 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 давление насыщенного пара зависит от формы мениска. Над вогнутым мениском давление насыщенного пара меньше, чем над плоской поверхностью жидкости (так как 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 (в порах 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, образуется заболоченность;
- в г. Челябинске ветры чаще северо-западные, поэтому кирпичные стены зданий с наветренной стороны могут отсыревать. Кирпич – пористое тело, и в нем может произойти капиллярная конденсация;
- способ добычи воды в пустыне: вырыть яму  $\sim 70$  см, поставить на дно ямы сосуд, накрыть яму 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 в сосуд на дне ямы.

3. Над выпуклой поверхностью  $p_{н. п.}$  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.

### **5.5. 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 так как средняя длина свободного пробега с ростом температуры увеличивается, 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

$$\eta = \frac{C}{V_0 - b}. \quad (57)$$

Формула (57) 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

$$\eta = A \cdot e^{\frac{E_n}{kT}}, \quad (58)$$

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.

## 6. Твердые тела

### 6.1. Основные понятия и законы

#### 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 является большим одиночным кристаллом. 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.

## 6.2. Классификация кристаллов по типу кристаллической решетки

1. Элементарная ячейка – минимальный объем, повторением которого можно получить весь кристалл (рис. 28). Ребра  $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$  и углы между гранями  $\alpha, \beta, \gamma$  – параметры элементарной ячейки.

Ячейка может быть:

1) простая (P) – атомы располагаются только в узлах решетки;

2) сложная:

– объемноцентрированная (J) – еще один атом в центре ячейки,

– гранецентрированная (F) – добавляется атом на гранях,

– базоцентрированная (C) – имеется по дополнительному атому на верхней и нижней гранях.

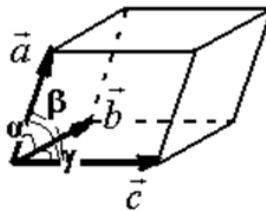


Рис. 28. Элементарная ячейка

2. 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  $n$ -го 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, так как нельзя плотно заполнить плоскость пятиугольниками – будут дыры, поэтому Дж. Бернал 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.

### 3. Основные кристаллические системы

По форме ячейки и по ее заполнению все кристаллы делятся на 7 кристаллографических систем (сингоний), представляемых 14 решетками (так называемые решетки Бравэ), представленных в таблице 2.

Таблица 2

Характеристики кристаллических систем

№	Система	Параметры элементарной ячейки	Число решеток	Решетка
1.	Триклинная	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma$	1	P
2.	Моноклинные	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90^\circ$	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,

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

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

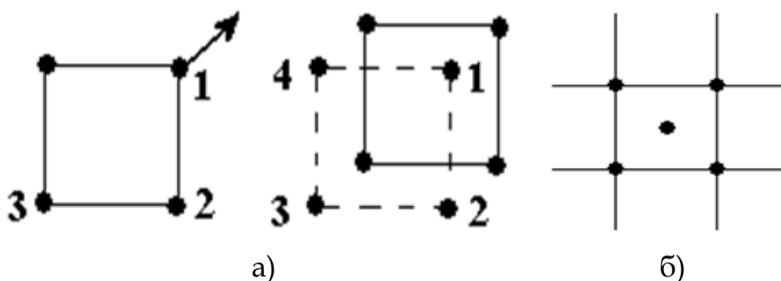


Рис. 29. Определение числа атомов в ячейке:  
а) сдвиг по диагонали; б) расчет

Например: 1) найти число атомов в простой плоской квадратной ячейке методом сдвига (рис. 29а). 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. 29б).

$N = 1 + 4 \cdot \frac{1}{4} = 2$ . 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  $\frac{1}{4}$ .

6. Полиморфизм – одно и то же вещество (вид атомов) может иметь разные кристаллические решетки, например: алмаз (кубическая) и графит (гексагональная); белое олово

(тетрагональная) – мягкий пластический материал, используемый для пайки, и серое олово (кубическая) – серый порошок.

7. 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.

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

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  $T_{пл.} = 800$  °С, а у CaO  $T_{пл.} = 2570$  °С). Не проводят электрический ток, в растворах и расплавах – проводят (носители тока – ионы).

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. 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.

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  $CO_2$ ), лед ( $H_2O$ ), парафин.

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.).

#### **6.4. 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) – добавляется лишняя плоскость или плоскость построена 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.

## 6.5. 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. При введении в него 1 атома бора (В) на миллион атомов германия – получим полупроводник *p*-типа (носители положительные «дырки»), а при введении 1 атома 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 внутренняя структура становится более совершенной.

## 6.6. Плавление и кристаллизация

При нагревании твердые тела плавятся. Кривые нагрева  $T = f(t)$  для кристаллических (1) и аморфных (2) тел отличаются (рис. 30). Участок *ab* – нагревание твердого тела, *bc* – плавление, на этом участке все подводимое тепло

(удельная теплота плавления  $L$  (Дж/кг)) идет на разрушение кристаллической решетки (на разрыв связей), поэтому  $T_{пл.} = const$ , участок  $cd$  - нагрев жидкой фазы.

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

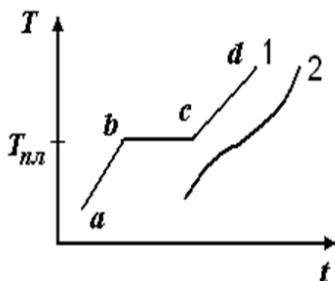


Рис. 30. Кривые нагрева кристаллического и аморфного тел

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

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T(V_2 - V_1)}. \quad (59)$$

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. 31, кривая 1). Кривая 1 означает, что для большинства веществ  $T_{пл.} \sim p$ .

Для некоторых веществ (аномальных - вода, чугун)  $V_1 > V_2$  и кривая плавления для них имеет отрицательный наклон, то есть  $T_{пл.} \sim \frac{1}{p}$  (рис. 31, кривая 2). Эта аномалия для воды имеет огромное значение. Благодаря этой аномалии существует жизнь на Земле. Если бы у воды было  $T_{пл.} \sim p$ ,

то водоемы замерзали бы до дна, живых организмов в океане бы не было, и Земля была бы ледяным шаром.

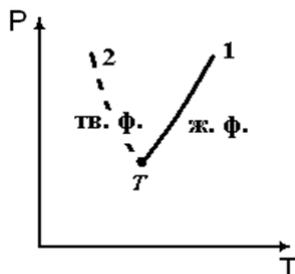


Рис. 31. Кривые плавления

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

## 6.7. 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 4 000 °С переходит в газообразное состояние; 3) сухой лед (CO<sub>2</sub>) при -50 °С испаряется.

Уравнение Клапейрона – Клаузиуса для сублимации имеет вид:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T(V_2 - V_1)}. \quad (60)$$

Здесь  $r$  – удельная теплота сублимации (Дж/кг),  $V_2$  и  $V_1$  – удельные объемы газообразной и твердой фазы, и, так как  $(V_2 - V_1)$  велико, наклон кривой сублимации мал (рис. 32).

Так как  $r$  характеризует переход твердой фазы в газообразную,  $L$  – твердой в жидкую, а  $\lambda$  – жидкой в газообразную,

$$r = L + \lambda. \quad (61)$$

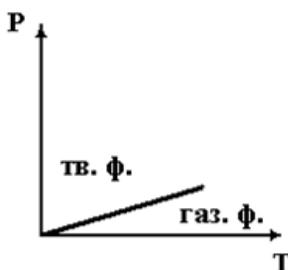


Рис. 32. Кривая сублимации

### 6.8. Тройная точка. Полиморфизм

Если на одной диаграмме изобразить кривые сублимации, плавления и кипения, то, имея разный наклон, они пересекутся в так называемой тройной точке  $T$  (рис. 33). Тройная точка – это точка пересечения линий фазового равновесия, характеризуемая  $T_m$  и  $p_m$ , при которых все три фазы находятся в равновесии. Фактически на рис. 33 изображена фазовая диаграмма (диаграмма состояния вещества), она определяет область температур и давлений, при которых устойчивой является та или иная фаза.

Знание фазовой диаграммы для каждого вещества имеет большое значение. Примеры:

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



Рис. 33. Фазовая диаграмма состояний вещества

2. Более сотни лет среди ученых шла так называемая алмазная лихорадка – попытки превратить графит в алмаз. Но эти попытки не имели успеха, т. к. диаграмма состояния углерода была неизвестна. Было известно следующее: при  $4\ 000\ ^\circ\text{C}$  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. 34).

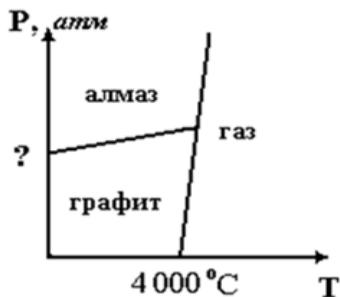


Рис. 34. Фазовая диаграмма углерода

В 1939 г. академик А.И. Лейпунский теоретически рассчитал эту величину, после чего 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. Первая из них – мягкое железо (ОЦК-2 – объемноцентрированная кубическая решетка с 2 атомами в ячейке). Вторая – твердое железо (ГЦК-4). Возможен переход  $\alpha \xrightarrow{910^\circ\text{C}} \gamma$ . 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 остается твердым при обычных температурах;

4) лед имеет 8 разных структур. Например, лед-V существует при давлении  $p = 6\,000$  атм, температуре  $T = 80^\circ\text{C}$  (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.

## 6.9. Тепловые свойства твердых тел

### 1. Тепловое расширение

Объем и линейные размеры твердых тел при нагревании растут пропорционально температуре:

$$L = l_0(1 + \alpha\Delta t), \quad (62)$$

$$V = V_0(1 + \beta\Delta t). \quad (63)$$

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 относительному изменению длины и объема при нагревании на  $1$  градус.

$\alpha \approx 10^{-5} - 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ,  $\beta = a_1 + a_2 + a_3$ , где  $a_i$  - коэффициенты линейного расширения по соответствующим осям. Для кубической структуры  $\beta \approx 3\alpha$ .

Причина теплового расширения - ангармоничность 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  $F = -ax$ ,  $|\bar{x}| = \frac{\bar{F}}{a}$ ,  $\bar{F} = 0$ ,  $\bar{x} = 0$ , то есть 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 (62) и (63).

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

Так как изменения объема твердых тел невелики, вторым слагаемым можно пренебречь, и тогда для молярной теплоемкости можно записать формулу

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

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. Классическая теория теплоемкости твердых тел объяснила этот факт. Внутренняя энергия 1 моль твердого тела может быть записана  $U = 3N_A \cdot \bar{E}$ , где 3 - число колебательных степеней свободы,  $\bar{E}$  - средняя энергия, приходящаяся на 1 степень свободы колебательного движения ( $kT$ ). Тогда  $U = 3N_A \cdot kT = 3RT$ ;  $C = \frac{dU}{dT} = 3R \approx 25 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ .

Казалось бы, все хорошо, но опыты при низких температурах показали, что это не так (рис. 35).

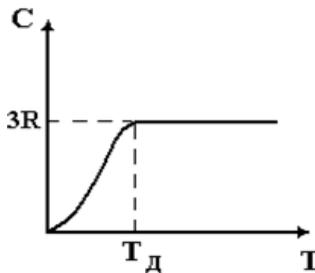


Рис. 35. Зависимость теплоемкости твердого тела от температуры

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  $C = 3R$ , в квантовой теории энергия осциллятора (колеблющегося атома) определяется формулой, которую предложил М. Планк (1900 г.):

$$\bar{E} = \frac{h\nu}{e^{kT/h\nu} - 1}, \quad (64)$$

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

Из формулы Планка вытекает закон Дюлонга и Пти при высоких температурах. (Это одно из проявлений принципа преемственности: всякая новая теория содержит старую как частный случай, указывая тем самым границы ее применимости.) При высоких температурах  $kT \gg h\nu$ ,  $\frac{h\nu}{kT} \ll 1$  (из разложения в ряд  $e^x \approx 1 + x$  при  $x \ll 1$ ). Тогда из формулы (64)  $\bar{E} = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{kT} - 1} = kT$  следует закон Дюлонга – Пти.

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

## 7. Газодинамика

### 7.1. Основные понятия и законы

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. Так как движение относительно, выбор системы отсчета (тело или жидкость) не имеет значения. Чаще считают тело покоящимся и говорят «на тело набегаёт поток».

Таким образом, газодинамика – это гидродинамика сжимающейся жидкости, то есть 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.

#### 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.

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

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

$$\rho S v = \text{const или } \rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2. \quad (65)$$

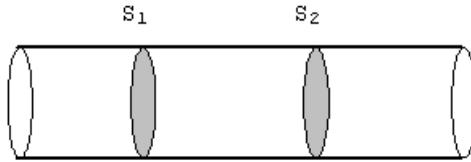


Рис. 36. К уравнению неразрывности струи

Доказательство: пусть в трубе (рис. 36)  $G_1 > G_2$ . 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, то есть повышаются давление и плотность, 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:

$F_1 - F_2 = \frac{dmv_2 - dm v_1}{dt}$ , где  $F_1 = p_1 S_1$ ,  $F_2 = p_2 S_2$  - силы давления в сечениях  $S_1$  и  $S_2$ , учитывая, что  $\frac{dm}{dt} = \rho S v$ , а также (65), получим

$$p_1 S_1 - p_2 S_2 = \rho_2 S_2 v_2^2 - \rho_1 S_1 v_1^2, \text{ или}$$

$$S_1 (p_1 + \rho_1 v_1^2) = S_2 (p_2 + \rho_2 v_2^2). \quad (66)$$

Полученное уравнение называют уравнением импульса для потока идеальной сжимаемой жидкости (то есть газа).

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

Рассмотрим поток газа по трубе АВ (рис. 37). С – техническое устройство, преобразующее энергию потока в работу (турбина) или сообщаемое потоку энергию за счет работы, подводимой извне (компрессор).

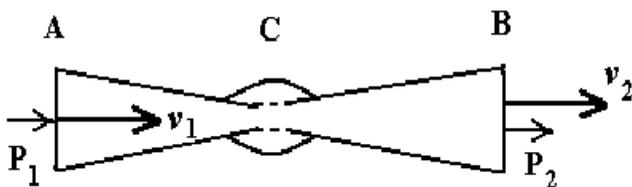


Рис. 37. Движение газа в трубе

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

$$Q = \Delta U + \Delta E + A_p + A_{техн.} + A_{тр.}, \text{ где } \Delta U = U_2 - U_1,$$

$$\Delta E = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}, A_p = p_2 V_2 - p_1 V_1.$$

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

$$Q = H_2 - H_1 + \Delta E + A_{техн.} + A_{тр.} \quad (67)$$

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 ( $Q = 0$ ), и, кроме того, изменением энергии ( $\Delta E$ ) отработанных газов можно пренебречь, тогда при отсутствии трения ( $A_{тр.} = 0$ ) получается, что  $A_{техн.} = -\Delta H = H_{нач} - H_{выхл.}$ , то есть работа определяется убылью энтальпии.

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

$$A_{\text{техн}} = - \int_1^2 V dp. \quad (68)$$

Учитывая геометрический смысл работы, можно отметить, что  $A_{\text{техн}}$  можно определить как площадь под графиком адиабаты (рис. 38).

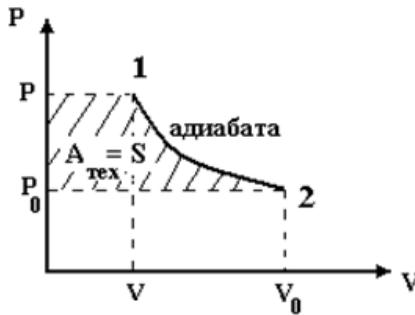


Рис. 38. Геометрический смысл работы

## 7.2. Адиабатное течение газа

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

$$H_1 + \frac{mv_1^2}{2} = H_2 + \frac{mv_2^2}{2}. \quad (69)$$

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 обледеневает; 2) зимой в карбюраторе ДВС (если идет забор холодного воздуха) в диффузоре конденсируется вода и двигатель глохнет. Вывод: воздух, идущий в карбюратор, необходимо подогревать.

Для единицы массы из уравнения (69), учитывая, что  $U = C_V T$  и  $pV = RT$ , имеем,

$$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) = H_1 - H_2 \approx C_p(T_1 - T_2). \quad (70)$$

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 (70), получим

$$\frac{1}{2}(v_2^2 - v_1^2) = C_p T_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right) = C_p T_1 \left[1 - \left(\frac{\rho_2}{\rho_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right].$$

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

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

где показатель политропы  $C_p = \frac{\gamma R}{\gamma-1}$ .

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

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 (70)

$$\frac{1}{2}(v_1^2 - v_2^2) = H_2 - H_1 = C_p(T_2 - T_1).$$

При полном торможении  $v_2 = 0$ , и тогда  $\frac{H_2}{H_1} = 1 + \frac{v_1^2}{2H_1}$ ,  
 $H_1 = C_p T_1 = \frac{\gamma R T_1}{\gamma - 1} = \frac{c^2}{\gamma - 1}$ .

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

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{T_2}{T_1} = \frac{\gamma - 1}{2} M^2. \quad (71)$$

Формула (71) позволяет вычислить относительные изменения температуры для различных  $M$  (см. табл. 3). По уравнению Пуассона можно рассчитать отношение давлений в состояниях 2 и 1.

Таблица 3

Относительные изменения

$M$	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

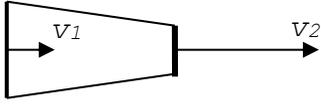
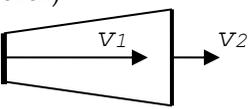
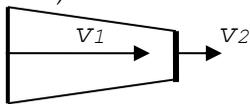
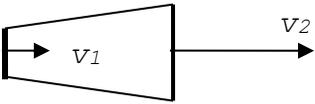
Соплом называется труба переменного сечения, преобразующая внутреннюю энергию потока газа в кинетическую. Главная задача – определить профиль сопла, чтобы  $v \rightarrow v_{max}$ .

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

Для газа результат для  $M < 1$  и  $M > 1$  различен. Из уравнений (65) и (67) в форме (69) можно вывести  $\frac{\Delta v}{v} (1 - M^2) = -\frac{\Delta S}{S}$ , 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. табл. 4).

Таблица 4

## Использование сопел разной формы

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

Сопло Лаваля служит для получения сверхзвукового потока (рис. 39). Дозвуковой поток в сужающейся части достигает скорости звука  $c$ , а в расширяющейся части скорость еще сильнее растет.

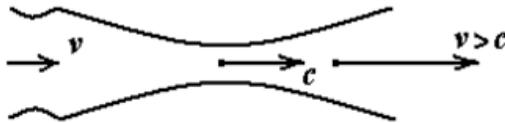


Рис. 39. Сопло Лаваля

## 7.3. 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. 40). При этом  $l = vt$  – путь, пройденный телом за время  $t$ .  $R = ct$  – радиус сферической волны.

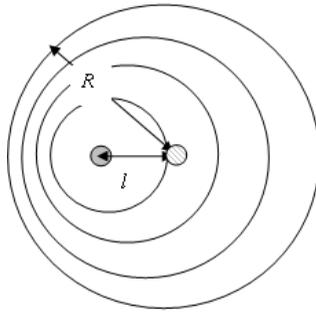


Рис. 40. Фронт волны при  $M < 1$

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. 41). Угол раствора конуса определяется выражением  $\sin \alpha = \frac{R}{l} = \frac{c}{v} = \frac{1}{M}$ .

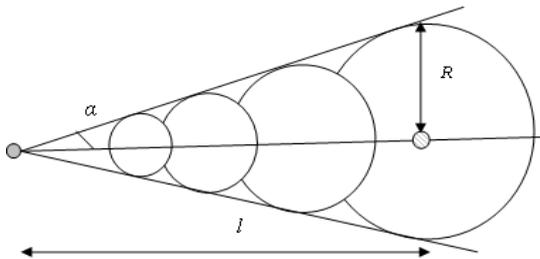


Рис. 41. Фронт волны при  $M > 1$

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. 42).

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.

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

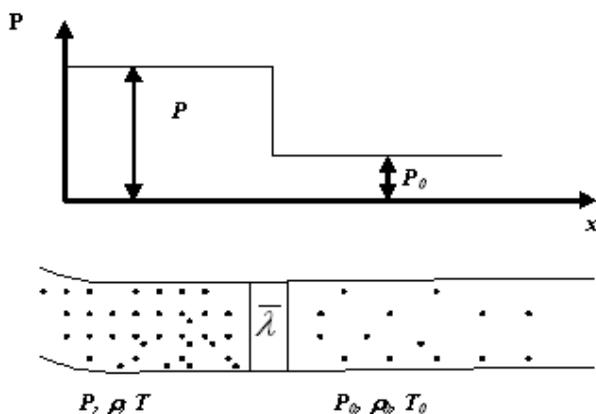


Рис. 42. Скачкообразное изменение параметров

Из основных уравнений газодинамики можно получить уравнение (72) ударной адиабаты (уравнение Гюгонио), которое можно также представить на графике (рис. 43).



Рис. 43. Отличие ударной адиабаты от изотермы и адиабаты Пуассона

$$\frac{P}{P_0} = \frac{\frac{(\gamma+1)\rho}{(\gamma-1)\rho_0} - 1}{\frac{(\gamma+1)\rho}{(\gamma-1)\rho_0}}. \quad (72)$$

Формула (72) 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.

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. 44).

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



Рис. 44. Различия в начальном и конечном состояниях газа

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 4 000 °С). Необходимо точно рассчитать угол входа аппарата в атмосферу, чтобы обеспечить нужное для мягкой посадки торможение в заданных пределах перегрузок и перегрева.

#### 7.4. Реактивные двигатели

Основной элемент реактивного двигателя – сопло Лавалю, используемое для получения максимальной скорости газа. Возникает реактивная сила, равная ежесекундному приросту импульса вытекающего газа.

Когда давление в вытекающей струе  $p$  (на выходе из сопла) будет больше противодавления среды, реакция

газовой струи дополняется импульсом этих неуравновешенных сил давления:

$$R = G(v_2 - v_1) + S_2(p_2 - p_1), \quad (73)$$

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).

Идея работы прямоточных ВРД такова: в зоне 1 (рис. 45) 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 Лавала 3, где ускоряется до  $v > c$ , и из сопла выходит сверхзвуковой поток. Прямоточные ВРД просты, очень надежны, но работают только при  $v > c$ , поэтому для достижения летательным аппаратом скорости  $v > c$  на начальной стадии используют стартовые ракеты.

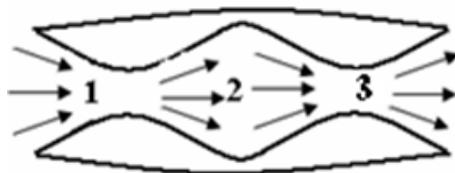


Рис. 45. Схема прямоточного воздушного реактивного двигателя

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 жидкостные (ЖРД), имеющие камеры сгорания с форсунками, запальное устройство, сопло и компрессор.

## **8. Самоорганизующиеся системы**

### **8.1. Основные понятия**

Термодинамика, которую мы рассматривали до сих пор, изучает изолированные системы, процессы – равновесные или квазистатические (с очень медленными изменениями) 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, то есть усложнение организации в процессе эволюции. Более того, 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 неравновесной термодинамики:

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

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

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).

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, поэтому их экстраполяция невозможна.

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

Хаос – отсутствие порядка.

Самоорганизация – процесс рождения структуры из хаоса, протекающий самопроизвольно.

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

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

## 8.2. Самоорганизующиеся системы

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

$$J = -kx. \quad (74)$$

В применении к указанным выше процессам поток  $J$  можно представить следующим образом:

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

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 «-» в формуле (74) означает, что поток направлен против градиента.

Пока уравнение (74) 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. 46. Здесь АВ – линейная область, ВС – нелинейная область, С – точка бифуркации, 1 и 2 – разные пути дальнейшего поведения системы.

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  $R_e = \frac{\rho r v}{\eta}$ . Объяснение дал Л.Д. Ландау (1944 г.): при малых числах Рейнольдса ( $R_e$ ) (например, при малых скоростях  $v$ ) 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.

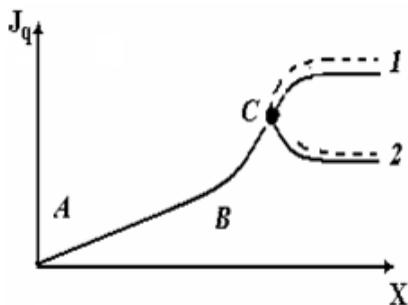


Рис. 46. Идея самоорганизующихся систем

Л.Д. Ландау предположил, что при непрерывном росте  $Re$  интервалы между числами Рейнольдса  $Re$ , 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 для прогнозирования погоды, развития океанологии, изучения физики атмосферы. Так как большая часть Вселенной заполнена средой, находящейся в турбулентном движении, интенсивно развиваются физика планет и астрофизика.

2. Ячейки Бенара. Если слой жидкости сильно нагревать снизу, то при больших разностях температур ( $\Delta T$ ) градиент становится инверсным, так как жидкость внизу имеет меньшую плотность (тепловое расширение), чем вверху (рис. 47). Под влиянием сил тяжести и Архимеда такая система оказывается неустойчивой, так как «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.

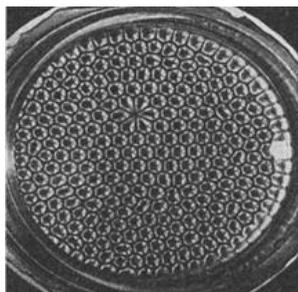
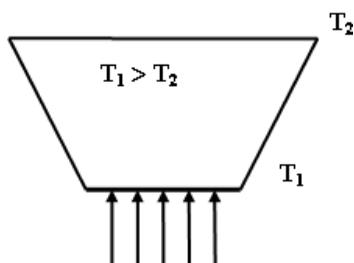


Рис. 47. Ячейки Бенара

При критической разности температур ( $\Delta T_{кр.}$ ) возникает конвективный поток, обладающий характерной структурой в виде шестиугольных ячеек (рис. 47). 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. 48).

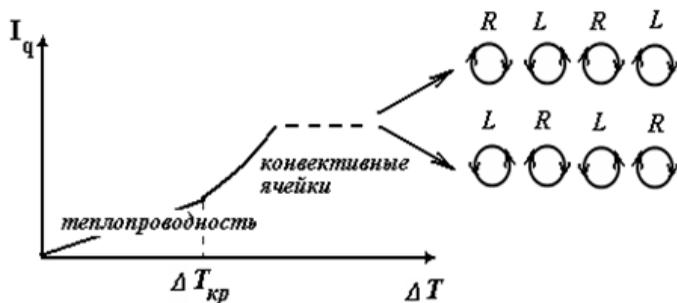


Рис. 48. Конвективные ячейки

Система обменивается со средой только теплом и в стационарных условиях получает (при  $T_1$ ) столько тепла, сколько отдает (при  $T_2 < T_1$ ), поэтому система отдает энтропию среде ( $\Delta S = \frac{g}{T_1} - \frac{g}{T_2} < 0$ ). 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 ( $T_1 = 6\,000\text{ К}$ ) и уходит от Земли в космическое пространство при  $T_2 = 300\text{ К}$ . Если 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. 49).

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, во-вторых, мощное излучение. Зависимость интенсивности излучения от мощности накачки имеет вид, аналогичный представленному на рис. 45. Таким образом, в лазере наблюдается самоорганизация.

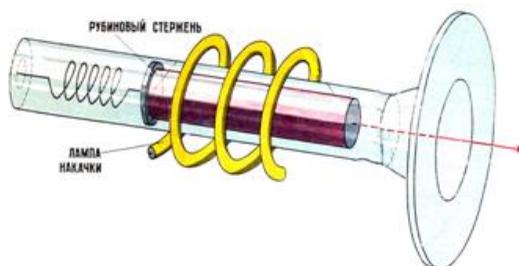


Рис. 49. Рубиновый лазер

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

Все неравновесные фазовые переходы связаны с диссипацией, то есть с производством энтропии. Поэтому они возможны лишь в открытых системах, где поток негэнтропии

из окружающей среды компенсирует производство энтропии внутри системы. (Поэтому такие системы И.Р. Пригожин называл 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 компании «Хадсон Бей», проводившей наблюдения более 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 – Вольтерры, рис. 50).

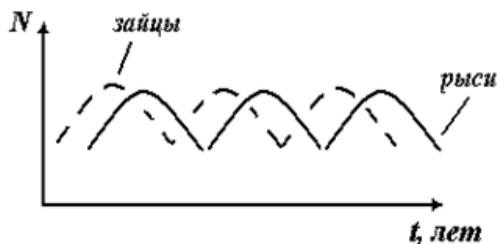


Рис. 50. Модель хищник – жертва

6. В химии известна реакция Белоусова – Жаботинского, которая представляет собой пример временной и пространственной упорядоченности. Под этой реакцией 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.

## ОПИСАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1 **Измерение температуры**

*Цели работы:* 1) научиться измерять температуру контактным жидкостным термометром;

2) проверить реперные точки термометра.

*Приборы и оборудование:* термометр, электроплитка, колба с водой, сосуд для льда или снега, штатив.

#### **Метод измерения**

Температура – один из важнейших параметров, определяющих тепловое состояние тела (системы). Определение температуры основывается на понятии термического равновесия.

Температура – термодинамическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. Термодинамическим равновесием называют такое состояние системы, при котором прекращаются всякие макроскопические изменения во времени при отсутствии внешних воздействий. Система, не обменивающаяся энергией с внешними телами, называется

изолированной. Повседневный опыт показывает, что в изолированной системе с течением времени установится термодинамическое равновесие. На основании этого, в учении о тепловых процессах введена первая аксиома, которую называют нулевым началом термодинамики:

**Изолированная система с течением времени приходит в равновесное состояние, при котором в ней всюду будет одна и та же температура и из которого система не может самопроизвольно выйти.**

С точки зрения молекулярно-кинетической теории температура определяется средней кинетической энергией движения молекул. Выравнивание температуры при контакте двух тел (установление термодинамического равновесия) микроскопически означает выравнивание кинетических энергий молекул, из которых состоят эти тела.

Из нулевого начала термодинамики следует, что если две системы  $A$  и  $B$  находятся в тепловом равновесии с третьей системой  $C$ , то системы  $A$  и  $B$  имеют одинаковую температуру. На этом основано измерение температуры. Третья система  $C$  может служить термометром, который градуируется, например, с помощью системы  $A$ . Проградуированный термометр может использоваться для измерения температуры других тел.

В любом термометре есть тело (термометрическое тело), зависимость одного из свойств которого от температуры легко измеряется. Для определения температурной шкалы можно использовать зависимость от температуры объемов, давлений, длин, электросопротивлений и т. д. В зависимости от этого различают следующие приборы для измерения

температуры: газовый термометр, жидкостный термометр, электрический термометр сопротивления, термопары и др.

Наибольшее распространение в быту получили жидкостные термометры. В них термометрическим телом является жидкость, а температурным параметром – ее объем. Область их применения от  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чаще всего используют следующие жидкости: пентан ( $-200\dots +20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), этиловый спирт ( $-80\dots +80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), толуол ( $-80\dots +100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) и ртуть ( $-30\dots +600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Для повышения точности измерения температуры применяются так называемые укороченные термометры, у которых шкала рассчитана на небольшое число градусов. Цена наименьшего деления шкалы таких термометров может равняться сотой доле градуса.

#### *Особенности измерения температуры термометром*

1. На основе изложенного выше сформулирован ряд правил, которыми необходимо руководствоваться при измерении температуры термометром:

- необходимо обеспечить хороший тепловой контакт термометра и тела, температура которого измеряется. Для газов и жидкостей это достигается легко, путем погружения термометра в данную среду. В случае с твердыми телами следует принять какие-либо меры для обеспечения теплового контакта;

- необходимо правильно определить глубину погружения термометра в измеряемую среду. Она должна быть равна глубине погружения термометра при его градуировке на заводе. Эта глубина или ясна из формы термометра, или указывается на оборотной стороне шкалы;

- отсчет показаний термометра снимается не сразу, а только после того, как установится тепловое равновесие, о чем можно судить по неизменности показаний термометра.

2. Особую трудность представляет измерение непрерывно изменяющейся температуры среды, например, при нагреве. В этом случае из-за тепловой инерции термометр показывает температуру ниже температуры среды, а при охлаждении – наоборот. Чтобы уменьшить это расхождение, на практике выработано несколько приемов:

- снимают показания при нагреве и охлаждении и результаты усредняют;

- нагрев производят ступенями, то есть фиксируют некоторые температуры через равные интервалы (регулируя поступление тепла) и в эти моменты производят замер температуры;

- нагрев или охлаждение производят как можно медленнее. При этом ошибка бывает меньше, если измерения проводить при медленном охлаждении.

Чтобы избежать ошибок, связанных с перечисленными факторами, при проведении точных измерений жидкостным термометром, необходимо вводить следующие поправки:

1. Поправка на неодинаковость сечения капилляра по его длине.

2. Поправка на температуру выступающего столбика.

3. Поправка на термическое последствие стекла.

4. Поправка на так называемый «мертвый ход» (сопротивление при движении ртути вследствие трения) и т.д. «Мертвый ход» обычно устраняют перед отсчетом легким встряхиванием термометра резиновым молоточком.

Учесть все поправки на практике достаточно сложно, поэтому обычно проводится сравнение показаний данного термометра с показаниями образцовых, а также проверка термометра по точкам плавления льда и кипения воды (т. н. реперные точки). Последний метод используется в настоящей работе.

#### *Задания для подготовки к работе*

1. Определите цену деления термометра.
2. Определите глубину погружения термометра в измеряемую среду.
3. Определите атмосферное давление с помощью барометра.

#### *Задания для выполнения работы*

1. Проверьте точку нуля термометра.

Воронкообразный сосуд наполнить чистым снегом или мелко истолченным льдом, смоченным чистой водой. В эту смесь погрузить термометр на необходимую глубину. Сделать отсчет точки нуля ( $a$ ), дождавшись достижения термодинамического равновесия термометра и смеси. Повторите измерения через 3–5 минут.

2. Проверьте точку  $100^\circ$  термометра.

Поместите термометр в сосуд с кипящей водой так, чтобы шарик термометра находился на несколько сантиметров выше уровня воды. При этом часть термометра, необходимая для погружения, должна целиком находиться в парах кипящей воды. Температуру кипения воды ( $t_k$ ) определите по таблице зависимости температуры кипения

от атмосферного давления. После достижения термодинамического равновесия термометра и паров кипящей воды произведите отсчет точки кипения (b). Повторите измерения через 3–5 минут. Запишите полученные значения в таблицу.

3. Определите истинную цену деления термометра по формуле (1.1).

$$k = \frac{t_k}{b-a}. \quad (1.1)$$

Значение истинной температуры для любого деления шкалы будет определяться по формуле

$$t_n = \frac{t_k}{b-a} (n - a). \quad (1.2)$$

По формуле (1.2) вычислите истинную температуру для следующих делений термометра  $n$ : 0, 10, 20, 30, ..., 100, а также поправки  $t_n - n$  для этих же делений. Результаты расчетов  $t_n$  и  $t_n - n$  занесите в таблицу для всех вышеуказанных значений  $n$ . По данным таблицы постройте график зависимости  $t_n - n = f(n)$ .

#### *Вопросы для допуска к работе*

1. Объясните, чем обусловлены правила работы с термометром, описанные в п. 1 теоретической части работы.

2. Сформулируйте условия, которые необходимо соблюсти для правильного измерения температуры контактным термометром. Какое из условий выполнить сложнее и почему?

3. Для чего нужен график зависимости  $t_n - n$  от  $n$ ?

4. Оцените точность измерения температуры термометром.

### *Вопросы для защиты работы*

1. От каких параметров зависит чувствительность термометра? Приведите соответствующую формулу. Представьте, что у вас имеется два одинаковых термометра, но в первом в качестве термометрического тела используется ртуть, во втором – спирт. Как соотносится чувствительность термометров?

2. Что такое термометрическое тело? Какие термометрические тела вы знаете? Почему в районах крайнего севера отдают предпочтение спиртовым термометрам, а не ртутным?

3. Какова была цена деления термометра, использованного в вашей работе? Что использовалось в качестве термометрического тела?

4. Что означает фраза «поправка на температуру выступающего столбика»?

5. Что такое тепловая инертность? Приведите примеры тел с разной тепловой инертностью. При каких измерениях этот параметр важен?

6. Какие еще способы измерения температуры вы знаете? Можно ли измерить температуру тела бесконтактным способом? Если да, то каким образом?

7. Макроскопические и микроскопические параметры. Что это такое? Приведите примеры.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

**Определение термического коэффициента  
давления газа при помощи  
газового термометра**

*Цели работы:* 1) научиться пользоваться газовым термометром;

2) определить термический коэффициент давления воздуха.

*Приборы и оборудование:* газовый термометр, сосуд с водой, электроплитка, термометр.

**Метод измерения**

Давление данной массы газа при постоянном объеме линейно растет с температурой (закон Шарля):

$$p = p_0(1 + \alpha t), \quad (2.1)$$

где  $\alpha$  – термический коэффициент давления газа, который численно равен относительному изменению давления на один градус, то есть

$$\alpha = \frac{p-p_0}{p_0 t},$$

где  $p_0$  – давление при  $0^\circ\text{C}$ .

Соотношение (2.1) можно использовать для экспериментального определения термического коэффициента давления  $\alpha$ . Для этого необходимо измерить давление  $p$  газа при различных температурах  $t$ , соблюдая при этом условие постоянства массы и объема газа.

Газовый термометр (рис.) состоит из стеклянного баллона 1, соединенного узкой трубкой 2 с левым коленом открытого манометра. Левое и правое колена манометра соединены резиновой трубкой 5. Правое колено манометра

можно перемещать вдоль шкалы 6 и закреплять на различной высоте винтом 7. Кран 4 служит для соединения левого колена с атмосферой. Обычно в манометр газового термометра заливается ртуть. В нашей установке используется вода 8, в связи с тем, что пары ртути ядовиты.

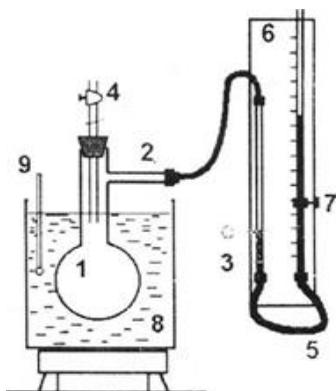


Рис. Газовый термометр

### *Задания для подготовки к работе*

Ответьте на вопросы:

1. Что такое изопроцесс? Изохорный процесс? Сформулируйте закон изохорного процесса.
2. При каких условиях справедлив закон Шарля? Как в данной установке можно выполнить указанные условия?
3. Изобразите графически зависимость давления газа от температуры (при  $V = const$ ) в координатах  $p, t$  и  $p, T$ . Как из экспериментального графика в координатах  $p, t$  можно определить значение  $p_0$ ?
4. Получите из уравнения Менделеева – Клапейрона соотношение, выражающее закон Шарля.
5. Как устроен водяной манометр?

6. Опишите работу газового термометра. Какую роль играет кран 4? Можно ли его открывать в процессе проведения эксперимента?

*Задания для выполнения работы*

1. Измерьте зависимость давления воздуха в колбе 1 от температуры в интервале от комнатной температуры до 40 °С.

Для измерения давления сначала необходимо при комнатной температуре установить уровень воды в левой трубке манометра 3 на нуль шкалы (за нуль можно принять любое деление шкалы) и закрыть кран 4. Затем включить электроплитку и, выждав некоторое время (когда воздух в сосуде нагреется на два градуса), снять отсчет давления по шкале манометра. При отсчете правое колено следует поднимать до тех пор, пока уровень воды в левом колене не установится на нуле (на начале отсчета). Давление газа  $p$  в колбе 1 при температуре  $t$  будет определяться соотношением

$$p = p_a + \rho gh, \quad (2.2)$$

где  $p_a$  – атмосферное давление,  $\rho$  – плотность воды,  $h$  – высота поднятия воды в правом колене манометра. Давление лучше выразить в одинаковых единицах (например, в Па).

После первого отсчета давления нужно выполнять измерения через каждые 2 градуса (не забывая при отсчете поддерживать уровень воды в левом колене манометра на нулевой отметке) до 40° С.

Сразу после последнего отсчета выключить плитку, вынуть колбу 1 из воды, опустить правое колено до начального положения и открыть кран 4 (иначе вода из манометра при охлаждении воздуха в колбе проникнет внутрь неё и прибор придет в негодность). По формуле (2) нужно определить

давление воздуха при разных температурах и результаты занести в таблицу. По данным таблицы построить график зависимости  $p = f(t)$ . График начертить на отдельном листе миллиметровой бумаги.

2. Определите термический коэффициент давления воздуха.

Как видно из формулы (2.1) и построенного графика, зависимость  $p$  от  $t$  является линейной  $p = p_0 + p_0 \alpha t$ .

Следовательно, тангенс угла наклона прямой в координатах  $p, t$  будет равен:  $tg \varphi = \frac{\Delta p}{\Delta t}$ , откуда

$$\alpha = \frac{tg \varphi}{p_0}. \quad (2.3)$$

Значение  $p_0$  можно определить путем экстраполяции графика до  $t = 0$  °С.

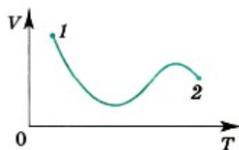
#### *Вопросы для защиты работы*

1. С какой целью перед отсчетом поднимают правое колено манометра?

2. Какова размерность получаемого из графика тангенса угла наклона прямой ( $tg \varphi$ )?

3. Каков физический смысл коэффициента  $\alpha$ ? Какова его размерность?

4. Как изменяется давление газа при переходе из состояния 1 в состояние 2 (масса газа в процессе перехода не изменяется)?



5. Изобразите, как выглядела бы экспериментальная зависимость  $p = f(T)$ , если бы в процессе измерений правое колено манометра не поднималось?

6. Какое теоретическое значение имеет термический коэффициент давления для идеального газа?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

### Определение плотности сыпучих тел

*Цели работы:* 1) научиться измерять объем сыпучих тел с помощью волюмометра;

2) измерить плотность риса.

*Приборы и оборудование:* технические весы, волюмометр, рис, гранулированный алюминий.

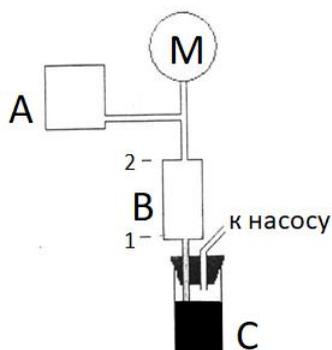
#### Метод измерения

Для определения плотности тела необходимо измерить массу тела и его объем. Для тел неправильной формы или сыпучих трудность представляет измерение объема. В таких случаях для измерения объема можно использовать прибор волюмометр, при работе с которым используется закон Бойля – Мариотта: *для данной массы газа при постоянной температуре произведение давления на объем есть величина постоянная*. Математически закон записывается так:

$$pV = \text{const}$$

при условии  $m = \text{const}$ ,  $t = \text{const}$ .

Для измерения объема гранулированного твердого тела его помещают в сосуд, объем которого известен. При этом гранулы вытесняют часть газа из сосуда. Измерив объем газа в сосуде с сыпучим твердым телом, можно найти объем, занимаемый гранулами.



Простейший волнометр (см. рис.) состоит из сосуда  $A$ , объем которого может быть известен; манометра  $M$  для измерения давления в сосуде и устройства, с помощью которого можно менять давление в сосуде  $A$ . В нашем случае это сосуд  $B$  и сосуд  $C$ , частично заполненный маслом. Если нагнетать воздух грушей (или насосом) в сосуд  $C$ , в пространство над поверхностью масла, последнее вытесняется и поднимается вверх, заполняя сосуд  $B$ . При этом давление в сосуде  $A$  возрастает.

С целью стандартизации условий опытов количество нагнетаемого в сосуд  $A$  воздуха должно быть всегда одинаковым. Поэтому в начале каждого опыта (сосуд  $A$  открыт, манометр  $M$  на нуле) уровень масла должен быть на отметке 1 (дно сосуда  $B$ ), а в конце опыта на отметке 2 (верх сосуда  $B$ ).

Опыт проводят в следующей последовательности:

1. В сосуд  $A$  ставят пустой стакан и устанавливают уровень масла на отметке 1. Состояние  $1a$  ( $p_0, V_0, T_0$ ). Герметично закрывают сосуд  $A$  крышкой и поднимают уровень масла до отметки 2, при этом в системе устанавливается некоторое давление  $p_1$ . Состояние  $1b$  ( $p_1, V_1, T$ ). Очевидно, что  $p_1 = p_0 + \Delta p_1$ . Поскольку переход  $1a - 1b$  происходит при постоянной температуре, можно записать

$$p_0 V_0 = (p_0 + \Delta p_1) V_1. \quad (3.1)$$

2. Поместить в сосуд  $A$  стакан с рисом и повторить операцию, описанную в п. 1. При этом получаем состояния  $2a$  ( $P_0, V_0 - V, T$ ) и  $2b$  ( $P_0 + \Delta p_2, V_1 - V, T$ ) и, поскольку  $T = const$ , то

$$p_0 (V_0 - V) = (p_0 + \Delta p_2) \cdot (V_1 - V). \quad (3.2)$$

Решая уравнения (1) и (2) относительно  $V$ , считая  $V_1$  известной величиной, называемой постоянной прибора, получим

$$V = \frac{\Delta P_2 - \Delta P_1}{\Delta p_2} \cdot V_1. \quad (3.3)$$

Тогда для плотности риса можно записать

$$\rho = \frac{M}{V} = \frac{M \Delta P_2}{V_1 (\Delta P_2 - \Delta P_1)}. \quad (3.4)$$

Для определения объема  $V_1$  (постоянная прибора) нужно взять вещество с известной плотностью (алюминий) и выполнить с ним все операции, указанные в пунктах 1 и 2. Тогда по формуле (3.4) для этого случая получим:

$$V_1 = \frac{M_0}{\rho_0} \cdot \frac{\Delta p_{20}}{\Delta p_{20} - \Delta p_1}. \quad (3.5)$$

Подставив (5) в (4) получим для плотности риса

$$\rho = \frac{M \rho_0 \Delta p_2 (\Delta p_{20} - \Delta p_1)}{M_0 \Delta p_{20} (\Delta p_2 - \Delta p_1)}, \quad (3.6)$$

где  $\rho_0$  – плотность алюминия;  $M$ ,  $M_0$  – масса риса и алюминия соответственно;  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$ ,  $\Delta p_{20}$  – избыточное давление при пустом стакане, стакане с рисом и с алюминием соответственно.

#### *Задания для подготовки к работе*

1. Определите цену деления манометра.
2. Выведите формулу (3.3). Покажите на рисунке, изображающем лабораторную установку, объем  $V_1$ .
3. Определите массу стакана.
4. Что называется плотностью вещества? В каких единицах измеряется плотность?
5. При каких условиях справедлив закон Бойля – Мариотта?

### *Задания для выполнения работы*

1. Определите постоянную прибора  $V_1$ , используя алюминий.
2. Определите плотность риса.
3. Оцените ошибку измерений.

### *Вопросы для защиты работы*

1. Представьте полученное вами значение плотности риса во внесистемных единицах ( $\text{г/см}^3$ ), ( $\text{мг/мм}^3$ ), ( $\text{тонн/м}^3$ ).
2. Как повысить точность измерений объема с помощью волюмометра? Почему прибор имеет такое название?
3. Что такое насыпная плотность? Что такое непоравленная плотность?
4. Что такое пикнометр? В чем преимущества пикнометрического метода измерения плотности?
5. Что такое ареометр? Как он работает?
6. Что такое относительная плотность и в каких единицах она измеряется?
7. От каких параметров внешней среды: давление, температура, влажность, радиация и т. п., – зависит плотность твердых тел (сыпучих тел)?
8. Какие еще методы измерения плотности вы знаете?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### Определение универсальной газовой постоянной

*Цель работы* – экспериментально определить универсальную газовую постоянную.

*Приборы и оборудование:* колба для взвешивания воздуха, манометр, насос Комовского, весы, разновесы.

#### Методы измерения

Большой интерес представляет изучение свойств газов в условиях отсутствия столкновения между молекулами. Эти условия нетрудно создать, поскольку длина свободного пробега молекул обратно пропорциональна давлению газа:

$$\lambda \approx \frac{l}{P}.$$

При достаточно малых давлениях длина свободного пробега молекул может достигнуть величины, превышающей размеры сосуда, в котором содержится газ. Разрежение, при котором средняя длина свободного пробега молекул становится больше размеров содержащего газ сосуда, принято называть вакуумом.

Условно различают следующие уровни вакуума: низкий (до 1 мм рт. ст.), средний ( $1-10^{-4}$  мм рт. ст.) и высокий вакуум ( $10^{-4}-10^{-13}$  мм рт. ст.). Последний уровень соответствует разрежениям, при которых длина свободного пробега молекул существенно превышает размеры сосуда.

Получение вакуума осуществляется с помощью вакуумных насосов.

Измерение вакуума производится с помощью вакуумметров различного типа. Не существует таких приборов, которые были бы пригодны для измерения во всем интервале давлений, охватываемом понятием вакуум.

Ртутный манометр. Для измерения низкого вакуума (до 1 мм рт. ст.) чаще всего применяются жидкостные манометры, заполняемые ртутью. Жидкостный манометр представляет собой U-образную трубку. Для измерения давления до 100 мм рт. ст. используются открытые жидкостные манометры, а для давления ниже 100 мм. рт. ст. – закрытые манометры. Одно из колен закрытого манометра запаивают, и воздух в этом колене удаляется при наполнении ртутью. Открытое колено присоединяется к исследуемому объему. Разность уровней в обоих коленах непосредственно дает давление в мм рт. ст.

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}$$

Для определения универсальной газовой постоянной воспользуемся уравнением Клапейрона – Менделеева. Если газ, массой  $M$  при температуре  $T$  занимает объём  $V$ , то его состояние определяется уравнением (4.1). Для того чтобы исключить массу колбы, используем два состояния газа:

а) при атмосферном давлении:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT; \quad (4.1)$$

б) после откачивания (или накачивания):

$$P_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT. \quad (4.2)$$

Из уравнений (4.1) и (4.2) получим расчетную формулу

$$R = \frac{(P_1 - P)V\mu}{(m_1 - m)T'} \quad (4.3)$$

где  $m$  и  $p$  – масса и давление воздуха в начальном состоянии, тогда как  $m_1$  и  $p_1$  – масса и давление воздуха в колбе после откачивания (или накачивания).

$V$  – объем колбы (в данной работе  $V = 1,2$  л),  $\mu$  – молярная масса воздуха ( $\mu = 0.029$  кг/моль) и  $T$  – абсолютная температура.

#### *Задания для подготовки к работе*

1. Что такое вакуум? Какими способами можно достичь состояния вакуума?
2. Определите цену деления и пределы измерения давления используемого манометра.
3. Сформулируйте, в чем состоит идея метода измерения универсальной газовой постоянной в данной работе?
4. Каковы оптимальные условия проведения измерений в данном опыте?

#### *Задания для выполнения работы*

1. Взвесьте колбу с воздухом при нормальном атмосферном давлении, запишите полученные значения.
2. Соедините колбу с насосом и манометром в единую систему с помощью соединительных трубок (см. рисунок), накачайте воздух в колбу до давления, превышающего атмосферное, и снова взвесьте ее.



Данные занесите в таблицу. Рассчитайте значение универсальной газовой постоянной. Опыт произвести не менее пяти раз.

*Вопросы для защиты работы*

1. Какой из измеряемых параметров дает максимальную погрешность в измерениях?

2. Сформулируйте, в чем заключается физический смысл универсальной газовой постоянной; укажите, какова ее размерность.

3. Опишите устройство и принцип работы манометров Мак-Леода и ионизационного манометра.

4. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.

5. Опишите устройство и принцип работы ротационного масляного форвакуумного насоса.

6. Какие приборы служат для измерения давления жидкостей и газов? Чем отличается вакуумметр от манометра?

7. Предложите способ определения объема используемой в опыте колбы, если бы он был вам неизвестен.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

### Определение вязкости воды методом истечения и капилляра (методом Пуазейля)

*Цель работы* – измерить вязкость воды методом капиллярного вискозиметра.

*Приборы и оборудование:* установка, смонтированная на штативе, секундомер, мензурка, весы с разновесами.

#### Метод измерения

Вязкость воды может быть определена при помощи капиллярного вискозиметра. Объем жидкости, вытекающей с небольшой скоростью (течение жидкости ламинарное) из капилляра радиуса  $r$  и длины  $l$  за время  $t$ , связан с вязкостью жидкости следующей зависимостью (формула Пуазейля):

$$V = \frac{\pi r^4}{8l} \cdot \frac{\Delta p t}{\eta}, \quad (5.1)$$

где  $\Delta p$  – разность давлений на концах капиллярной трубки;

$\eta$  – коэффициент вязкости жидкости;

$r$  – радиус капилляра;

$l$  – длина капилляра. Параметры капилляра, используемого в данной установке:  $l = 23$  см,  $d = 1$  мм.

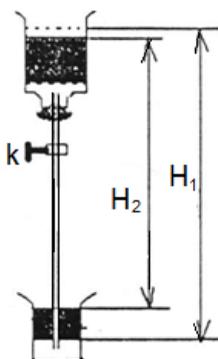
Величина  $k = \frac{\pi r^4}{8l}$  является постоянной прибора. Тогда исходя из формулы (5.1), можно вывести формулу коэффициента вязкости жидкости:

$$\eta = k \frac{\Delta p t}{V}. \quad (5.2)$$

Схематически внешний вид установки представлен на рисунке. Установка состоит из сосуда, соединенного посредством крана (К) с капиллярной трубкой, по которой

жидкость может перетекать в расположенную ниже мензурку. Сосуд наполняется исследуемой жидкостью (дистиллированной водой). При открытом кране вода из верхнего сосуда через капилляр вытекает в мензурку.

Сила поверхностного натяжения воды, вытекающей из капилляра, уменьшает ее скорость. Поэтому для устранения сил поверхностного натяжения конец капилляра должен быть опущен в воду (см. рисунок).



Разность давлений на концах капилляра, то есть давление, под которым вытекает вода из капилляра, определяется как гидростатическое давление столба жидкости, высота которого равна разности высот уровней воды в верхнем сосуде и мензурке. Поскольку уровни жидкости в сосудах с течением времени из-за вытекания воды меняются, величину  $H$  нужно взять как среднее значение, тогда разность давлений жидкости на концах капилляра будет определяться как

$$\Delta p = \rho g H, \quad H = \frac{H_1 + H_2}{2},$$

где  $\rho$  - плотность воды;  $g$  - ускорение свободного падения;  $H_1$  и  $H_2$  - расстояния между уровнями жидкостей в сосудах

в начале и в конце опыта. Объем вытекшей воды определяется взвешиванием мензурки с водой. Время протекания воды определяется секундомером.

#### *Задания для подготовки к работе*

1. Изучите шкалу (линейку), по которой определяется высота столба жидкости.
2. Откройте кран К и убедитесь, что жидкость без помех вытекает из капилляра.
3. Вычислите постоянную прибора к.
4. В каких случаях применима формула Пуазейля?
5. Какова единица измерения вязкости в системе СИ? Укажите соотношение между внесистемными единицами вязкости «пуаз» и единицей вязкости в системе СИ.

#### *Задания для выполнения работы*

Наполните верхний и нижний сосуды водой, как показано на рисунке, измерьте разность уровней воды в сосудах ( $H_1$ ).

После этого взвесьте нижний сосуд с водой, поставьте его на предметный столик, откройте кран К и включите секундомер.

После того как сосуд наполнится водой, закройте кран, выключите секундомер и измерьте разность уровней в сосудах ( $H_2$ ).

Взвесьте вновь мензурку с водой и по разности показаний найдите массу, а затем и объем вытекшей воды. Опыт повторите не менее пяти раз, результаты измерений занесите в таблицу.

Изучите зависимость вязкости воды от температуры. По данным из литературных источников постройте и объясните график зависимости  $\eta = f(t)$  для воды в интервале температур 0–100 °С.

*Вопросы для защиты работы*

1. Объясните, почему вязкость жидкости уменьшается с повышением температуры, в то время как вязкость газов – растёт?

2. Сформулируйте закон Ньютона для внутреннего трения в жидкостях и газах, запишите соответствующую формулу, поясните смысл величин входящих в нее.

3. Что такое идеальная жидкость?

4. Приведите примеры природных явлений и технологических процессов, в которых проявляется вязкость жидкости.

5. Почему результаты измерений вязкости, проведенных для одной и той же жидкости в различные дни, могут различаться между собой?

6. Какие еще методы измерения вязкости жидкостей вам известны?

7. Изобразите вектор градиента скорости в горизонтальной цилиндрической трубе, по которой течет вода.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

### Определение вязкости газа

*Цели работы:* 1) измерить вязкость воздуха методом Пуазейля,

2) вычислить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул.

*Приборы и оборудование:* установка для определения вязкости газа, секундомер, барометр, термометр, мерный сосуд.

#### Метод измерения

Любой газ состоит из огромного количества молекул, находящихся в непрерывном хаотическом движении. В  $1 \text{ см}^3$  газа при обычных условиях находится  $2,5 \cdot 10^{19}$  молекул. Хотя движение отдельной молекулы подчиняется законам механики, с их помощью почти невозможно сделать вывод о поведении молекул, так как молекул очень много и скорости их движения различны по величине и направлению.

Но оказалось, что свойства огромного скопления молекул подчиняются особым статистическим закономерностям, изучаемым статистическим методом. В основе статистического метода лежат два основных утверждения:

1. Совокупность огромного числа частиц обладает такими свойствами, которых нет у отдельной молекулы (давление  $p$ , температура  $T$ , вязкость  $\eta$  и т. д.). Это так называемые **макроскопические** параметры, наблюдаемые на опыте.

2. Между свойствами коллектива молекул и средними значениями величин, которые характеризуют поведение

отдельной молекулы, существует определенная количественная связь. Величины, характеризующие поведение отдельной молекулы, – это **микропараметры** (средняя скорость, средняя энергия, диаметр молекул, средняя длина свободного пробега и другие).

Отсюда следует, что, измеряя на опыте макропараметры и зная уравнение связи, можно вычислить средние значения величин, характеризующих поведение отдельных молекул.

В настоящей работе на основе измерения вязкости воздуха определяются средняя длина свободного пробега и эффективный диаметр молекул, входящих в состав воздуха.

Для определения вязкости (коэффициента внутреннего трения) можно воспользоваться методом капиллярного вискозиметра. При ламинарном течении жидкости (газа) по цилиндрической трубке справедлива формула Пуазейля

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 l \eta},$$

где  $V$  – объем газа, прошедшего через трубку за время  $t$ ;  
 $\Delta p$  – разность давлений на концах трубки;  
 $\eta$  – коэффициент внутреннего трения (вязкости);  
 $r$  и  $l$  – радиус и длина трубки.

Тогда для коэффициента вязкости можно записать:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 l V} \text{ или } \eta = \alpha \frac{\Delta p t}{V}, \quad (6.1)$$

где  $\alpha = \frac{\pi r^4}{8 l}$  – постоянная установки.

В теории (явления переноса) вязкость газа связана с микропараметрами формулой

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{v} \bar{\lambda}, \quad (6.2)$$

где  $\rho$  - плотность;  $\bar{v}$  - средняя арифметическая скорость;  $\bar{\lambda}$  - средняя длина свободного пробега молекул.

Плотность газа можно определить из уравнения Менделеева - Клапейрона  $PV = \frac{m}{\mu}RT$ , откуда

$$\rho = \frac{p\mu}{RT} \quad (6.3)$$

где  $\mu$  - молярная масса газа;  $p$  - давление газа;  $T$  - температура газа;  $R$  - универсальная газовая постоянная.

Средняя арифметическая скорость молекул газа определяется следующим образом:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}. \quad (6.4)$$

Подставляя (6.3) и (6.4) в (6.2), получим

$$\eta = \frac{1}{3}p\bar{\lambda}\sqrt{\frac{8\mu}{\pi RT}}. \quad (6.5)$$

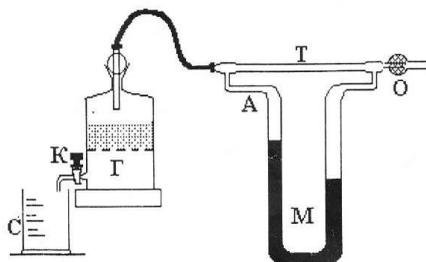
Откуда

$$\bar{\lambda} = \frac{3\eta}{P}\sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}}. \quad (6.6)$$

С другой стороны,  $\bar{\lambda}$  связана с эффективным диаметром молекул газа:  $\bar{\lambda} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 p}$ , откуда

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2}\pi\bar{\lambda}p}} \quad (6.7)$$

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



Основной частью установки (см. рис.) является капилляр Г (стеклянная трубка). Газометр Г служит для создания тока воздуха через капилляр. Благодаря наличию сил внутреннего трения в газе, энергия потока уменьшается, поэтому давление вдоль капилляра убывает. Манометр М служит для измерений перепада давлений на концах капилляра. Очевидно,

$$\Delta p = \rho g \Delta h, \quad (6.8)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости в манометре;  $\Delta h$  – разность уровней жидкости в манометре. Объем воздуха, прошедшего через капилляр ( $V$ ), будет равен объему воды, вытекшей из сосуда Г (для измерения этого объема служит мерный стакан С).

#### *Задания для подготовки к работе*

1. Какое явление описывает закон Пуазейля?
2. Сформулируйте закон Ньютона для внутреннего трения в жидкостях и газах, запишите соответствующую формулу, поясните смысл входящих в нее величин.
3. От каких физических величин зависит коэффициент вязкости газа?
4. Что такое капилляр? Каким условиям должна отвечать стеклянная трубка, чтобы быть капилляром?
5. Опишите принцип действия жидкостных капиллярных вискозиметров.
6. Вычислите постоянную установки.
7. Каковы оптимальные условия опыта?

### *Задания для выполнения работы*

1. Измерьте вязкость воздуха. Для этого надо наполнить газометр водой (до сужающейся части сосуда); плотно закрыть его пробкой.

Затем, плавно открывая сливной кран К, добейтесь стационарного течения воздуха через капилляр. При стационарном течении разность уровней в жидкости манометра будет постоянной. Вода сливается в запасной стакан. При этом скорость течения надо выбрать так, чтобы разность уровней была 6–8 см.

Как только течение станет стационарным, перебросьте шланг в мерный стакан и одновременно пустите секундомер. Запишите  $\Delta h_1$ .

Когда в стакане будет нужный объем воды (1 литр), перенесите шланг в запасной стакан и одновременно выключите секундомер. Запишите  $\Delta h_2$  и закройте сливной кран.

С течением времени из-за понижения уровня воды в газометре, скорость истечения воды уменьшается, и поэтому уменьшается разность давлений на концах капилляра.

Для вычислений по формуле (6.1) необходимо брать среднее значение разности давлений:

$$\Delta \bar{P} = \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2}{2} = \rho g \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2}, \quad (6.9)$$

где  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  – разность ураниений воды в манометре в начале и в конце опыта (при пуске и остановке секундомера).

Опыт проведите не менее пяти раз. Определите погрешность измерений.

2. Вычислите среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул (формулы (6.6) и (6.7)), используя измеренное среднее значение вязкости.  $p$  и  $T$  – давление и температура воздуха в лаборатории во время опыта.

*Вопросы для защиты работы*

1. Что такое кинематическая вязкость?
2. Как соотносится между собой истинный и «эффективный диаметр» молекул?
3. Приведите примеры природных явлений и технологических процессов, в которых проявляется вязкость газа.
4. Как эффективный диаметр молекул зависит от температуры? Приведите соответствующую формулу. Кем она предложена?
5. Какова размерность коэффициента вязкости? Как она связана с внесистемными единицами (пуаз)?
6. При каких физических условиях выполняется закон Гагена – Пуазейля? Что такое ламинарное и турбулентное течение жидкости или газа?
7. Что такое реология и что она изучает?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

### Определение отношения теплоемкостей для газов методом Клемана и Дезорма

*Цель работы* – определить отношение  $C_p/C_v$  для воздуха.

*Приборы и оборудование:* лабораторный комплекс ЛКТ-5 «Процессы в газах», группа резиновая с наконечником и шлангом, шланг, лупа.

#### *Теоретическое обоснование*

Молярной теплоемкостью какого-либо вещества называют физическую величину, численно равную количеству тепла, которое нужно сообщить одному молю этого вещества, чтобы повысить его температуру на один градус. Молярная теплоемкость рассчитывается по формуле

$$C = \frac{Q}{\nu \Delta T}, \quad (7.1)$$

где  $\nu$  – число молей заданного вещества.

Теплоемкость газов существенно зависит от того, при каких условиях тепло сообщают системе. Так, например, в случае нагревания газа при постоянном объеме сообщенное ему тепло идет целиком на изменение внутренней энергии газа, и теплоемкость при постоянном объеме определяется соотношением:

$$C_V = \frac{\Delta U}{\nu \Delta T}. \quad (7.2)$$

Если же газ нагревать при постоянном давлении, то при этом не только изменяется внутренняя энергия, но еще и совершается работа по расширению газа, поэтому теплоемкость при постоянном давлении может быть определена из соотношения  $C_p = \frac{\Delta U + p \Delta V}{\nu \Delta T}$ .

Вследствие чего справедливо уравнение Майера

$$C_p = C_v + R. \quad (7.3)$$

Для идеального газа теплоемкости  $C_p$  и  $C_v$  можно рассчитать, исходя из представлений молекулярно-кинетической теории, считая, что на каждую степень свободы приходится одинаковый запас энергии ( $\frac{1}{2}kT$ ). Тогда для внутренней энергии идеального газа можно записать:  $U = \frac{i}{2}RT$ , где  $i$  – число степеней свободы газа. Тогда имеем  $C_v = \frac{i}{2}R$ ,  $C_p = \frac{i+2}{2}R$ .

Отношение молярных (или удельных) теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме  $\gamma = C_p/C_v$  входит в уравнение Пуассона, описывающего адиабатный процесс для идеальных газов (показатель адиабаты):

$$PV^\gamma = const. \quad (7.4)$$

Адиабатным называется процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой. Конечно, добиться полной тепловой изолированности системы практически невозможно, однако многие реальные процессы можно считать адиабатическими, если они протекают достаточно быстро для того, чтобы теплообмен с окружающей средой не успел осуществиться. Многие технологические процессы, вследствие своей краткосрочности, могут быть уподоблены адиабатным. Например, сгорание топлива в дизельном двигателе внутреннего сгорания.

Одним из самых простых методов определения  $\gamma$  для газов является метод адиабатического расширения, называемый методом Клеймана и Дезорма. Поясним суть метода и выведем рабочую формулу.

В сосуд, снабженный манометром для измерения давления в этом сосуде и краном для соединения воздуха в сосуде с атмосферой, накачивают при закрытом кране немного воздуха. Через некоторое время температура воздуха в сосуде станет равна комнатной  $T_1$  (благодаря теплообмену), а давление  $p_1$  будет несколько больше атмосферного. Это первое состояние газа:  $p_1, T_1$ .

Затем открывают кран, выпуская воздух из сосуда, и закрывают его. Время открытого крана необходимо сделать как можно более коротким, чтобы теплообменом, проходящим за время открытия крана через стенки сосуда, можно было пренебречь и считать процесс расширения газа адиабатическим. В результате такого адиабатического расширения температура воздуха понизится до  $T_2$  (второе состояние газа  $T_2, p_2$ ).

После закрытия крана температура воздуха в сосуде с течением времени (опять же вследствие теплообмена) будет повышаться и достигнет комнатной  $T_1$ . Соответственно давление повысится до значения  $p_3$ . Это конечное состояние воздуха в сосуде. Переход газа из первого состояния во второе происходит адиабатически и подчиняется уравнению Пуассона (7.4), следовательно, в переменных  $p$  и  $T$  можно записать

$$\frac{p_1^{\gamma-1}}{T_1^{\gamma}} = \frac{p_2^{\gamma-1}}{T_2^{\gamma}}. \quad (7.5)$$

Изохорный переход из второго состояния в третье можно описать, используя уравнение закона Шарля

$$\frac{p_3}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}. \quad (7.6)$$

Исключаем из уравнений (7.5) и (7.6) температуру и получаем

$$\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{p_3}{p_2}\right)^{\gamma}. \quad (7.7)$$

Поскольку в работе используется открытый манометр, давление воздуха в сосуде можно рассчитать по формулам

$$p_1 = p_2 + \rho gh_1, \quad (7.8)$$

$$p_3 = p_2 + \rho gh_2, \quad (7.9)$$

где  $p_2$  – атмосферное давление,  $\rho$  – плотность воды,  $h_1$  и  $h_2$  – соответственно высоты столбов воды в манометре.

Подставляя значения  $p_1$  и  $p_3$  из соотношений (7.8 и 7.9) в формулу (7.7) получим:

$$\left(1 + \frac{\rho gh_1}{p_2}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{\rho gh_2}{p_2}\right)^{\gamma}. \quad (7.10)$$

Обозначим  $X = \frac{\rho gh_1}{p_2}$ , тогда данный бином можно представить так:

$$(1 + X)^{\gamma} = 1 + \gamma X + \frac{\gamma(\gamma-1)x^2}{2} + \frac{\gamma(\gamma-1)(\gamma-2)x^3}{3!} + \dots \quad (7.11)$$

В условиях опыта отношения  $\frac{\rho gh_1}{p_1}$  и  $\frac{\rho gh_2}{p_2}$  значительно меньше единицы, поэтому с достаточной точностью можно ограничиться лишь двумя первыми членами ряда и записать

$$1 + (\gamma - 1) \frac{\rho gh_1}{P_2} \approx 1 + \frac{\rho gh_2}{P_2} \gamma. \quad (7.12)$$

Окончательно получим

$$\gamma \approx \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (7.13)$$

### *Описание установки*

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 7.1. Тонкостенный сосуд 1 вместимостью 3 л, соединяющийся с открытым манометром 2 и насосом, с помощью крана  $K_3$  может соединяться с атмосферой. Кран штуцер  $K_2$  позволяет изолировать насос от сосуда. Избыточное по сравнению с атмосферным давление воздуха в сосуде измеряется открытым манометром, заполненным водой. Таймер

связан с краном  $K_3$  и позволяет определить промежуток времени, в течение которого кран оставался открытым. Фактически это время адиабатического расширения воздуха.

Часы-таймер предназначены для измерения интервалов времени с разрешением 0.01 с. Управление секундомером осуществляется тремя кнопками. С помощью кнопки «MODE» (рис. 7.2) осуществляется выбор режима работы. В режиме «Секундомер» поочередно запускают и останавливают отсчет времени. Нажатие кнопки «SET», при остановленном отсчете времени, сбрасывает (обнуляет) отсчет и показания дисплея.

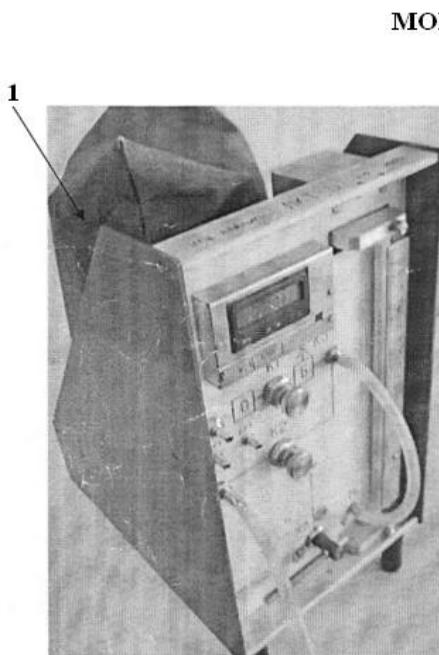


Рис. 7.1.

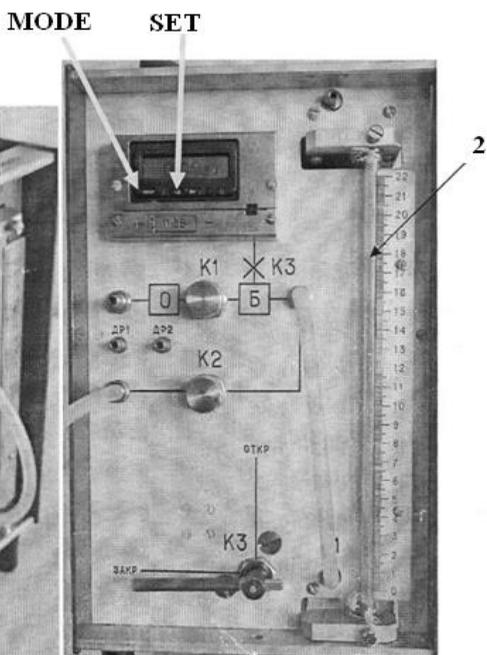


Рис. 7.2.

### *Порядок выполнения эксперимента*

1. Закройте кран  $K_3$ . С помощью насоса через штуцер 1 (кран  $K_1$  открыт) наполните баллон воздухом до давления  $p_0$ , превышающего атмосферное на 15–20 см водяного столба.

2. Перекройте кран  $K_1$ . При накачивании воздуха температура поднимется. Перекройте кран  $K_2$ .

3. Подождите, пока в результате изохорического охлаждения температура воздуха в баллоне вернется к комнатной  $T_1$ .

4. Убедившись, что уровень в манометре не меняется, запишите значение высоты столба воды  $h_1$ .

5. Кратковременно откройте кран  $K_3$  (время открытия порядка 0,3 секунды). Для этого нужно быстро повернуть кран сначала **по** часовой стрелке, а потом **сразу против** часовой стрелки.

Дождитесь установившегося термодинамического равновесия с окружающей средой. Определите и запишите избыточное давление  $h_2$ .

6. Вычислите  $\gamma$ .

7. Повторите опыт 7 раз.

8. Рассчитайте среднее значение  $\gamma$ , оцените погрешность.

9. Сделайте вывод о проделанной работе.

### *Задания для подготовки к работе*

1. Что такое теплоемкость? Чем отличаются удельная и молярная теплоемкости?

2. Что такое адиабатный процесс? Как можно осуществить процесс, близкий к адиабатному? Приведите примеры таких процессов.

3. Перечислите процессы, происходящие с газом в ходе выполнения работы, и назовите законы, которым они подчиняются.

4. Обоснуйте вывод расчетной формулы.

5. Почему при выполнении измерений время, в течение которого кран  $K_3$  остается открытым, должно быть мало?

#### *Вопросы для защиты работы*

1. Какова теплоемкость газа при адиабатном процессе?

2. Какова теплоемкость газа при изотермическом процессе?

3. Какова теплоемкость газа при изохорическом процессе?

4. Изобразите на одном графике, в координатах  $p(V)$ , адиабатный и изотермический процессы. Чем отличаются графики?

5. Какой параметр, характеризующий состояние газа, при адиабатном процессе остается постоянным?

6. Изобразите, как будет выглядеть график адиабатного сжатия газа в координатах  $S = f(T)$ , где  $S$  – энтропия, а  $T$  – температура газа.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

### Определение удельной теплоты парообразования воды

*Цели работы:* 1) измерить калориметрическим методом удельную теплоту парообразования воды;

2) рассчитать изменение энтропии при фазовом переходе первого рода.

*Приборы и оборудование:* калориметр, кипятильник, сухопарник, весы с разновесами, электроплитка, термометр.

#### Метод измерения

Количество теплоты, необходимое для перевода единицы массы жидкости, взятой при температуре кипения, в пар при той же температуре, принято называть удельной теплотой парообразования. Удельная теплота парообразования  $\lambda$  выражается в СИ в Дж/кг.

Изотермический переход из жидкого состояния в пар связан со значительным увеличением объема вещества и с изменением его внутренней энергии. На основании первого начала термодинамики  $Q = \Delta U + A$  для удельной теплоты парообразования можно записать выражение

$$\lambda = (U_{н. п.} - U_{ж.}) + p (V_{н. п.} - V_{ож.}), \quad (8.1)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота парообразования;  $U_{н. п.}$  – внутренняя энергия насыщенного пара;  $U_{ж.}$  – внутренняя энергия жидкости;  $V_{н. п.}$  – удельный объем насыщенного пара;  $V_{ож.}$  – удельный объем жидкости.

Таким образом, выражение для удельной теплоты парообразования распадается на два слагаемых из которых

первое  $\Delta U = U_{н.п.} - U_{ж.}$  является мерой изменения внутренней энергии системы и измеряется работой, совершенной против сил сцепления между молекулами; эту часть теплоты парообразования часто называют внутренней теплотой парообразования.

Второе слагаемое  $A = p(V_{нп} - V_{ож.})$  измеряется работой против сил внешнего давления (внешняя теплота парообразования). При температурах, далеких от критической,  $V_{н.п.} \gg V_{ж.}$ , удельная теплота парообразования может быть выражена в виде

$$\lambda = (U_{н.п.} - U_{ж.}) + pV_{н.п.} \quad (8.2)$$

Из этой формулы видно, что удельная теплота парообразования зависит от температуры и от давления, при которых происходит парообразование. В настоящей работе теплоту парообразования воды определяют при атмосферном давлении, что можно выполнить калориметрическим методом. Идея последнего состоит в том, что измеряют массу сконденсировавшегося пара и количество теплоты, выделяющееся при его конденсации (это возможно потому, что при конденсации единицы массы пара выделяется количество теплоты, равное удельной теплоте парообразования (исходя из закона сохранения энергии)).

Изменение энтропии можно определить по формуле  $\Delta S = \frac{Q_2}{T_2}$ , где  $Q_2$  – количество тепла, отданное паром при конденсации,  $T_2$  – температура конденсации. Для изолированной системы справедливо неравенство Клаузиуса  $\Delta S \geq 0$ .

Энтропия изолированной системы не убывает (второе начало термодинамики), или

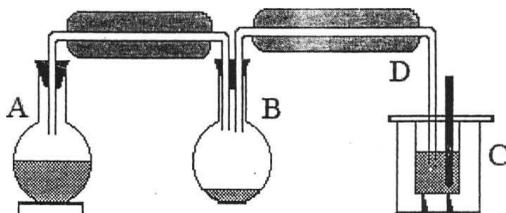
а) энтропия изолированной системы постоянна, если в системе протекают только обратимые процессы,  $\Delta S = 0$ ;

б) в реальной изолированной системе процессы необратимы и энтропия возрастает,  $\Delta S > 0$ .

Изменение энтропии при фазовом переходе пар – жидкость можно определить, если будет известна удельная теплота парообразования.

### *Описание установки и измерения*

В данной работе используется установка, изображенная на рисунке. Кипятильник **A**, в который налита вода, соединен через сухопарник **B** с калориметром **C**. Сухопарник служит для задержания капель жидкости, образующихся при конденсации пара в соединительных трубках.



При кипении жидкости в кипятильнике ее пары через соединительную трубку и сухопарник попадают в калориметр, где они конденсируются, причем выделение теплоты парообразования вызывает нагревание воды в калориметре, а также нагревание самого калориметра с термометром.

Если начальная температура воды в калориметре  $t_0$ , ее конечная температура  $\Theta$ , то количество теплоты, получаемое водой и калориметром, рассчитывается по формуле

$$Q_1 = cm(\Theta - t_0) + c_1m_1(\Theta - t_0), \quad (8.3)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость воды;  $c_1$  – удельная теплоемкость калориметра (алюминия);  $m$  и  $m_1$  – массы воды и калориметра.

Количество теплоты, отданное паром при его конденсации

$$Q_2 = \lambda m_2, \quad (8.4)$$

где  $m_2$  – масса пара. При дальнейшем охлаждении воды, получившейся при конденсации пара, от температуры конденсации  $t_2$  до окончательной температуры  $\Theta$  выделяется количество теплоты  $Q_3$ , определяемое по формуле

$$Q_3 = cm_2(t_2 - \Theta), \quad (8.5)$$

где  $m_2$  – в данном случае масса сконденсированной воды, которая находится по разности массы воды в калориметре до и после пропускания в нее пара.

Уравнение теплового баланса запишем в виде

$$Q_1 = Q_2 + Q_3,$$

или

$$cm(\Theta - t_0) + c_1m_1(\Theta - t_0) = cm_2(t_2 - \Theta) + \lambda m_2, \quad (8.6)$$

откуда

$$\lambda = \frac{1}{m_2} [cm(\Theta - t_0) + c_1m_1(\Theta - t_0) - cm_2(t_2 - \Theta)]. \quad (8.7)$$

### *Ход эксперимента*

Налейте в кипятильник А воды (до половины). Включите электроплитку, пусть вода в кипятильнике постоянно кипит.

Взвесьте внутренний стакан калориметра С и налейте в него 100–150 г воды. После чего вновь взвесьте стакан калориметра с водой. Поставьте стакан в калориметр и измерьте начальную температуру воды в калориметре. Отрегулируйте

высоту площадки, на которой стоит калориметр, так, чтобы трубка Д погружалась в калориметр на максимально возможную глубину.

Опыт (пропускание пара в калориметр) можно начинать тогда, когда вся система прогреется паром (в трубке Д перестанут образовываться капли воды и она станет горячей на ощупь). Только после этого можно начать пропускать пар в калориметр с водой. Когда температура смеси достигнет  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , осторожно снимите калориметр с подставки (предварительно нужно прекратить доступ пара в него), только после этого можно выключить электроплитку.

Запишите конечную температуру смеси. Для определения массы пара (равно как и массы сконденсированной воды) взвесьте калориметр с водой. Это удобнее сделать, когда калориметр немного остынет.

Запишите формулы для  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  и на основе формулы (8.2) выведите рабочую формулу для определения  $\lambda$ .

Рассчитайте значение удельной теплоты парообразования воды. Полученное значение сравните с табличными данными. Определите погрешность опыта.

Используя полученное значение  $\lambda$ , найдите изменение энтропии при фазовом переходе пар – жидкость по формуле  $\Delta S = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{\lambda m_2}{T_2}$ .

#### *Задания для подготовки к работе*

1. Что такое удельная теплота парообразования?
2. Для чего в процессе кипения жидкости нужно сообщать дополнительную теплоту?

3. Изменяется ли внутренняя энергия воды в процессе парообразования и конденсации? И если изменяется, то как?

4. Перечислите тепловые процессы, происходящие в установке при проведении опыта, объясните, как изменяется энтропия в этих процессах.

#### *Вопросы для защиты работы*

1. Как зависит удельная теплота парообразования от температуры и давления?

2. Как связана удельная теплота парообразования с молярной теплотой парообразования?

3. Для чего в лабораторной установке нужен сухопарник? Объясните, как исказилось бы получаемое значение удельной теплоты парообразования при отсутствии сухопарника.

4. Температура кипящей воды, также как и образующего при этом пара, равна  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Объясните, почему ожоги, вызываемые паром, существенно тяжелее, чем ожоги, вызываемые кипящей водой?

5. Дайте определение энтропии, укажите единицы измерения.

6. Что такое энтальпия и каковы единицы её измерения?

7. Укажите, какие из следующих перечисленных термодинамических величин: *теплота, работа, внутренняя энергия, энтропия, энтальпия* – являются функциями состояния, а какие – функциями процесса? Объясните почему.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9  
**Определение коэффициента  
поверхностного натяжения  
методом отрыва кольца**

*Цели работы:* 1) ознакомиться с одним из методов определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости (метод отрыва кольца);

2) измерить коэффициент поверхностного натяжения воды;

3) изучить влияние поверхностного активного вещества (ПАВ) на коэффициент поверхностного натяжения воды.

*Приборы и оборудование:* разноплечие весы, набор разновесов, используемые жидкости (вода, мыльный раствор).

### **Метод измерения**

Наличие у тел свободных поверхностей приводит к существованию особой категории явлений, называемых поверхностными. Строго говоря, всякое тело находится не в вакууме, а в какой-либо другой среде, например в атмосфере. Поэтому следует говорить не просто о поверхности тел, а о поверхности раздела двух сред.

Молекулы, расположенные вблизи поверхности в некотором тонком поверхностном слое, находятся в условиях отличных от условий внутри тела. Разность энергии всех молекул (обеих сред) вблизи поверхности раздела и той энергии, которую эти молекулы имели бы, если бы они находились внутри тела, называется *поверхностной энергией*.

Очевидно, что поверхностная энергия пропорциональна площади поверхности раздела:

$$U = \sigma S. \quad (9.1)$$

Коэффициент  $\sigma$  зависит от природы соприкасающихся сред и от их состояния. Он называется коэффициентом поверхностного натяжения и численно равен поверхностной энергии единицы площади.

Поверхностное натяжение проявляет себя как сила в следующем простом примере. Представим себе пленку жидкости, натянутую на проволочную рамку, одна из сторон которой (с длиной  $l$ ) может перемещаться. Благодаря стремлению поверхности уменьшиться на проволоку будет действовать сила, которую можно непосредственно измерить. По общим правилам механики эта сила  $F$  определяется производной от энергии (в данном случае поверхностной энергии) по координате  $x$  вдоль направления силы действия:

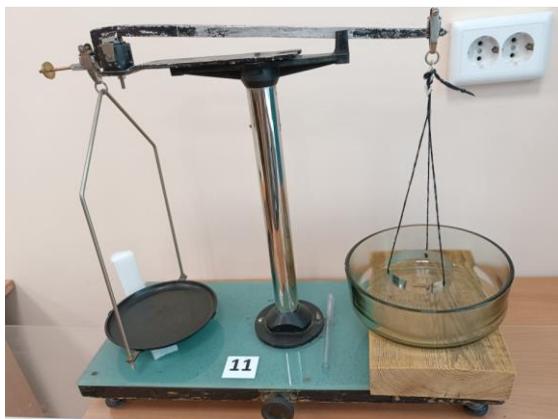
$$F = -\frac{dU}{dx} = \sigma \frac{dS}{dx}. \quad (9.2)$$

Но площадь поверхности пленки  $S = lx$ , поэтому

$$F = \sigma l. \quad (9.3)$$

Из формулы (9.3) следует, что коэффициент поверхностного натяжения можно определять как силу, отнесенную к единице длины. Тогда размерность величины  $\sigma$  вытекает из ее определения и может быть представлена в различных видах  $[\sigma] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ .

Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости состоит из разноплечих весов (отношение плеч 1:10) и кольца, подвешенного на одном (большом) плече коромысла.



Погрузив проволочное кольцо определенного диаметра, подвешенное к правому коромыслу весов в исследуемую жидкость, можно наблюдать взаимодействие молекул жидкости и кольца.

Чтобы оторвать кольцо от жидкости, необходимо приложить усилия, равные силе поверхностного натяжения жидкости.

Сила, необходимая для отрыва кольца от поверхности воды, может быть определена следующим образом:  $|F| = \sigma l = \sigma(\pi d_1 + \pi d_2)$ , где  $d_1$  и  $d_2$  – внутренний и внешний диаметры кольца.

По третьему закону Ньютона  $F = P$ , где  $P = mg$  – вес помещенных на чашку весов разновесов, позволяющих добиться отрыва кольца от поверхности жидкости. Тогда можно получить рабочую формулу для определения коэффициента поверхностного натяжения:

$$P = \sigma(\pi d_1 + \pi d_2), \quad \sigma = \frac{P}{\pi(d_1 + d_2)} \rightarrow \sigma = \frac{P}{2\pi(d_{cp} + h)},$$

где  $h$  – толщина кольца.

### *Задания для подготовки к работе*

1. Какова природа сил поверхностного натяжения?
2. Как направлена сила поверхностного натяжения?
3. Какие изменения нужно внести в рабочую формулу по вычислению величины  $\sigma$ , учитывая соотношение длин плеч весов 1:10?
4. Приведите теоретические значения коэффициентов поверхностного натяжения различных жидкостей, в том числе используемых в работе.

### *Задания для выполнения работы*

1. Тщательно вымойте чашку для воды и кольцо под краном. Это необходимо для удаления остатков мыла на стенках чашки и кольце от предыдущих опытов.
2. Приближая кольцо к поверхности воды в чашке, убедитесь, что оно располагается параллельно поверхности. Перекос плоскости кольца по отношению к поверхности воды очень сильно искажает результат опытов.
3. Измерьте коэффициент поверхностного натяжения воды.
4. Залив в кювету вместо воды мыльный раствор, измерьте коэффициент поверхностного натяжения мыльного раствора.
5. Сопоставьте полученные значения с теоретическими и сделайте вывод о влиянии поверхностно-активных веществ на коэффициент поверхностного натяжения воды.

*Вопросы для защиты работы*

1. Как зависит коэффициент поверхностного натяжения жидкостей от температуры? Почему?
2. К какому численному значению стремится коэффициент поверхностного натяжения жидкости при достижении ею критической температуры?
3. Приведите примеры технологических процессов или природных явлений, в которых важен учет смачивания (или несмачивания) жидкостью поверхности твердого тела.
4. Почему жирную посуду удобнее мыть в горячей воде, чем в холодной?
5. Поясните суть обогащения руды методом флотации.
6. Как продемонстрировать свободную поверхность жидкости?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

### Определение коэффициента объемного расширения керосина методом Дюлонга и Пти

*Цель работы* – определить коэффициент объемного расширения керосина.

*Приборы и оборудование:* смонтированная на стенде установка, представляющая собой сообщающиеся сосуды, заполненные керосином, электроплитка.

#### Метод измерения

При тепловом расширении жидкостей имеет смысл говорить только об объемном расширении. Если при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  объем жидкости  $V_0$ , а при температуре  $t\text{ }^{\circ}\text{C}$  объем жидкости  $V$ , то можно записать соотношение

$$V = V_0(1 + \beta t), \quad (10.1)$$

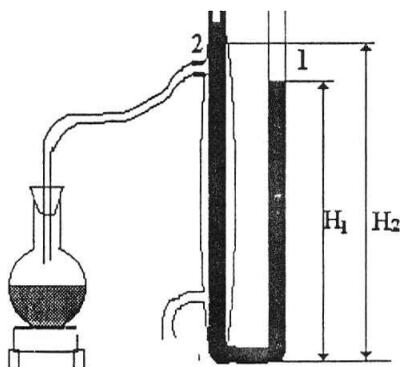
где  $\beta$  – коэффициент объемного расширения жидкости. Коэффициент объемного расширения численно равен относительному изменению объема тела (жидкости) при нагревании на один градус.

Коэффициент объемного расширения жидкости можно определить, нагревая ее в сосуде. Однако, точного значения  $\beta$  мы не получим, так как вместе с жидкостью расширяется сосуд. Дюлонг и Пти предложили метод измерения коэффициента объемного расширения жидкости при помощи сообщающихся сосудов, который позволяет исключить влияние расширения сосуда с жидкостью на окончательный результат измерения.

Прибор Дюлонга и Пти состоит из U-образной трубки (сообщающиеся сосуды), наполненной жидкостью,

коэффициент объемного расширения которой требуется определить.

В одном колене (обозначено на рисунке цифрой 1) U-образной трубки жидкость находится при комнатной температуре, а в другом (цифра 2) – при температуре паров кипящей воды. Вследствие этого плотность жидкости в сообщающихся сосудах различается, что приводит к появлению разности уровней.



Очевидно, условием равновесия в сообщающихся сосудах будет равенство давлений в обоих коленах, т. е.

$$p_1 = p_2, \quad (10.2)$$

где  $p_1$  – гидростатическое давление жидкости в первом колене, а  $p_2$  – гидростатическое давление жидкости во втором колене. Гидростатическое давление жидкости можно выразить в виде

$$\rho_1 g H_1 = \rho_2 g H_2,$$

где  $H_1$  и  $H_2$  – высоты уровней жидкости в сообщающихся сосудах,  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – плотности жидкости в правом и левом коленах сосудов.

Откуда следует, что

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{H_2}{H_1}. \quad (10.3)$$

Так как объем жидкости обратно пропорционален ее плотности, то

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Из приведенных формул 10.1-10.3 можно вывести соотношение

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{V_0(1 + \beta t_1)}{V_0(1 + \beta t_2)} = \frac{H_1}{H_2}. \quad (10.4)$$

Откуда

$$\beta = \frac{\Delta H}{H_1 t_2 - H_2 t_1}. \quad (10.5)$$

Таким образом, применение сообщающихся сосудов позволило заменить измерение объема жидкости измерением высот и разности высот. Последняя не зависит от сечения сосуда.

#### *Задания для подготовки к работе*

1. Какова размерность термического коэффициента объемного расширения? Что он показывает?

2. От каких физических величин зависит коэффициент объемного расширения жидкости? Зависит ли он от температуры жидкости?

3. Поясните идею метода Дюлонга и Пти. Что является основным преимуществом метода Дюлонга и Пти по сравнению с другими методами определения коэффициента объемного расширения?

4. Выведите рабочую формулу (10.5).

### *Задания для выполнения работы*

1. Включите кипятильник в сеть.
2. Запишите комнатную температуру ( $t_1$ ) и температуру кипения воды при данном атмосферном давлении ( $t_2$ ).
3. Прогрейте пропусканием пара через колено исследуемую жидкость в левом колене сообщающихся сосудов до температуры кипения воды ( $t_2$ ). О том, что жидкость прогрелась до нужной температуры  $t_2$ , можно судить по прекращению поднятия уровня жидкости в нагреваемом колене ( $H_2$ ).
4. Измерьте  $H_1$ ,  $H_2$  и определите разность уровней  $\Delta H$ . По рабочей формуле вычислите  $\beta$ .
5. Сравните измеренное значение  $\beta$  с табличным.
6. Оцените погрешность измерения.

### *Вопросы для защиты работы*

1. Зависимость объема жидкости от температуры используется в жидкостных термометрах. Какое значение имеет тот факт, что эта зависимость линейная?
2. Каковы особенности теплового расширения воды? Какова их роль в природных явлениях?
3. Почему вода не используется в качестве термометрического тела в жидкостных контактных термометрах?
4. Может ли жидкость при нагревании не расширяться, а сжиматься? Если может, то что в этом случае можно сказать о коэффициенте ее объемного расширения  $\beta$ ?
5. Приведите примеры технологических ситуаций, когда необходим учет объемного расширения жидкостей или твердых тел при изменении их температуры.
6. Как называются приборы, позволяющие измерять температурный коэффициент объемного расширения жидкостей и твердых тел?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11

### Определение влажности воздуха

*Цели работы:* 1) определить относительную и абсолютную влажность воздуха в аудитории;

2) определить точку росы.

*Приборы и оборудование:* психрометр, аспирационный психрометр, психрометрическая таблица и график.

#### *Введение*

Воздух всегда содержит некоторое количество паров воды. Количество водяного пара, которое может находиться в воздухе, зависит от температуры. Чем выше температура воздуха, тем это количество больше. При понижении температуры может произойти конденсация пара.

Максимальное количество паров, которое при данной температуре может находиться в воздухе, не обращаясь в жидкость, характеризует насыщенное состояние.

Принято характеризовать количество водяного пара по абсолютной величине – абсолютной влажностью, а по степени насыщения – относительной влажностью.

Масса водяных паров (в г, кг), находящаяся в единице объема воздуха, называется **абсолютной** влажностью.

Отношение количества водяных паров, находящихся в воздухе, к количеству паров, необходимому для насыщения при данной температуре, называется **относительной** влажностью, рассчитывается по формуле

$$f = \frac{\rho}{\rho_H} \cdot 100\%, \quad (11.1)$$

где  $f$  – относительная влажность,  $\rho$  – плотность водяного пара,  $\rho_n$  – плотность насыщенного водяного пара при данной температуре.

Плотность пропорциональна давлению газа, поэтому абсолютную влажность можно характеризовать давлением (или упругостью) водяного пара и выразить ее в миллиметрах ртутного столба. Тогда относительная влажность может быть выражена как

$$f = \frac{p}{p_n} \cdot 100 \%, \quad (11.2)$$

где  $p$  – давление водяных паров при данной температуре и  $p_n$  – давление водяных паров, насыщающих пространство при данной температуре.

Чтобы вычислить относительную влажность, нужно знать абсолютную влажность и давление водяных паров, насыщающих воздух при данной температуре. Давление насыщающих водяных паров при разных температурах дается обычно в таблицах. Абсолютная влажность определяется психрометрическим методом.

#### *Описание прибора и метода измерения*

Аспирационный психрометр состоит из двух одинаковых термометров, закрепленных в специальной оправе, имеющей заводной механизм с вентилятором, который заводится ключом.

Резервуары термометров помещены в двойную трубчатую защиту с воздушным зазором между трубками. Двойная трубчатая защита предохраняет резервуары термометров от нагревания солнцем, для чего наружная поверхность трубок тщательно полируется, а сами трубки

изолированы между собой теплоизоляционными кольцами. Трубки при помощи пластмассовых втулок соединены с тройником воздухопроводной трубки, на верхнем конце которой укреплена аспирационная головка. Аспирационная головка состоит из заводного механизма и вентилятора, закрытых колпачком. Резервуар правого термометра обернут батистом в один слой и перед работой смачивается чистой водой при помощи пипетки.

Работа психрометра происходит следующим образом: при вращении вентилятора в прибор засасывается воздух, который, обтекая резервуары термометров, проходит по воздухопроводной трубке к вентилятору и выбрасывается им наружу через прорези.

Благодаря протеканию вокруг резервуаров термометров потоков воздуха сухой термометр будет показывать температуру этого потока, а показание влажного термометра будет меньше, так как он будет охлаждаться вследствие испарения воды с поверхности батиста, облегающего резервуар.

Чем меньше влажность окружающего воздуха, тем **интенсивнее** будет испарение и тем **ниже** будут показания влажного термометра. Отсчеты по двум термометрам дадут разность температур, которая и будет характеризовать имеющуюся абсолютную влажность воздуха.

При установившемся режиме испарения, когда температура влажного термометра тоже установится, приход тепла  $Q_1$  извне будет равен расходу тепла  $Q_2$  на испарение воды с поверхности термометра. Тогда по закону Ньютона количество теплоты  $Q_1$ , полученной шариком влажного

термометра, пропорционально поверхности  $S$ , с которой происходит испарение, разности температур сухого и влажного термометров и времени  $\tau$ :

$$Q_1 = C_1 S(t - t_1)\tau, \quad (11.3)$$

где  $C_1$  - коэффициент пропорциональности;  $t$  - температура сухого термометра;  $t_1$  - температура влажного термометра.

Расход тепла, затрачиваемого влажным термометром, выражается формулой

$$Q_2 = \frac{p_n - p}{p_0} C_2 S \lambda, \quad (11.4)$$

где  $p_n$  - давление насыщенных паров при температуре влажного термометра;  $p$  - давление паров во время опытов (абсолютная влажность);  $p_0$  - атмосферное давление;  $\lambda$  - теплота испарения воды;  $C_2$  - коэффициент пропорциональности.

Приравнявая (11.3) и (11.4), получаем психрометрическую формулу:

$$p = p_n - \frac{C_1}{C_2 \lambda} p_0 (t - t_1). \quad (11.5)$$

Обозначая  $A = \frac{C_1}{C_2 \lambda}$ , имеем

$$p = p_n - A p_0 (t - t_1), \quad (11.6)$$

где  $A$  - постоянная психрометра, зависящая от его системы и, главным образом, от скорости обтекания воздухом шарика термометра.

Из психрометрической формулы следует, что

$$A = \frac{p_n - p}{p_0 (t - t_1)}. \quad (11.7)$$

Все величины, входящие в правую часть формулы, могут быть установлены на опыте, таким образом может быть

определена психрометрическая постоянная  $A$ . Пользуясь психрометрической формулой, составляют психрометрические таблицы для относительной и абсолютной влажности по показаниям сухого и влажного термометров.

При составлении таблиц принимаются постоянными давление воздуха  $P_0$  и психрометрическая постоянная  $A$ . Отсюда следует, что составленные таким образом таблицы пригодны только для данной системы психрометра, если давление отличается от принятого при составлении таблиц (см. таблицу 11.1).

Для данного психрометра  $A = 0,000662$  1/градус при скорости воздушного потока 2 м/с у резервуаров термометров, создаваемой аспирационной головкой психрометра на четвертой минуте работы вентилятора.

#### *Задания для подготовки к работе*

1. Если относительная влажность воздуха, например, 70 % означает ли это, что в воздухе 70 % воды? Как правильно ответить на вопрос, что означает такое значение относительной влажности?

2. Какая величина (относительная или абсолютная влажность) более полно характеризует влажность воздуха?

Чтобы ответить на этот вопрос решите задачу: в двух комнатах с температурами 15 °С и 20 °С упругость водяных паров (абсолютная влажность) одинакова и равна 10 г/м<sup>3</sup>.

Вычислите относительную влажность в каждой комнате и дайте ответ на вопрос.

Таблица 11.1

Зависимость давления и плотности  
насыщенного водяного пара от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}$ мм рт. ст.	$\rho_{\text{н}}$ г/м <sup>3</sup>	$t, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{н}}$ мм рт. ст.	$\rho_{\text{н}}$ г/м <sup>3</sup>
-20	0,77	0,88	6	7,01	7,3
-19	0,85	0,96	7	7,51	7,8
-18	0,94	1,06	8	8,05	8,3
-17	1,03	1,15	9	8,61	8,8
-16	1,13	1,27	10	9,21	9,41
-15	1,24	1,38	11	9,84	10,0
-14	1,36	1,51	12	10,52	10,7
-13	1,49	1,65	13	11,23	11,4
-12	1,63	1,80	14	11,99	12,1
-11	1,78	1,96	15	12,79	12,8
-10	1,95	2,14	16	13,63	13,6
-9	2,13	2,38	17	14,53	14,5
-8	2,32	2,54	18	15,48	15,4
-7	2,58	2,76	19	16,48	16,3
-6	2,76	2,99	20	17,54	17,3
-5	3,01	3,24	21	18,65	18,3
-4	3,28	3,51	22	19,83	19,4
-3	3,51	3,81	23	21,07	20,6
-2	3,88	4,13	24	22,38	21,8
-1	4,22	4,47	25	23,76	23,0
0	4,58	4,84	26	25,21	24,4
1	4,93	5,22	27	26,74	25,8
2	5,29	5,60	28	28,35	27,2
3	5,69	5,98	29	30,04	28,7
4	6,10	6,40	30	31,82	30,3
5	6,54	6,84	31	33,70	32,1

### *Выполнение работы*

Абсолютную влажность можно найти по формуле (11.3), если известны постоянная психрометра  $A$  и результат показаний сухого и влажного термометров  $\Delta t = t - t_1$ .

По формуле (11.2) определяют относительную влажность.

Обычно для каждого психрометра составляют таблицы (или графики), в которых приводится относительная влажность (в %) в зависимости от  $t_1$  и  $\Delta t$ .

1. Измерьте  $t$  и  $t_1$  обычным психрометром и определите относительную влажность воздуха  $f$  (по таблице психрометра и по графику).

2. Определите абсолютную влажность воздуха (по формуле (11.2)).

3. Определите точку росы. Точка росы – это температура, при которой пары начинают конденсироваться. Ее можно найти с помощью таблицы 11.1 и известной абсолютной влажности.

4. Определите постоянную аспирационного психрометра. Для этого надо измерить для него  $t$  и  $t_1$  и найденное значение абсолютной влажности  $p$ .

### *Вопросы для защиты работы*

1. Как зависит разность показаний сухого и влажного термометров от влажности воздуха? Объясните эту зависимость.

2. Почему с восходом солнца исчезает туман над рекой?

3. Вычислите, какое количество воды сконденсируется в данной аудитории, если температура снизится на  $3^\circ\text{C}$  ниже точки росы.

4. Приведите примеры ситуаций из техники и повседневной жизни, где важен учет и знание относительной влажности воздуха.

5. Какова относительная влажность воздуха в помещении при достижении температуры, равной точке росы?

6. Чем отличаются процессы кипения и испарения воды?

7. Можно ли наблюдать кипение воды при комнатной температуре? При каком условии?

8. Какую роль играет испарение воды в процессах терморегуляции некоторых животных и человека?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вот и закончено изучение раздела «Молекулярная физика» (второго в дисциплине «Общая и экспериментальная физика»). Надо отметить, что многие сферы нашей жизни стали выглядеть совсем по-другому благодаря достижениям молекулярной физики, огромное количество технических устройств, созданных с использованием достижений этой науки, облегчает нашу жизнь.

Само понимание структуры вещества и создание новых веществ с заданными свойствами стало возможно после развития идей атомизма, а создание современных электронных и сканирующих туннельных микроскопов сделало возможным, казалось бы непостижимое, – увидеть молекулы и атомы. И в самых современных технологических процессах возможно управление поведением отдельных атомов и молекул (это позволяют нанотехнологии).

Современному учителю крайне важно быть в курсе достижений науки и техники, уметь объяснить хотя бы их основы на языке элементарной физики.

И самое главное, что нужно понимать, – процесс познания бесконечен.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Иродов, И.Е. Физика макросистем. Основные законы / И.Е. Иродов. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2019. – 207 с. – ISBN 978-5-00101-113-2.
2. Кухлинг, Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг; пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. – Москва: Мир, 1982. – 520 с.
3. Калашников, Н.П. Физика. Интернет-тестирование базовых знаний / Н.П. Калашников, Н.М. Кожевников. – Санкт-Петербург: Лань, 2009. – 160 с. – ISBN 978-5-8114-0925-9.
4. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике: учебное пособие для вузов / В.Н. Александров, С.В. Бирюков, И.А. Васильева [и др.]; ред. Е.М. Гершензон, А.Н. Мансуров. – Москва: Академия, 2004. – 461 с.
5. Пекин, П.В. Методические указания и задания для студентов по молекулярной физике / П.В. Пекин, Ф.В. Круглов, Е.Д. Сереженко, Г.М. Курявцева, А.Н. Брызгалов; отв. за вып. П.В. Пекин. – Челябинск: Изд-во ЧГПИ, 1980. – 65 с.
6. Пекин, П.В. Молекулярная физика: учеб.-метод. пособие для самостоятельной работы студентов / П.В. Пекин, И.И. Беспаль. – Челябинск: Изд-во ЧГПИ, 2009. – 105 с.
7. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие для вузов: в 3 кн. Кн. 1 / И.В. Савельев. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – 438 с. – ISBN 978-5-507-48093-7.
8. Сыгин, В.Г. Молекулярная физика в жизни, технике и природе: учеб. пособие / В.Г. Сыгин. – Санкт-Петербург: Лань, 2016. – 624 с. – ISBN 978-58114-1890-9.
9. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – Москва: Академия, 2008. – 560 с. – ISBN 978-5-7695-5782-8.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ .....	6
<b>1. Идеальный газ</b> .....	7
1.1. Экспериментальные газовые законы .....	7
1.2. Основные теоретические закономерности .....	10
<b>2. Первый закон термодинамики</b> .....	15
2.1. Основные понятия и законы .....	15
2.2. Теплоемкость .....	18
<b>3. Второй закон термодинамики</b> .....	20
3.1. Тепловые и холодильные машины .....	20
3.2. Цикл и теорема Карно .....	23
3.3. Различные формулировки 2-го закона термодинамики .....	24
3.4. Энтропия и свободная энергия .....	25
3.5. Статистический смысл 2-го закона термодинамики .....	26
3.6. Границы применимости 2-го закона термодинамики .....	29
<b>4. Реальные газы</b> .....	30
4.1. Основные понятия и законы .....	30
4.2. Уравнение Ван-дер-Ваальса .....	33
4.3. Внутренняя энергия реального газа. Эффект Джоуля – Томсона .....	37
4.4. Сжижение газов и получение низких температур .....	39
4.5. Фазовый переход I рода .....	43
4.6. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса .....	46

<b>5. Молекулярные явления в жидкостях</b> .....	47
5.1. Основные понятия и законы .....	47
5.2. Смачивание. Краевой угол .....	50
5.3. Давление Лапласа .....	52
5.4. Капиллярные явления .....	55
5.5. Вязкость жидкостей и ее зависимость от температуры .....	58
<b>6. Твердые тела</b> .....	60
6.1. Основные понятия и законы .....	60
6.2. Классификация кристаллов по типу кристаллической решетки .....	61
6.3. Классификация кристаллов по роду частиц и по характеру сил взаимодействия (или по типам связи) .....	64
6.4. несовершенства (дефекты) структуры кристаллов .....	65
6.5. Связь структуры кристаллов с физическими свойствами. Влияние дефектов на физические свойства .....	66
6.6. Плавление и кристаллизация .....	66
6.7. Сублимация .....	68
6.8. Тройная точка. Полиморфизм .....	69
6.9. Тепловые свойства твердых тел .....	71
<b>7. Газодинамика</b> .....	75
7.1. Основные понятия и законы .....	75
7.2. Адиабатное течение газа .....	78
7.3. Движение со сверхзвуковой скоростью. Скачки уплотнения, ударные волны, ударная адиабата .....	81
7.4. Реактивные двигатели .....	85
<b>8. Самоорганизующиеся системы</b> .....	87

8.1. Основные понятия .....	87
8.2. Самоорганизующиеся системы .....	89
ОПИСАНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ .....	96
Лабораторная работа 1. Измерение температуры ...	96
Лабораторная работа 2. Определение термического коэффициента давления газа при помощи газо- вого термометра .....	103
Лабораторная работа 3. Определение плотности сыпучих тел .....	107
Лабораторная работа 4. Определение универсаль- ной газовой постоянной .....	111
Лабораторная работа 5. Определение вязкости воды методом истечения и капилляра (методом Пуазейля) ...	115
Лабораторная работа 6. Определение вязкости газа	119
Лабораторная работа 7. Определение отношения теп- лоемкостей для газов методом Клемана и Дезорма .....	125
Лабораторная работа 8. Определение удельной теплоты парообразования воды .....	132
Лабораторная работа 9. Определение коэффици- ента поверхностного натяжения методом отрыва кольца .....	138
Лабораторная работа 10. Определение коэффици- ента объемного расширения керосина методом Дюлонга и Пти .....	143
Лабораторная работа 11. Определение влажности воздуха .....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	155
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	156

**Учебное издание**

**Беспаль Ирина Ивановна  
Андрейчук Владимир Петрович**

**ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ  
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА  
Учебно-методическое пособие**  
ISBN 978-5-907790-95-7

Работа рекомендована РИС(У) ЮУрГГПУ  
Протокол № 29, 2023 г.

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

Редактор О.В. Боярская  
Технический редактор А.Г. Петрова

Подписано в печать 20.05.2024  
Формат 60x84/16  
Объем 4,4 уч.-изд. л. (9,4 усл. п. л.)  
Тираж 100 экз.  
Заказ №

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