

*МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ*

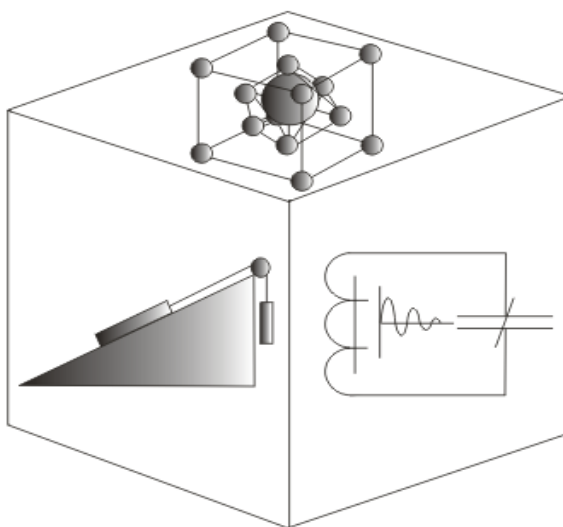
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГОПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ» В Г.ВОЛГОДОНСКЕ**

(Филиал ДГТУ в г. Волгодонске)

Кафедра «Технический сервис и информационные технологии»

**В.В.Кодин, Н.М.Сидоркина**

**Методические указания для выполнения лабораторных  
работ по общей физике (Молекулярная физика и термо-  
динамика)**



г.Волгодонск  
2021

УДК 681.531.1 (075.5)

**Рецензент: декан ФМФ ФГБОУ ВПО ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова, доктор физико-математических наук, профессор А.В. Благин**

**Печатается по решению кафедры «Технический сервис и информационные технологии» филиала ФГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет» в г.Волгодонске от 03.09.2014г.**

**Кодин В.В., Сидоркина Н.М. Методические указания для выполнения лабораторных работ по общей физике (Молекулярная физика и термодинамика) / г.Волгодонск: Филиал ГБОУ ВПО «Донской государственный технический университет» в г.Волгодонске, 2014. – 31с.**

*Методические указания для выполнения лабораторных работ по общей физике (Молекулярная физика и термодинамика) составлены с учетом требований рабочей программы и ее содержания и должны помочь студентам всех форм обучения, приступающим к изучению курса общей физики, при подготовке к экзаменам.*

*Методические указания носят авторский характер.*

© Филиал ДГТУ в г. Волгодонске, 2014г.

© Авторы-составители: Кодин В.В., Сидоркина Н.М.

## Содержание

1. Лабораторная работа № 2.1 «Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса».....	4
2. Лабораторная работа № 2.2 «Определение коэффициента вязкости и исследование зависимости вязкости от температуры вискозиметром Оствальда - Пинкевича».....	8
3. Лабораторная работа № 2.3 «Определение коэффициента внутреннего трения, средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха.....	13
4. Лабораторная работа № 2.4 «Определение отношения теплоемкостей $C_p/ C_v$ воздуха методом Клемана-Дезорма».....	18
5. Лабораторная работа № 2.5 «Определение скорости звука в воздухе и коэффициента Пуассона методом акустического резонанса».....	22
6. Лабораторная работа № 2.6 «Определение превращения энтропии для процесса нагревания и плавления олова .....	25

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

**Цель работы:** изучение процессов переноса (вязкость). Определение коэффициента динамической и кинетической вязкости.

#### Описание установки

На рис. 1 представлен прибор, используемый для определения коэффициента вязкости. Он представляет собой стеклянный цилиндр, наполненный вязкой жидкостью, с воронкой сверху и метками  $M$ , расположенными на определенном расстоянии. Стальной шарик  $\text{Ш}$  электромагнитом поднимается со дна сосуда в воронку и скатывается в отверстие воронки, что облегчает задачу опустить шарик в цилиндр как можно ближе к его оси. Для определения времени прохождения между метками используется секундомер.

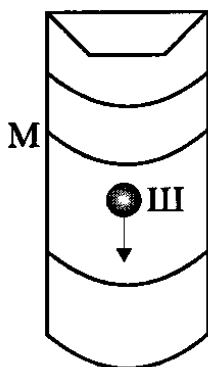


Рис.1

#### Методика измерений и расчетные формулы

**Понятие о вязкости.** При движении жидкости между ее слоями возникают силы внутреннего трения, действующие таким образом, чтобы уравнять скорости всех слоев. Природа этих сил заключается в том, что слои, движущиеся с разными скоростями, обмениваются молекулами. Молекулы из более быстрого слоя передают более медленному слою некоторое количество движения, вследствие чего последний начинает двигаться быстрее.

Молекулы из более медленного слоя получают в быстром слое некоторое количество движения, что приводит к его торможению. Рассмотрим жидкость, движущуюся в направлении оси  $x$  (Рис.2).

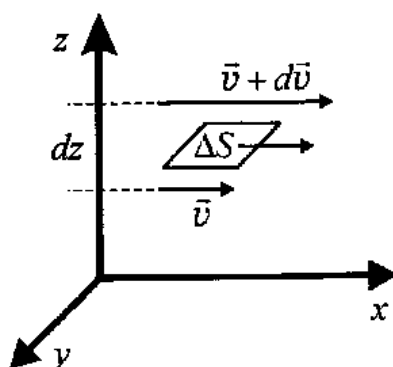


Рис.2

Пусть слои жидкости движутся с разными скоростями. На оси  $z$  возьмем две точки, находящиеся на расстоянии  $\partial z$ . Скорости потока отличаются в этих точках на величину  $\partial v$ .

$$\frac{\partial v}{\partial z}$$

Отношение  $\frac{\partial v}{\partial z}$  характеризует изменение скорости потока в направлении оси  $z$  и называется **градиентом скорости**.

Сила внутреннего трения, действующая между двумя слоями, пропорциональна площади их соприкосновения и градиенту скорости:

$$F = \eta \frac{\partial v}{\partial z} \Delta S \quad (1).$$

Величина  $\eta$  называется коэффициентом внутреннего трения или коэффициентом динамической вязкости. Если в формуле (1) положить численно

$\frac{\partial v}{\partial z} = 1$  и  $\Delta S = 1$ , то  $\eta = F$ , т.е. коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, возникающей на каждой единице поверхности соприкосновения двух слоев, движущихся один относительно другого с градиентом скорости, равным единице. В системе СИ размерность

$[\eta] = \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$ . Эта единица называется Паскаль - секундой. В системе СГС сила измеряется в динах, поверхность соприкосновения –  $\text{см}^2$ , а градиент скорости имеет размерность  $1/\text{сек}$ . Тогда размерность  $\eta$  будет:

$$[\eta] = \text{г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1}$$

В системе СГС единица коэффициента вязкости называется пуазом. Коэффициент динамической вязкости зависит от природы жидкости и для данной жидкости с повышением температуры вязкость уменьшается. Вязкость играет существенную роль при движении жидкостей. Слой жидкости, непосредственно прилегающий к твердой поверхности в результате прилипания, остается неподвижным относительно нее. Скорость остальных слоев возрастает по мере удаления от твердой поверхности. Наличие слоя жидкости между трущимися поверхностями твердых тел способствует уменьшению коэффициента трения.

Наряду с коэффициентом динамической вязкости часто употребляют

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

коэффициент кинематической вязкости:  $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ , где  $\rho$  - плотность жидкости. В системе СИ  $[\nu] = \text{м}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$ .

**Теория метода Стокса.** Если шарик падает в жидкости, простирающейся безгранично по всем направлениям, не оставляя за собой никаких завихрений, то на него действует сила внутреннего трения, равная по закону Стокса:

$$F = 6\pi\eta r v \quad (2),$$

где  $r$  - радиус шарика;  $v$  - его скорость.

Если шарик свободно падает в вязкой жидкости, то на него будут действовать сила тяжести  $mg = \rho_{ш} Vg$ , выталкивающая сила  $F_A = \rho_{ж} Vg$ , равная весу вытесненной жидкости ( $V$ - объем шарика,  $\rho_{ш}$  - плотность шарика,  $\rho_{ж}$  - плотность жидкости).

На основании второго закона Ньютона с учетом соотношения (2) имеем:

$$m \frac{\partial v}{\partial t} = \rho_{ш} Vg - \rho_{ж} Vg - 6\pi\eta r v \quad (3).$$

Сила сопротивления с увеличением скорости движения шарика возрастает, а ускорение уменьшается и, наконец, шарик достигает такой скорости, при которой ускорение становится равным нулю, и тогда уравнение (3) принимает вид:

$$\frac{3}{4} \pi r^3 g (\rho_{ш} - \rho_{ж}) - 6\pi\eta r v = 0 \quad (4),$$

где вместо объема подставили  $V = \frac{3}{4} \pi r^3$ . В этом случае шарик движется с постоянной скоростью  $v_0$ . Такое движение шарика называется установившимся. Решая уравнение (4) относительно коэффициента внутреннего трения, получаем:

$$\eta = \frac{2(\rho_{ш} - \rho_{ж})r^2 g}{9v_0} \quad (5).$$

Скорость шарика  $v_0$  можно определить, зная расстояние  $l$  между метками на сосуде и время  $t$ , за которое шарик проходит это расстояние;  $v_0 = l/t$ . Тогда из выражений (3) и (5) следует, что коэффициент вязкости равен:

$$\eta = \frac{2(\rho_{ш} - \rho_{ж})r^2 gt}{9l} \quad (6).$$

Практически невозможно осуществить падение шарика в безграничной среде, так как всегда жидкость находится в каком-то сосуде, имеющем стенки и дно. Поэтому в формуле (6) вводится поправочный коэффициент:

$$K = \frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}} \quad (7),$$

где  $R$ - радиус цилиндрического сосуда. Тогда формула (6) с учетом (7) принимает следующий окончательный вид:

$$\eta = \frac{2(\rho_{ш} - \rho_{ж})r^2 gt}{9l(1 + 2,4 \frac{r}{R})} \quad (8).$$

## Порядок выполнения работы

1. Включить электромагнит и при его помощи переместить стальной шарик со дна сосуда в воронку.
2. Измерить время движения шарика между метками не менее трех раз для каждого из расстояний:  $l_1 = 0,3\text{ м}$ ;  $l_2 = 0,4\text{ м}$ ;  $l_3 = 0,5\text{ м}$ .
3. Повторить пункты 1-2 для жидкости во II сосуде.
4. Результаты измерений занести в таблицу.
5. Рассчитать относительную и абсолютную погрешности измерения коэффициента вязкости.
6. Результаты вычислений занести в таблицу 1.

## Таблица результатов измерений

1. Данные установки:

- радиус шарика  $r = (2,03 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}\text{ м}$ ;
- радиус сечения сосуда  $R = (22,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}\text{ м}$ ,  $R_2 = (21,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}\text{ м}$ ;
- плотность шарика  $\rho_{ш} = 7700\text{ кг/м}^3$ ;
- плотность глицерина  $\rho_{ж1} = 1260\text{ кг/м}^3$ ;
- плотность касторового масла  $\rho_{ж2} = 920\text{ кг/м}^3$ ;

подставили  $V = \frac{3}{4}\pi r^3$ , подставили  $V = \frac{3}{4}\pi R^3$ .

2. Вычислить коэффициент вязкости по формуле (8).

Таблица 1

№	$l, \text{ м}$	$t, \text{ с}$	$t_{cp}, \text{ с}$	$v, \text{ м/с}$	$\eta, \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	$\Delta \eta$	$\eta \pm \Delta \eta$	$\eta_{ТАБЛ}$

3. Определить процент отклонения найденного из опыта значения коэффициента вязкости от теоретического по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\eta_{ЭКС} - \eta_{ТЕОР}|}{\eta_{ТЕОР}} * 100 \quad \%$$

## Контрольные вопросы

1. Что такое вязкость? В каких единицах измеряется коэффициент динамической и кинематической вязкости?
2. Какой коэффициент вязкости измеряется в данной работе?

3. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости?
4. Почему, начиная с некоторого момента времени, шарик движется равномерно?
5. Как изменяется скорость движения шарика с увеличением его диаметра?
6. Объясните зависимость коэффициента вязкости от температуры для жидкостей и газов.
7. Предложите способ для определения методом Стокса коэффициента вязкости непрозрачных жидкостей.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.2

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ВИСКОЗИМЕТРОМ ОСТВАЛЬДА - ПИНКЕВИЧА

**Цель работы:** определение коэффициента кинематической вязкости методом Пуазейля и снятие зависимости кинематической вязкости от температуры.

#### Теоретическая часть

Всем реальным жидкостям и газам присуща вязкость (внутреннее трение). Макроскопическое движение, возникающее в жидкости или газе, постепенно уменьшается из-за внутреннего трения.

При перемещении одного слоя реальной жидкости относительно других возникают силы внутреннего трения, направленные по касательной к поверхности слоев. Действие этих сил проявляется в том, что со стороны слоя, движущегося быстрее, на слой, движущийся медленнее, действует ускоряющая сила. Со стороны слоя, движущегося медленнее, действует тормозящая сила. Она определяется уравнением Ньютона

$$F = \eta \left. \frac{\partial v}{\partial x} \right| \Delta S,$$

где  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости - численно равен силе трения, возникающей между жидкости (газа) на единице площади при градиенте

скорости, равном единице;  $\frac{\partial v}{\partial x}$  - градиент скорости - показывает, как быстро меняется скорость при переходе от слоя к слою;  $\Delta S$  - площадь соприкосновения слоев.

Уравнение Ньютона справедливо для жидкостей, у которых вязкость не зависит от скорости. Такие жидкости называются ньютоновскими, а их вязкость - нормальной. Жидкости, вязкость которых зависит от скорости, называются неньютоновскими, а их вязкость - аномальной. К ним относятся жид-



кости, состоящие из сложных и крупных молекул, например, растворы полимеров, кровь.

Коэффициент вязкости зависит от природы жидкости, от температуры, от давления при низких температурах.

Различный характер зависимости вязкости жидкостей и газов от температуры указывает на различный механизм их внутреннего трения.

Уравнивание скорости движения соседних слоев газов можно объяснить тем, что из слоя газа, движущегося с большей скоростью, переносится количество движения к слою, у которого скорость меньше и наоборот.

При повышении температуры средняя скорость увеличивается пропорционально  $\sqrt{T}$  и, следовательно, увеличивается переносимый импульс  $\Delta(mv) \propto \sqrt{T}$  и, соответственно, увеличивается вязкость  $\eta \propto \sqrt{T}$ .

Вязкость газов почти не зависит от давления. С одной стороны, с уменьшением давления уменьшается число столкновений, что должно приводить к уменьшению числа молекул, приходящих из определенной области для передачи своего импульса молекулам в соседней области. С другой стороны, при понижении давления увеличивается средняя длина свободного пробега молекул и в результате молекулы, переносящие импульс из одного движущегося слоя в другой, могут воздействовать на более удаленные области. Эти эффекты компенсируют друг друга и вязкость газов не зависит от давления.

В жидкостях внутреннее трение обусловлено действием межмолекулярных сил. Расстояния между молекулами жидкости сравнительно невелики, а силы взаимодействия значительны. Молекулы жидкости подобно частицам твердого тела колеблются около положений равновесия, но эти положения не являются постоянными. По истечении некоторого времени молекула скачком переходит в новое положение. Это время называют "временем оседлой жизни" или временем релаксации. С повышением температуры и уменьшением давления это время уменьшается, что обуславливает подвижность жидкости и ее малую вязкость.

Зависимость вязкости от температуры имеет сложный характер. Чем чаще молекулы меняют свои положения равновесия, тем более текуча и менее вязка жидкость.

Различают два вида течения жидкости (газа):

**ЛАМИНАРНОЕ**- слои жидкости скользят друг относительно друга, не перемешиваясь, скорость частиц постоянна;

**ТУРБУЛЕНТНОЕ** - происходит перемешивание слоев жидкости и скорость частиц все время меняется.

Характер течения зависит от значения величины числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}$$

где  $\rho$  - плотность жидкости;

$v$  - средняя скорость потока;

$L$  - характерный для поперечного сечения размер.

В число Рейнольдса входят в виде отношения две величины, зависящие от свойств жидкости: плотность и коэффициент вязкости.

Отношение  $Re = \frac{vl}{\nu}$  называется кинематической вязкостью, или, также, числом Рейнольдса, которое может служить критерием подобия течения жидкостей в трубах.

Характер течения различных жидкостей (газов) будет одинаков, если течению соответствует одно и то же значение  $Re$ .

При  $Re < 1000$  - течение ламинарное, при  $Re > 2000$  - течение турбулентное.

Если  $1000 < Re < 2000$  - переход от ламинарного к турбулентному течению.

### Метод Пуазейля по определению коэффициента вязкости

Этот метод основан на ламинарном течении в тонком капилляре. При стационарном течении в трубе постоянного сечения (Рис.1)

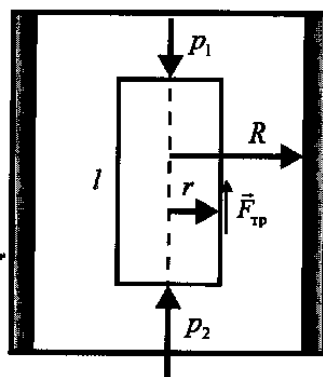


Рис.1

скорости всех частиц остаются неизменными, следовательно, сумма сил, действующих на выделенный объем, равна нулю:

$$(p_1 - p_2) \pi r^2 - F_{тр} = 0,$$

$$(p_1 - p_2) \pi r^2 - \eta \left| \frac{\partial v}{\partial r} \right| 2\pi r l = 0,$$

$$(p_1 - p_2) \pi r^2 = \eta \left| \frac{\partial v}{\partial r} \right| 2\pi r l.$$

Так как скорость жидкости убывает от оси к стенке, то  $\frac{\partial v}{\partial r} < 0$ ,

тогда получаем  $(p_1 - p_2) \pi r^2 = - \eta \left| \frac{\partial v}{\partial r} \right| 2\pi r l$ ,  $\partial v = - \frac{(p_1 - p_2)}{2\eta l} r \partial r$ .

Проинтегрируем данное выражение:  $v = - \frac{\Delta p r^2}{4\eta l} + C$ , где  $\Delta p = p_1 - p_2$ .

При  $r=R, v=0$ . Тогда  $C = \frac{\Delta p R^2}{4\eta l}$  и окончательно  $v = \frac{\Delta p R^2}{4\eta l} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$ .

Из данной формулы видно, что при ламинарном течении скорость изменяется по параболическому закону. За время  $t$  из трубы вытечет объем жидкости  $V$ , равный

$$V = \int_0^R v t \cdot 2r \partial r = \frac{\Delta p R^2}{4\eta l} 2\pi t \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) r \partial r = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta l} t \quad (1).$$

Полученное соотношение называется формулой Пуазейля. Измерение входящих в формулу Пуазейля величин ( $R$ ,  $l$ ,  $\Delta p$ ) провести сложно, поэтому прибегают к определению вязкости жидкости методом сравнения ее движения в данном вискозиметре с движением эталонной жидкости, вязкость которой известна. В лабораторной работе такой жидкостью является вода.

$$V_0 = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\eta_0 l} t_0 \quad (2).$$

Для эталонной жидкости имеем

Если капилляры и объемы вытекающей жидкости одинаковы, то, учитывая, что одинаковым является  $\Delta p = \rho g h$  (жидкость вытекает под действием силы тяжести), можно из соотношений (1) и (2) найти неизвестный коэффициент вязкости<sup>7</sup>:

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho t}{\rho_0 t_0} \quad \text{или} \quad v = v_0 \frac{t}{t_0} \quad (3).$$

Таким образом, методом Пуазейля с помощью капиллярного вискозиметра можно непосредственно определить кинематическую вязкость.

### Описание вискозиметра Оствальда-Пинкевича

Вискозиметр - это U-образная стеклянная трубка (Рис.2).

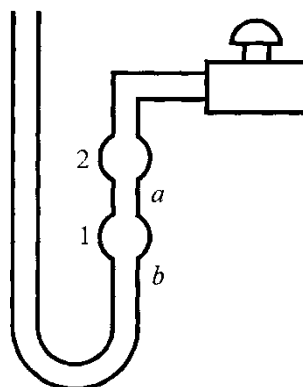


Рис.2

Одно колено трубки содержит два расширения 1, 2 и капилляр.

Сверху и снизу расширения 1 нанесены метки «а» и «б». В работе используются два вискозиметра. В один - налита вода, в другой - исследуемая жидкость.

К одному колону вискозиметра подсоединен насос, позволяющий пере-гнать жидкость в расширение 1.

### Порядок выполнения работы

1. Закройте левую трубку вискозиметра с водой пальцем и осторожно пере-гоните воду, чтобы она начала заполнять расширение 2 (Рис.2).

Откройте левую трубку, когда уровень воды опустится до метки «а», включите секундомер и остановите его, когда жидкость пройдет отметку «б». Запишите показания секундомера в таблицу 1. Опыт повторите 3 раза.

2. Повторите пункт 1 для другого вискозиметра с исследуемой жидкостью. Запишите показания секундомера в таблицу 1.

3. Включите спираль обогревателя и нагрейте исследуемую жидкость до 70°C. Выключите обогреватель. Проведите измерения вязкости по пункту 1 при различных температурах (70°, 60°, 50°, 40°, 30°). Результаты измерений запишите в таблицу 2.

Таблица 1

$t_0, C$	$t_{0cp}, C$	$t, C$	$t_{cp}, C$	$v_0, \frac{m^2}{c}$	$v, \frac{m^2}{c}$

Таблица 2

$t^0, C$	$t, C$	$t_{cp}, C$	$v, \frac{m^2}{c}$
70			
60			
50			
40			
30			

4. Постройте график зависимости кинематической вязкости от температуры.

### Контрольные вопросы

1. Силы внутреннего трения.

Объясните молекулярно-кинетический механизм вязкости.

Напишите уравнение Ньютона для течения вязкой жидкости.

Что такое ньютоновская жидкость и неньютоновская?

2. Как зависит вязкость жидкости и газа от температуры? Причины.

3. Какое течение жидкости называется ламинарным? Турбулентным?

Что характеризует число Рейнольдса?

4. Сущность метода Пуазейля (с выводом).

5. Объясните методику определения кинематической вязкости с помощью вискозиметра Оствальда-Пинкевича.

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.3

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ, СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

**Цель работы:** экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воздуха, вычисление средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекул воздуха.

#### Описание установки

Для определения коэффициента вязкости в данной работе используется метод капилляра, разработанный Пуазейлем. Однако, вследствие большой сжимаемости газов, метод Пуазейля можно применять только для небольших разностей давления газа на концах капилляра. Практически это выполняется в приборе-аспираторе, который показан на рис.1.

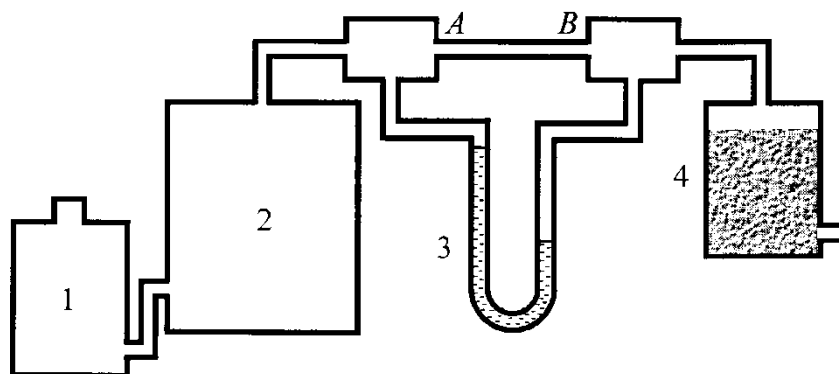


Рис.1

Главная часть аспиратора - капилляр  $AB$ , через который протекает воздух из атмосферы (через осушительный фильтр 4). Воздух засасывается в аспиратор 2, так как в нем создается разрежение при понижении уровня воды, протекающей в сосуд 1. Для этого сосуд 1 опускают ниже аспиратора 2.

Объем  $V$  воздуха, прошедшего через капилляр за время  $I$ , определяется по понижению уровня воды в аспираторе. Разность давлений на концах капилляра измеряется водяным манометром 3.

### Методика измерений

Вязкость (внутреннее трение) - это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

Для газов так же, как и для жидкостей, коэффициент внутреннего трения  $\eta$  определяется методом Пуазеля.

Рассмотрим капилляр радиусом  $R$  и длиной  $l$ . В жидкости мысленно выделим цилиндрический слой радиуса  $r$  и толщиной  $dr$  (Рис.2).

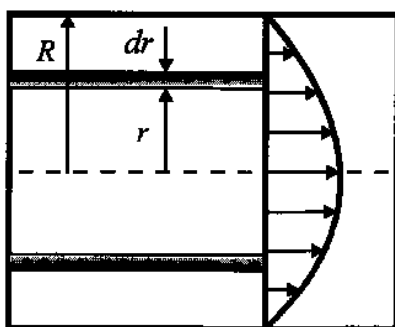


Рис.2

Сила внутреннего трения, действующая на боковую поверхность этого слоя, равна

$$F = -\eta \frac{dv}{dr} dS,$$

где  $dS$  - площадь боковой поверхности цилиндрического слоя. Знак минус означает, что при возрастании радиуса скорость уменьшается. Сила внутреннего трения, действующая на боковую поверхность цилиндра, уравновешивается силой давления, действующей на его основание:

$$-\eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr} = \Delta p \pi r^2$$

Следовательно, 
$$dv = -\frac{\Delta p}{2\eta l} r dr$$
.

После интегрирования, учитывая, что скорость на расстоянии  $R$  от оси равна нулю, получим:

$$v = \frac{\Delta p R^2}{4\eta l} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right).$$

За время  $t$  из трубы вытечет жидкость, объем  $V$  которой равен

$$V = \int_0^R v t \cdot 2\pi r dr = \frac{\Delta p R^2}{4\eta l} 2\pi t \int_0^R \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) r dr = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\pi l} t$$

Отсюда вязкость равна

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8Vl} \quad (1).$$

Разность давлений  $\Delta p = p_1 - p_2$  определяется из выражения:

$$\Delta p = \rho g \Delta h \quad (2),$$

где  $\Delta h = h_1 - h_2$  - разность уровней жидкостного манометра;  
 $\rho$  - плотность жидкости в манометре.

Если температура воздуха в комнате и температура воздуха в аспираторе равны, то объем воздуха, протекающей через капилляр за время  $t$ , определяется объемом вытесненной воды.

Молекулы газа, находясь в состоянии хаотичного движения, непрерывно сталкиваются друг с другом. Между двумя последовательными столкновениями молекулы проходят некоторый путь ( $\langle \lambda \rangle$ ), который называется средней длиной свободного пробега молекул.

Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется эффективным диаметром молекулы,  $d_{эф}$ . Он зависит от скорости сталкивающихся молекул, то есть от температуры газа (несколько уменьшается с ростом температуры).

За 1с молекула проходит путь, равный средней арифметической скорости  $\langle v \rangle$ , и если за 1с молекула испытывает среднее число столкновений, равное  $\langle z \rangle$ , то тогда средняя длина пробега равна

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} \quad (3).$$

Среднее число столкновений выражается формулой

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d_{эф}^2 n \langle v \rangle \quad (4),$$

где  $n$  - концентрация молекул газа.

Сравнивая выражения (3) и (4), можно получить формулу для вычисления эффективного диаметра молекул воздуха:

$$d_{эф} = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2} \pi \langle \lambda \rangle n}} \quad (5).$$

Из формул (1) и (2) можно получить экспериментальное значение коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{\pi R^4 t \rho g \Delta h}{8 \nu l} \quad (6).$$

Зная вязкость газа (формула (6)), можно рассчитать среднюю длину свободного пробега молекул воздуха:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle} \quad (7),$$

где  $\langle v \rangle$  рассчитывается по формуле

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \quad (8),$$

плотность газа определяется из соотношения

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (9),$$

где  $R$ - газовая постоянная.

Давление воздуха  $p$  можно принять численно равным атмосферному ( $p = p_{атм.}$ ) из-за малой разности давлений на концах капилляра. Подставляя формулу (7) в формулу (5), можно вычислить концентрацию молекул по формуле:

$$n = \frac{p}{kT} \quad (10),$$

где  $k$  - постоянная Больцмана.

### Порядок выполнения работы

1. Записать давление  $p_{атм.}$  и температуру  $T$  воздуха в помещении лаборатории.
2. Записать данные установки ( $l$  и  $R$  капилляра).
3. Наполнить аспиратор 2 водой. Опустить сосуд 1 ниже уровня аспиратора 2. При этом на манометре 3 устанавливается определенная разность уровней  $\Delta h$  (см. рис.1).
4. В момент, когда уровень воды в аспираторе достигнет верхней отметки, включить секундомер. Измерить время  $t$ , за которое уровень воды опустится до одной из нижних меток, то есть время истечения определенного объема воды  $V$ .
5. Повторить опыт по пунктам 3-4 не менее 3 раз.



6. Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1

№	$t, c$	$\Delta h, M$	$V, M^3$
ср			

### Обработка результатов измерений

1. Используя формулу (6), найти коэффициент вязкости.
2. Вычислить среднюю скорость  $\langle v \rangle$  теплового движения молекул воздуха и плотность воздуха  $\rho$  по формулам (8) и (9).
3. Вычислить концентрацию молекул по формуле (10).
4. Результаты вычислений занести в таблицу 2

Таблица 2

$\eta, Pa \cdot c$	$\langle v \rangle, M/c$	$\rho, кг/м^3$	$\langle \lambda \rangle, M$	$d_{эф}, M$

5. Сделать вывод о качестве проведенного эксперимента, сравнив полученные значения с табличными. Для воздуха  $\eta = 184 \cdot 10^{-5} Pa \cdot c$ .

### Контрольные вопросы

1. При каких условиях газ подчиняется законам идеального газа?
2. Какие физические величины называются параметрами газа?
3. Каково молекулярно - кинетическое толкование внутреннего трения (вязкости) в идеальном газе?
4. Объяснить физический смысл коэффициента вязкости.
5. Как в данной работе создается разность давлений на концах капилляра?
6. Что такое длина свободного пробега и эффективный диаметр молекулы? Какие формулы используются для их вычисления в данной работе?
7. Вывести формулу Пуазейля.
8. Как зависит коэффициент вязкости газов от температуры и давления?
9. Как устроен прибор - аспиратор?

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.4

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ $C_p/C_v$ ВОЗДУХА МЕТОДОМ КЛЕМАНА - ДЕЗОРМА

**Цель работы:** определение отношения теплоемкостей  $C_p / C_v$  для воздуха.

## Методика измерений и расчетные формулы

Молярной теплоемкостью вещества называется количество теплоты, необходимое для нагревания одного моля данного вещества на один градус. Состояние газа определяется тремя параметрами: давлением  $p$ , объемом  $V$  и температурой  $T$ . Эти величины связаны уравнением Менделеева-Клапейрона, которое для одного моля газа имеет вид:

$$pV=RT \quad (1).$$

Величина теплоемкости газов зависит от условий нагревания. Выясним эту зависимость, воспользовавшись уравнением состояния одного моля идеального газа (1) и первым началом термодинамики, которое можно сформулировать следующим образом: количество теплоты, переданное газу, затрачивается на увеличение его внутренней энергии и на работу, совершаемую им против внешних сил, то есть

$$dQ=dU+Da(2).$$

По определению теплоемкости (с учетом (2))

$$C = \frac{dQ}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{dA}{dT} \quad (3).$$

Из уравнения (3) видно, что теплоемкость может иметь различные значения в зависимости от способов нагревания газа, так как одному и тому же изменению температуры могут соответствовать различные значения изменения внутренней энергии и работы газа. Элементарная работа газа равна:

$$dA=pdV(4).$$

Рассмотрим изохорический процесс, то есть процесс, происходящий при постоянном объеме газа. В этом случае из (4) следует, что работа газа равна нулю. Следовательно, молярная теплоемкость при постоянном объеме равна

$$C_v = \frac{dU}{dT} \quad (5).$$

Рассмотрим изобарический процесс, при котором не изменяется давление газа. Теплоемкость в этом процессе будет равна:

$$C_p = \frac{dU}{dT} + p \frac{dV}{dT} \quad (6).$$

Из уравнения (1) следует, что

$$pdV + Vdp = RdT(7),$$

но так как  $dp=0$ , получим  
 $pdV = RdT(8)$ .

Подставляя (8) в уравнение (6) и используя (5), получим:

$$C_p = C_v + R \quad (9).$$

В адиабатическом процессе (без теплообмена с окружающей средой) из (2) следует, что  $dA = -dU$ , или

$$PdV = -C_v dT(10).$$

Разделив (7) на (10) и учитывая (9), получим:

$$\frac{dp}{p} = -\gamma \frac{dV}{V} \quad (11).$$

Интегрируя (11) и потенцируя, получим уравнение адиабатического процесса (уравнение Пуассона)

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (12).$$

Величину  $\gamma$  можно определить с помощью прибора Клемана-Дезорма, состоящего из теплоизолированного баллона  $B$  с воздухом, насоса и манометра  $M$  (рис.1).

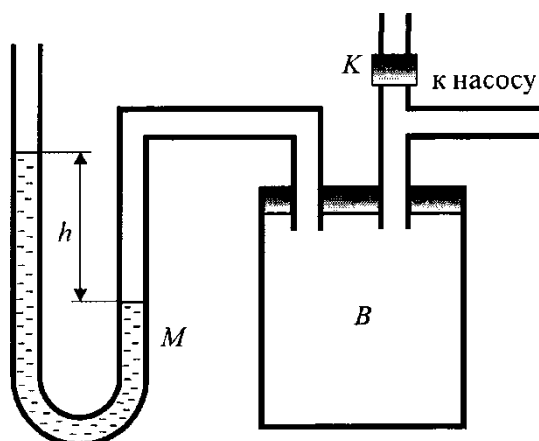


Рис. 1

В баллон при закрытом кране  $K$  накачивается воздух. Давление воздуха в баллоне повысится и станет равным  $p_1 = p_0 + \rho gh_1$ ,

где  $\rho gh_1$  - избыток давления воздуха в баллоне над атмосферным давлением  $p_0$ . Величина  $h_1$  измеряется манометром  $M$ . Для этого открывают на короткое время кран  $K$ , чтобы давление в баллоне сравнялось с атмосферным ( $p_2 = p_0$ ), после чего закрывают кран.

Пусть масса воздуха после накачивания насосом в сосуде в объеме  $V$  равна  $m$ . При открывании крана часть воздуха выходит. Обозначим массу вышедшего воздуха через  $\Delta m$ , тогда масса оставшегося воздуха  $m_1 = m - \Delta m$ .

Масса  $m_1$ , которая заключена в объеме  $V$ , занимала перед открытием крана меньший объем  $V_1$ .

Так как процесс кратковременный и заметного теплообмена между газом и стенками баллона нет, то его можно считать адиабатическим.

Согласно уравнению Пуассона (12) для массы воздуха  $m$ , получим:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma.$$

Вследствие адиабатического расширения газа температура его понизилась, а затем в результате теплообмена температура газа через небольшой промежуток времени станет равной комнатной. При этом давление газа поднимется до величины  $p_3 = p_0 + \rho g h_2$ .

Начальное и конечное состояния газа наблюдаются при одинаковой температуре.

Поэтому на основании закона Бойля-Мариотта получим:  $p_1 V_1 = p_3 V$ .

Решая уравнения Пуассона и Бойля-Мариотта относительно  $\gamma$ , получим:

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg p_1 - \lg p_3} \quad (13).$$

Разложим  $\lg p_1$  и  $\lg p_3$  в ряд Тейлора, ограничившись двумя первыми членами:

$$\lg p_1 = \lg (p_0 + \rho g h_1) = \lg p_0 + \frac{\rho g h_1}{p_0} + \dots;$$

$$\lg p_3 = \lg (p_0 + \rho g h_2) = \lg p_0 + \frac{\rho g h_2}{p_0} + \dots$$

Подставляя эти выражения в формулу (13), получим окончательно:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_2 - h_1} \quad (14).$$

## Порядок выполнения работы

1. Накачать насосом немного воздуха в баллон. При накачивании воздух нагревается, следовательно, необходимо выждать 2-3 мин, пока благодаря теплообмену температура в баллоне не станет равной комнатной.

2. Измерить манометром избыточное давление воздуха  $h_1$  (в мм столба жидкости).

3. Открыть кран  $K$  и в тот момент, когда уровни жидкости в обоих коленах манометра  $M$  сравняются, быстро закрыть кран.
4. Выждав 2-3 мин, пока газ, охлажденный при адиабатическом расширении, нагревается до комнатной температуры, измерить избыточное давление  $h_2$ . Следует помнить, что  $h_1$  и  $h_2$  отсчитываются как разность высот жидкости в обоих коленах манометра. Опыт по определению  $h_2$  повторить 3-5 раз.
5. Рассчитать среднее значение  $h_2$  и по формуле (14) вычислить значение  $\gamma$ .
6. Повторить пп. 1-5 для двух новых значений  $h_1$ . Значения  $h_1$  согласовать с преподавателем.
7. Результаты опытов занести в таблицу 1.

Таблица 1

$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$h_{2\text{ ср}}$ , мм	$\gamma$	$\gamma_{\text{ср}}$

8. Определить относительное отклонение найденного из опыта значения  $\gamma$ , от теоретического по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\gamma_{\text{эксп}} - \gamma_{\text{теор}}|}{\gamma_{\text{теор}}} \cdot 100 \%$$

### Контрольные вопросы

1. Почему теплоемкости газов зависят от способов и условий нагревания?
2. Почему  $C_p$  больше, чем  $C_v$ ?
3. Какой процесс называется адиабатическим?
4. Что происходит с внутренней энергией газа при адиабатическом процессе?
5. Как изменяется температура газа при адиабатическом процессе?
6. Пояснить вывод формул (12) и (14).

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.5

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ И КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА

**Цель работы:** измерение скорости звука в воздухе и определение коэффициента Пуассона.

#### Описание установки

В комплект установки входят: звуковой генератор, нуль-индикатор, труба. Труба представляет собой устройство для получения стоячих волн, внутри которой перемещается плотная перегородка. У одного из концов трубы расположен динамик, подключенный к звуковому генератору. Перед динамиком внутри трубы установлен микрофон, воспринимающий звуковые волны, возбужденные в трубе.

### Методика измерений и расчетные формулы

Скорость звука определяется методом стоячих волн, образующихся в столбе воздуха, заключенного в трубе. Воздушные звуковые волны, распространяясь в трубе, отражаются от перегородки. Сигнал от микрофона подается на вертикально отклоняющиеся пластины электронно-лучевой трубки индикатора, настраиваемого на частоту звукового генератора. В результате на экране индикатора появляется вертикальная светящаяся линия, длина которой зависит от амплитуды результирующего звукового колебания, возникающего в трубе. Перемещая перегородку, можно изменять длину воздушного столба:

$$L = x_{k+1} - x_k \quad (1),$$

где  $x_k$  - координаты узлов.

При этом будет изменяться длина светящейся линии на экране. Существует ряд положений, перегородки, при которых длина будет удовлетворять условию:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (2),$$

то есть полученный столб воздуха в трубе будет резонировать ( $n$  - целое число,  $\lambda$  - длина звуковой волны).

Из формулы (2) следует, что наименьшая разность длин двух воздушных столбов, в которых возникает резонанс, равна

$$L = L_n - L_{n-1} = n \frac{\lambda}{2} - (n-1) \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2}.$$

Откуда  $\lambda = 2L$ .

Но поскольку  $g = \lambda \nu$ , где  $g$  и  $\nu$  - скорость звуковой волны и частота колебаний, соответственно, скорость звука определится по формуле  $g = 2L \nu$  (3).

Частота колебаний задается источником звука – звуковым генератором. Определив скорость звука, можно найти коэффициент Пуассона

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}, \text{ исходя из соотношения}$$

$$\gamma = \frac{M g^2}{RT} \quad (4),$$

где  $M$  - молярная масса газа, для воздуха  $M=29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/К} \cdot \text{моль}$ ;  
 $T$  - абсолютная температура;  
 $R$ -газовая постоянная.

Вывод (4) основан на том, что колебания плотности и давления газа, связанные с ними колебания температуры в звуковой волне происходят настолько быстро, а теплопроводность настолько мала, что для таких процессов теплообмен не играет существенной роли. Поэтому разность температур между участками сгущений и разрежений газа в звуковой волне не успевает выравняться, так что распространение звука можно считать адиабатическим процессом, описываемым уравнением Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const} \quad (5).$$

Дифференцируя (5), получаем:  $\frac{dp}{dV} = -\gamma \frac{p}{V}$ .

Поскольку модуль упругости газа по определению равен

$$E = -V \frac{dp}{dV}$$

тогда получаем, что для адиабатического процесса

$$E = \gamma p \quad (6).$$

Подставим (6) в выражение для скорости распространения бегущей зву-

ковой волны:  $g = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ ,

где  $\rho$  - плотность среды. Получим, что

$$g^2 = \frac{\gamma^3}{\rho} \quad (7).$$

Из уравнения Менделеева-Клапейрона имеем:

$$p = \frac{m}{V} = \frac{\rho M}{RT} \quad (8).$$

Подставляя (8) в (7), получим соотношение (4).

## Порядок выполнения работы

1. Включить индикатор и звуковой генератор.

2. Подготовить генератор к работе, поставив переключатель диапазона частот в положение 1000 Гц.
3. Подготовить индикатор к работе:
  - а) переключатель «чувствительность» поставить в положение «30»;
  - б) ручку «усиление х» повернуть против часовой стрелки до упора;
  - в) ручкой «настройка» добиться максимальной длины светящейся линии на экране. В случае выхода линии за пределы экрана уменьшить амплитуды сигнала ручкой «рег.выхода» на панели генератора.
4. Перемещая отражатель звуковой волны из крайнего левого положения, добиться максимума светящейся линии на экране и определить по масштабной линейке координату первого узла стоячей волны.
5. Перемещая отражатель далее вправо, получить на экране очередные максимумы и записать их координаты.
6. Опыт повторить не менее трех раз. Найти среднее значение каждой координаты.
7. Определить среднее расстояние  $L$  между узлами стоячей волны. Для этого использовать формулу (1), где  $k = 1, 2, \dots$
8. Повторить измерения по пп. 3-7 на частоте 1300 Гц.
9. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 1.

Таблица 1

$\nu$ , Гц	№п/п	$x_1$ , см	$x_2$ , см	$x_3$ , см	$L$ , см
1000	1				
	2				
	3				
	ср				
	$\theta_1 = \dots m / c \quad \gamma_1 = \dots$				
1300	1				
	2				
	3				
	ср				
	$\theta_2 = \dots m / c \quad \gamma_2 = \dots$				

### Обработка результатов измерений

1. Определить скорость звука по формуле (3).
2. Определить значение коэффициента Пуассона  $\gamma$  по формуле (4).
3. Определить теоретическое значение коэффициента

Пуассона по формуле  $\gamma_T = \frac{i+2}{i}$ ,



где  $i$  - число степеней свободы. Для воздуха  $i=5$  (воздух, в основном, двух-атомный газ).

4. Определить соответствие теоретического и экспериментального значений

$$\frac{\Delta \gamma}{\gamma} = \frac{|\gamma_T - \gamma|}{\gamma}$$

### Контрольные вопросы

1. Какие волны называются упругими?
2. В чем особенности распространения упругих волн в среде?
3. От чего зависит скорость распространения бегущей волны?
4. Каково условие возникновения стоячих волн в воздушной трубе?
5. Опишите изопроцессы, происходящие в идеальных газах.
6. Почему к газу, в котором распространяются звуковые волны, можно применить уравнение адиабатического процесса?
7. Поясните различие теплоемкостей при постоянных объеме и давлении.
8. Поясните вывод формул (3), (4).

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.6

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРАЩЕНИЯ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ПРОЦЕССА НАГРЕВАНИЯ И ПЛАВЛЕНИЯ ОЛОВА

**Цель работы:** Построение диаграммы процесса нагревания и плавления олова, определение его температуры плавления и расчет для этого процесса приращения энтропии.

#### Теоретическое введение

Термодинамика научает наиболее общие свойства термодинамических систем, находящихся в равновесных состояниях, а также процессы перехода между этими состояниями.

Термодинамика строится на основе фундаментальных принципов (начал), которые являются обобщением многочисленных экспериментальных данных и выполняются независимо от конкретной природы тел, входящих в термодинамическую систему. Поэтому результаты, получаемые термодинамикой, имеют универсальный характер.

Если термодинамическая система помещается в неизменные во времени условия и при этом исключается перенос вещества, энергии, импульса, электрического заряда через ее границы, то такая термодинамическая система называется изолированной.

Изолированная термодинамическая система с течением времени приходит в состояние термодинамического равновесия и никогда самопроизвольно выйти из него не может. Это утверждение называют общим принци-

пом термодинамики, так как является основой всей термодинамики и определяет границы ее применимости.

До наступления равновесия состояние изолированной системы является неравновесным. Неравновесным является также любое состояние системы при отсутствии термодинамической изолированности.

Свойства равновесного состояния не зависят от деталей движения отдельных частиц, входящих в термодинамическую систему, а определяются поведением всего коллектива частиц. Это поведение характеризуется небольшим числом независимых физических параметров, названных макроскопическими параметрами. Такими параметрами могут быть, например, объем, температура, давление, напряженности электрического и магнитного полей и т. п.

Макроскопические параметры определяют усредненную картину движения очень большого числа частиц. Поэтому макроскопические параметры имеют смысл средних значений физических величин, описывающих движение частиц тела (системы).

Функцией состояния называют такую величину, которая для данного равновесного состояния полностью определяется совокупностью термодинамических параметров. Она не зависит от характера процесса, в результате которого система пришла в рассматриваемое равновесное состояние. Иначе говоря, функция состояния не зависит от предыстории термодинамической системы.

Примерами функций состояния являются: энтропия, внутренняя энергия, энтальпия и др.

Теория показывает, что если некоторая бесконечно малая величина является полным дифференциалом, то соответствующая функция является функцией состояния.

Согласно первому началу термодинамики количество теплоты  $\delta Q$ , сообщенное термодинамической системе при переходе ее из одного состояния в другое, расходуется на изменение внутренней энергии  $dU$  системы и на совершение ею работы  $\delta A$  против внешних сил:

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (1).$$

Несмотря на то, что количество теплоты и совершенная работа являются составными частями изменения внутренней энергии, имеется принципиальное отличие  $dU$  от  $\delta Q$  и  $\delta A$ . Это отличие подчеркнуто разными обозначениями приращений ( $d$  и  $\delta$ ).

Внутренняя энергия является функцией состояния, поэтому ее изменение зависит только от начального и конечного состояний термодинамической системы.

Работа и количество теплоты зависят не только от этих состояний, но и от способа проведения процесса. Говорят, что количество теплоты и работа

являются функциями термодинамического процесса (а не функциями состояния).

В качестве примера термодинамической системы рассмотрим идеальный газ. Элементарная работа  $\delta A$  в этом случае определяется равенством

$$\delta A = p dV \quad (2),$$

где  $p$  - давление газа;

$dV$  - малое приращение объема газа.

Изменение внутренней энергии газа определяется согласно зависимости

$$dU = \nu C_V dT \quad (3),$$

где  $C_V$  - молярная теплоемкость газа при постоянном объеме;

$dT$  - изменение температуры газа. Подставив (2) и (3) в (1), получаем

$$\delta Q = \nu C_V dT + p dV \quad (4).$$

Запишем уравнение состояния идеального газа:

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

С учетом (5) равенство (4) принимает вид

$$\delta Q = \nu C_V dT + \frac{\nu RT}{V} dV \quad \text{или} \quad \frac{\delta Q}{T} = d[\nu C_V \ln T + \nu R \ln V] \quad (6).$$

Правая часть равенства (6) представляет собой полный дифференциал. Следовательно, левая часть  $\delta Q / T$  также является полным дифференциалом.

Функция состояния, дифференциалом которой является  $\delta Q / T$ , называется энтропией  $S$ :

$$dS = \frac{\delta Q}{T} \quad (7).$$

Теория показывает, что для энтропии имеет место равенство:

$$S = k \ln W \quad (8),$$

которое называется формулой Больцмана.

В равенстве:  $k$  - постоянная Больцмана,  $W$  - число микросостояний системы, реализующих данное макросостояние.

Это число также называют термодинамической вероятностью.

Таким образом, энтропия  $S$  определяется логарифмом числа микросостояний, посредством которых реализуется рассматриваемое макросостояние.

Отметим, что макросостоянием газа называют состояние, характеризующее его макроскопическими параметрами: давлением, температурой и объемом.

Состояние газа, характеризующееся координатами и скоростями всех его частиц, называется микроскопическим состоянием, или, просто, микросостоянием.

В стационарном макросостоянии газа его параметры  $p$ ,  $V$ ,  $T$  постоянны. Однако частицы газа в стационарном состоянии движутся и, следовательно, его микросостояния непрерывно изменяются. Следовательно, одному и тому же макросостоянию соответствует громадное множество микросостояний.

Иначе говоря, макросостояние осуществляется посредством громадного числа микросостояний.

Формула (8) позволяет дать энтропии очень наглядное толкование. Чем более упорядочена система, тем меньше число микросостояний, которыми осуществляется макросостояние, следовательно, тем меньше энтропия.

Чем больше число микросостояний, тем больше разупорядочена система. Поэтому можно сказать, что энтропия является мерой упорядоченности системы.

В равновесном состоянии энтропия достигает своего максимального значения, поскольку равновесие есть наиболее вероятное состояние и, следовательно, является макросостоянием, осуществляемым посредством максимального числа микросостояний.

Согласно одной из формулировок второго начала термодинамики система, представленная самой себе, изменяется в направлении равновесного состояния, т.е. энтропия должна возрасти в представленной самой себе системе. Рассмотрим свойства энтропии, которые следуют из ее определения (7).

1. Энтропия термодинамической системы равна сумме энтропии отдельных частей, составляющих эту систему.
2. В равновесных процессах без передачи тепла энтропия не меняется. Поэтому равновесный адиабатический процесс называют также изоэнтропийным.
3. При постоянном объеме энтропия является монотонно возрастающей функцией внутренней энергии.
4. Энтропия определяется только с точностью до произвольной постоянной.

В формуле (8) указанная постоянная без доказательства считалась равной нулю.

Отметим, что область применения формулы (8) не ограничена только идеальным газом, она справедлива для всех термодинамических систем.

Соотношение (7) справедливо только для обратимых процессов идеального газа. В случае необратимых процессов расчет приращения энтропии производится по другим соотношениям.

Напомним, что процесс плавления (кристаллизации) вещества является необратимым процессом (фазовым переходом I рода).

Фазовым переходом I рода называется процесс, при котором скачком изменяются плотность, внутренняя энергия, энтропия вещества.

При этом поглощается (при плавлении) или выделяется (при кристаллизации) энергия, называемая теплотой плавления (кристаллизации).

Вычисление приращения энтропии в необратимых процессах основывается на том, что энтропия является функцией состояния. Если система перешла из одного состояния в другое посредством необратимого процесса, то логично мысленно перевести систему из первого состояния во второе с помощью некоторого обратимого процесса и рассчитать полученное при этом приращение энтропии. Оно будет равно приращению энтропии при необратимом процессе.

### Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности:

тигельная печь, тигель с оловом, термопара, латунный сосуд с маслом, милливольтметр, секундомер, рис.1

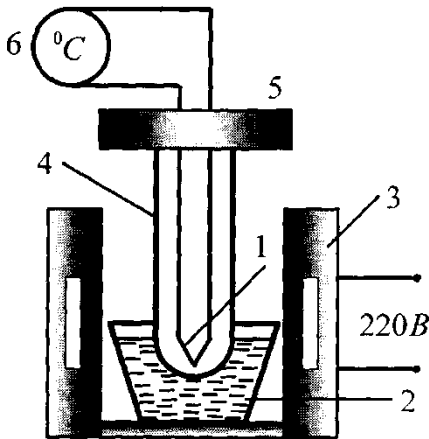


Рис.1

Спай термопары 1 погружают в тигель с оловом 2, который помещают в тигельную печь 3. Концы термопары находятся в стеклянной трубке 4, которая вставлена в держатель из текстолита 5. Термо-ЭДС, возникающая в цепи термопары, а, следовательно, температура, измеряется вольтметром 6. Изменение энтропии при переходе системы из состояния *a* в состояние *b* определяется из соотношения (7):

$$\Delta S = \int_a^b \frac{\delta Q}{T}$$

При нагревании и плавлении олова изменения энтропии определяется как сумма изменения энтропии при нагревании до температуры плавления и при плавлении олова:

$$\Delta S = \int_{T_k}^{T_{пл}} \frac{\delta Q}{T} + \int_0^{Q_1} \frac{\delta Q}{T} = \int_{T_k}^{T_{пл}} \frac{cm dT}{T} + \frac{Lm}{T_{пл}}, \quad \text{или} \quad \Delta S = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_k} + \frac{Lm}{T_{пл}} \quad (9),$$

где  $\delta Q_1$  и  $\delta Q_2$  - малые количества теплоты, полученные оловом при нагревании и при плавлении;  $T_k$  - комнатная температура;  
 $T_{пл}$  - температура плавления;  $L$ - удельная теплота плавления;  
 $c$ - удельная теплоемкость;  $m$ - масса олова.

### Проведение эксперимента

1. Измерить начальную температуру при помощи комнатного термометра.
2. Включить одновременно цепь печи и секундомер. Записать значения температуры через каждые 30 сек. Результаты измерений отмечать на графике в координатах температура-время. Измерения проводить до тех пор, пока температура не достигнет постоянной величины ( $T_{пл}$ ), а затем начнет увеличиваться.
3. Доведя температуру до 400-500°C, отключить цепь печи и продолжать измерять температуру, через каждые 30 секунд, при остывании до 200° С.

### Обработка результатов эксперимента

1. По графику температура-время определить температуру плавления олова.
2. Вычислить приращение энтропии при нагревании и плавлении олова по формуле (9). Масса олова задана, а удельную теплоту плавления и удельную теплоемкость олова найти в соответствующих таблицах.

### Контрольные вопросы

1. Что называется термодинамической системой?
2. Какие фундаментальные принципы лежат в основе термодинамики?
3. Как формулируется первое начало термодинамики и почему оно является фундаментальным?
4. Почему изменение внутренней энергии зависит только от начального и конечного состояний термодинамической системы?
5. Что называется энтропией? Перечислить основные свойства энтропии?
6. Записать и пояснить формулу Больцмана.
7. Записать и пояснить формулу, определяющую приращение энтропии.
8. Пояснить проведение эксперимента.
9. Пояснить полученный график зависимости температура-время.

В.В.Кодин, Н.М.Сидоркина

Методические указания для выполнения лабораторных работ по общей физике (Молекулярная физика и термодинамика)