

**Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Казанский государственный технологический университет»  
Нижекамский химико – технологический институт**

**Молекулярная физика и  
термодинамика.  
Элементы физической кинетики**

**Методические указания  
к лабораторным работам**

**Казань 2007**

Составители: доц. А. М. Абдуллин  
доц. В. В. Биктагиров  
ст. преп. М.Р. Шарипов

**Молекулярная физика и термодинамика. Элементы физической кинетики:** Метод. указания / Казан. гос. технол. ун-т: Сост.: А.М. Абдуллин, В.В. Биктагиров, М.Р. Шарипов. Казань, 2007. 28 с.

В данной работе приведены методические указания к лабораторным работам по молекулярной физике, термодинамике и физической кинетике.

Предназначены для студентов инженерно-технических специальностей.

Печатается по решению методической комиссии по циклу дисциплин общего математического и естественнонаучного профилей НХТИ.

Рецензенты: доц. Д. Н. Латыпов  
доц. А. А. Сагдеев

## Лабораторная работа № 1.3.1 Определение универсальной газовой постоянной методом откачки

Цель работы: экспериментальное определение универсальной газовой постоянной  $R$ .

### Краткая теория

Термодинамической системой называется совокупность тел (газы, жидкости и т.д.), способных обмениваться с внешней средой энергией и веществом. Состояние термодинамической системы характеризуют физическими величинами, называемыми термодинамическими параметрами. К ним относятся давление, температура, объем, плотность и т.д.

Давлением называется среднее значение силы, действующей по нормали на единицу площади поверхности со стороны молекул газа или жидкости:

$$P = \frac{F}{S}.$$

Размерность давления в Международной системе единиц измерения физических величин СИ:

$$[P] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па} \text{ (паскаль)}.$$

Как правило, на практике применяются внесистемные единицы измерения давления:

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт.ст.} = 101325 \text{ Па} \approx 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па};$$

$$1 \text{ ат (техн. атмосфера)} = 1 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2} = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт.ст.} = 133,4 \text{ Па}.$$

В рамках молекулярно-кинетической теории температура характеризует интенсивность теплового движения молекул

вещества. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы газа пропорциональна температуре:

$$W_K = \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2}kT,$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана. Определенная таким образом температура  $T$  называется абсолютной и измеряется по шкале Кельвина. Размерность:  $[T] = K$  (градус Кельвина). Между абсолютной и температурой по шкале Цельсия существует линейная связь:

$$T = t \text{ }^\circ\text{C} + 273,16.$$

Плотностью вещества называется физическая величина, равная массе вещества, содержащегося в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}, \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right].$$

Плотность вещества обратно пропорциональна удельному объему:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}.$$

Параметры состояния – величины, зависящие друг от друга. Уравнение вида:

$$F(P, V, T) = 0,$$

связывающее функциональной зависимостью параметры состояния, называется термическим уравнением состояния системы. Теоретически уравнение состояния определяется только для идеального газа. Газ называется идеальным, если выполнены три условия:

- 1) молекулы имеют пренебрежительно малые размеры;
- 2) молекулы не взаимодействуют друг с другом;
- 3) соударения молекул абсолютно упругие.

Состояние идеального газа определяется уравнением Менделеева – Клапейрона:

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

Здесь  $m$  – масса газа,  $\mu$  – молярная масса,  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – универсальная газовая постоянная. Величина:

$$v = \frac{m}{\mu}.$$

называется количеством вещества и измеряется в молях. 1 моль – такое количество вещества, в котором содержится столько молекул, сколько имеется атомов в 12 г изотопа углерода  $\text{C}^{12}$ . Число молекул в 1 моле вещества называется числом Авагадро:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}.$$

### Описание методики измерения

Универсальную газовую постоянную можно определить из уравнения Менделеева-Клапейрона. Все величины, входящие в это уравнение, можно определить непосредственно, за исключением массы газа, т.к. ее можно измерить только вместе с массой сосуда  $m_0$ . Массу сосуда можно исключить, используя уравнение Менделеева-Клапейрона для двух разных давлений  $P_1$  и  $P_2$  при неизменных объеме и температуре:

$$P_1 V = \frac{m_1}{\mu} RT; \quad P_2 V = \frac{m_2}{\mu} RT.$$

Решив эти уравнения относительно  $R$ , находим:

$$R = \frac{\mu(P_1 - P_2)V}{(m_1 - m_2)T}.$$

## Описание установки

Приборы и принадлежности: стеклянная колба, насос Ковского, манометр, весы с разновесами.

Общий вид установки представлен на рис. 1.

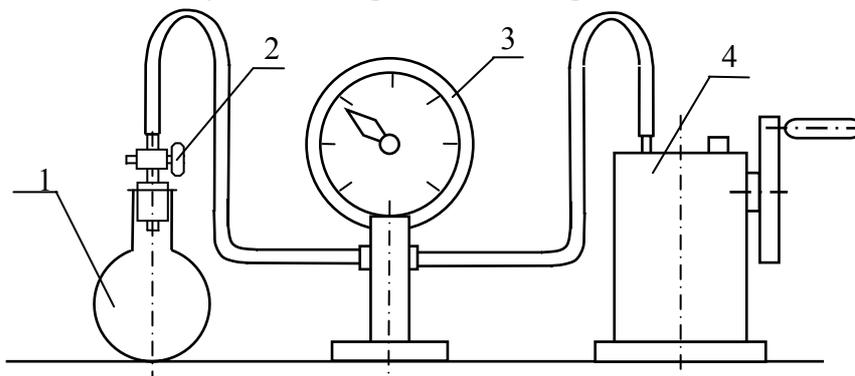


Рис.1

Установка состоит из стеклянной колбы 1 с краном 2, ручного насоса 4. Давление газа после откачки измеряется манометром 3. Манометр измеряет избыточное давление

$$P_u = P_2 - P_1$$

Поэтому расчетная формула имеет вид:

$$R = \frac{\mu |P_u| V}{(m_1 - m_2) g} \quad (1)$$

## Измерения и обработка результатов измерений

1. Снять резиновую трубку с колбы, открыть кран и определить суммарную массу колбы и содержащегося в ней воздуха ( $m_0 + m_1$ ).

2. Колбу соединить с насосом и откачать воздух примерно до значения  $P_u = -0,8 \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$ . Измерить  $P_u$  и закрыть кран.

3. Определить массу колбы с оставшимся воздухом ( $m_0 + m_2$ ). Трубку предварительно отсоединить.
4. Определить массу откаченного воздуха как разность  

$$(m_0 + m_1) - (m_0 + m_2) = m_1 - m_2$$
5. Измерить температуру  $T$  воздуха в лаборатории.
6. По формуле (1) вычислить  $R$ . Значение молярной массы можно взять для азота.
7. Измерения выполнить три раза. Результаты измерений занести в табл. 1.

Таблица 1

№	$m_0 + m_1$ , кг	$P_u$ , Па	$m_0 + m_2$ , кг	$R$ , $\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	$\Delta R$	$S_{\Delta R}$	$\Delta \bar{R}$
1							
2							
3							

8. Вычислить доверительный интервал  $\Delta \bar{R}$  :

$$\Delta R = t(\alpha, n) S_{\Delta \bar{R}} = t(\alpha, n) \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta R_i)^2}{n(n-1)}},$$

где  $t(\alpha, n)$  – коэффициент Стьюдента,  $n$  – количество независимых опытов.

9. Среднее значение  $\bar{R}$ , вычисленное по результатам опытов, сравнить с теоретическим значением. Определить основные источники погрешностей.

### Контрольные вопросы

1. Какие величины называются параметрами состояния? Дайте их определение.
2. Какой газ называется идеальным?
3. Как записывается уравнение состояния идеального газа?
4. Что называется одним молем вещества?

## Лабораторная работа № 1.3.2

### Определение отношения теплоемкостей газа $\frac{C_p}{C_v}$

Цель работы: определение  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  методом Клемана – Дезорма.

#### Краткая теория

Одним из важнейших теплофизических свойств вещества является его теплоемкость. Удельной теплоемкостью называется физическая величина  $C_m$ , численно равная количеству теплоты, которую надо сообщить единице массы вещества для повышения его температуры на 1 К:

$$C_m = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}, \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right].$$

Молярной называется теплоемкость 1 моля вещества:

$$C_\mu = \frac{Q}{\nu \cdot \Delta T}, \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right].$$

Они связаны соотношением:  $C_\mu = \mu C_m$ .

Теплоемкость в общем случае зависит от рода вещества, параметров состояния ( $T$ ,  $P$ ) и вида термодинамического процесса.

1 закон термодинамики. Теплота  $Q$ , сообщенная системе в некотором термодинамическом процессе, расходуется на изменение ее внутренней энергии  $\Delta U$  и на совершение внешней работы  $A$ :

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

В изобарном процессе работа  $A = P \cdot \Delta V = P(V_2 - V_1)$ , где  $\Delta V$  – изменение объема системы. Если процесс протекает при постоянном объеме ( $V = \text{const}$ ), то  $A = P \cdot \Delta V = 0$ , т.е. система

внешнюю работу не совершает. Теплоемкость системы в этом случае называется изохорной и обозначается  $C_V$ :

$$C_V = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U + A}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T} . \quad (2)$$

Изобарная теплоемкость системы (при  $P = \text{const}$ ):

$$C_P = \frac{Q}{\Delta T} = \frac{\Delta U + A}{\Delta T} = \frac{C_V \cdot \Delta T + P \cdot \Delta V}{\Delta T} = C_V + \frac{P \cdot \Delta V}{\Delta T} ,$$

с учетом формулы (2).

Таким образом, изобарная теплоемкость  $C_P$  больше изохорной  $C_V$  на величину работы, совершаемой системой вследствие изобарного расширения при ее нагревании на 1 К. Для идеального газа можно доказать уравнение Майера:

$$C_P = C_V + \nu \cdot R ,$$

где  $\nu$  - количество вещества.

Адиабатическим называется термодинамический процесс, протекающий без теплообмена с внешней средой. Как правило, адиабатическим считается «быстрый» процесс, т.к. теплообменом за короткое время процесса можно пренебречь.

I закон термодинамики для адиабатического процесса имеет вид:

$$0 = \Delta U + A$$

или

$$C_V \cdot \Delta T = -P\Delta V . \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что если система адиабатически расширяется ( $\Delta V > 0$ ), то  $\Delta T < 0$ , т.е. температура понижается. Верно и обратное: при адиабатическом сжатии ( $\Delta V < 0$ ) температура повышается ( $\Delta T > 0$ ).

В адиабатическом процессе изменяются все параметры состояния:  $P$ ,  $V$ ,  $T$ . Можно доказать, что начальное и конечное параметры состояния идеального газа в адиабатическом процессе связаны уравнением:

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma . \quad (4)$$

где  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  - показатель адиабаты. Уравнение (4) называется уравнением Пуассона.

### Описание методики измерения

Пусть в закрытом, стеклянном баллоне 2 (рис. 3) находится исследуемый газ при комнатной температуре  $T_0$  и давлении  $P_1$  выше атмосферного на  $h_1$ :

$$P_1 = P_0 + h_1.$$

Рассмотрим изменение состояния газа графически (рис. 2).

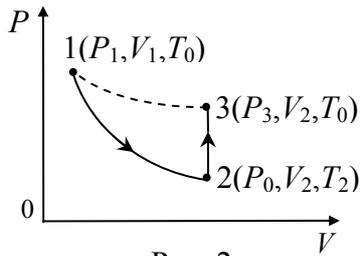


Рис. 2

Откроем на короткое время кран К, чтобы давление в баллоне сравнялось с атмосферным (процесс 1-2), после чего кран опять закроем. Процесс 1-2 приближенно можно рассматривать как адиабатический, поэтому по уравнению Пуассона:

$$P_1 \cdot V_1^\gamma = P_0 \cdot V_2^\gamma, \quad (5)$$

где  $V_1, V_2$  – удельные объемы газа.

Вследствие адиабатического расширения газа температура его понизится, а затем, в результате теплообмена, через небольшой промежуток времени сравняется с комнатной (процесс 2-3). При этом давление газа поднимется до величины  $P_3 = P_0 + h_2$ . Процесс 1-3 – изотермический, т.к. начальная и конечная температура газа в этом процессе одинакова. Поэтому по закону Бойля-Мариотта:

$$P_1 V_1 = P_3 V_2. \quad (6)$$

Разрешив уравнения (5), (6) относительно  $\gamma$ , найдем:

$$\gamma = \frac{\ln P_1 - \ln P_0}{\ln P_1 - \ln P_3} = \frac{\ln(P_0 + h_1) - \ln P_0}{\ln(P_0 + h_1) - \ln(P_0 + h_2)}.$$

Пользуясь приближенной формулой  $\ln(1+x) = x$  при  $x \ll 1$ , найдем окончательно:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (7)$$

### Описание установки

Приборы и принадлежности: стеклянный баллон, U-образный манометр, насос.

Установка Клемана-Дезорма, схема которой приводится на рис. 3, состоит из толстостенного стеклянного баллона 2, снабженного краном К. Баллон с помощью трубок присоединяется к насосу 3 и U-образному манометру 1, служащему для измерения избыточного по сравнению с атмосферным давлением воздуха в баллоне. Так как в формулу (7) входит отношение давлений, непосредственно можно использовать разность высот жидкости в коленях манометра.

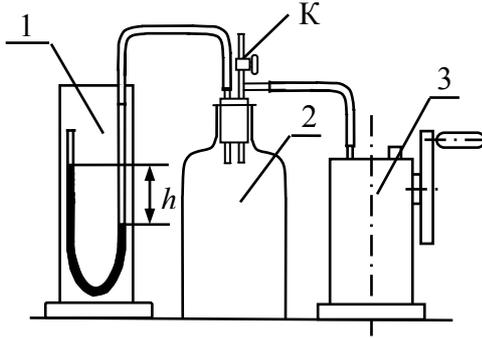


Рис.3

### Измерения и обработка результатов измерений

1. С помощью насоса накачать в баллон немного воздуха. При этом воздух, сжимаемый под поршнем насоса, нагревается. Необходимо выждать 2-3 мин, пока благодаря теплообмену температура в баллоне не станет равной комнатной. После этого измерить избыточное давление воздуха  $h_1$ .

2. Открыть кран К и в тот момент, когда уровни жидкости в обоих коленах манометра сравниваются, быстро закрыть. Выждав 2-3 мин, пока газ, охлажденный при адиабатическом расширении, нагреется до комнатной температуры, измерить избыточное давление  $h_2$ .

3. По формуле (7) вычислить значение  $\gamma$ .

4. Действия по п.1-3 повторить не менее трех раз. Учитывая независимость отдельных опытов, по формулам для прямых измерений вычислить доверительный интервал для  $\gamma$ . Результаты оформить в виде табл. 2.

Таблица 2

№ опыта	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$\gamma$	$\Delta\gamma$	$\bar{S}_{\Delta\gamma}$	$\overline{\Delta\gamma}$
1						
2						
3						

### Контрольные вопросы

1. Что называется удельной и молярной теплоемкостью, как они взаимосвязаны?
2. Почему  $C_p$  больше  $C_v$ ? Доказать уравнение Майера.
3. Какой процесс называется адиабатическим?
4. Какие газовые процессы совершаются во время выполнения различных этапов данной работы?

### Лабораторная работа № 1.3.3 Определение средней длины свободного пробега и эффективного диаметра молекулы воздуха

Цель работы: вычисление длины свободного пробега и эффективного диаметра молекулы воздуха по коэффициенту внутреннего трения.

#### Краткая теория

Молекулы в газах находятся в состоянии непрерывного беспорядочного движения, называемого тепловым. Отличительной чертой теплового движения молекул вещества является его случайный характер, т.е. за время между двумя последовательными соударениями молекулы проходят разные расстояния. Среднее расстояние  $\bar{\lambda}$ , которое молекула проходит между двумя последовательными соударениями, называется средней длиной свободного пробега, а соответствующий промежуток времени  $\tau$  - временем свободного пробега. Среднее расстояние  $d$ , на которое сближаются центры двух молекул при соударении, называется эффективным диаметром молекулы. В кинетической теории газов доказывается формула:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot n}, \quad (8)$$

где  $n$  – число молекул в единице объема.

В жидкостях, как и в газах, в случае нарушения пространственной однородности таких физических величин, как плотность, температура и скорость упорядоченного движения молекулы, возникают явления переноса – диффузия, теплопроводность и вязкость (внутреннее трение).

Явление вязкости обусловлено возникновением сил трения между слоями жидкости (или газа), перемещающихся параллельно друг к другу с различными по величине скоростями. Со стороны слоя А, движущегося быстрее (рис. 4), на медленный

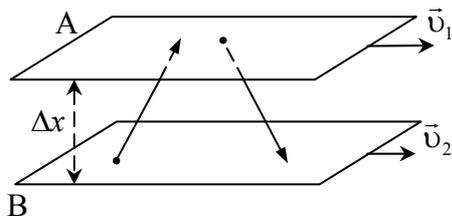


Рис. 4

слоем В действует ускоряющая сила. Медленный слой В тормозит более быстро движущиеся слои. Силы внутреннего трения, которые при этом возникают, направлены по касательной к поверхности соприкосновения слоев.

Благодаря тепловому движению, молекулы переходят из слоя В, движущегося со скоростью  $\vec{v}_2$ , в слой А, движущийся со скоростью  $\vec{v}_1$ . При этом молекулы из слоя В переносят в слой А импульс  $m\vec{v}_2$  своего упорядоченного движения. Такие молекулы при соударениях с молекулами слоя А замедляют их движение. И наоборот, быстрые молекулы, переходящие из слоя А в слой В, ускоряют движение молекул в слое В. Между слоями возникает сила внутреннего трения. Величина силы внутреннего трения подчиняется закону Ньютона:

$$F = -\eta \frac{\Delta v}{\Delta x} \cdot S, \quad (9)$$

где  $\Delta v = (v_2 - v_1)$  - изменение скорости,  $S$  - площадь соприкосновения слоев.

Коэффициент пропорциональности  $\eta$  называется коэффициентом динамической вязкости.

Величина  $\frac{\Delta v}{\Delta x}$  в формуле (9) называется градиентом скорости. Градиент скорости - это величина изменения скорости, приходящаяся на единицу длины в направлении, перпендикулярном к вектору скорости.

Единица измерения коэффициента динамической вязкости в системе СИ:

$$[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}.$$

Из формулы (9) вытекает физический смысл коэффициента динамической вязкости: он численно равен силе внутреннего трения, действующей на единицу площади слоя при градиенте скорости, равной единице.

Коэффициент вязкости зависит от природы вещества и особенно сильно от температуры. Так, вязкость касторового масла уменьшается в 4 раза при повышении температуры от 18 °С до 40 °С.

### Описание методики измерения

При небольших скоростях течение газа в трубках является ламинарным. Ламинарным называется струйное течение жидкости или газа без образования завихрений. В ламинарном режиме

профиль скорости течения подчиняется квадратичному закону (рис. 5):

$$v = v_0 \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (10)$$

где  $v_0$  – максимальная скорость на середине трубки,  $R$  – радиус трубки.

Вычислим объем газа, прошедшего через трубку за время  $t$ :

$$V = t \cdot \int_0^R v \cdot dS,$$

где  $dS$  – площадь элементарного кольца радиусом  $r$  и шириной  $dr$ , вырезанного в поперечном сечении трубки:

$$dS = 2\pi r \cdot dr.$$

Тогда

$$V = t \int_0^R v_0 \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \cdot 2\pi r \cdot dr = \frac{\pi t v_0 R^2}{2}.$$

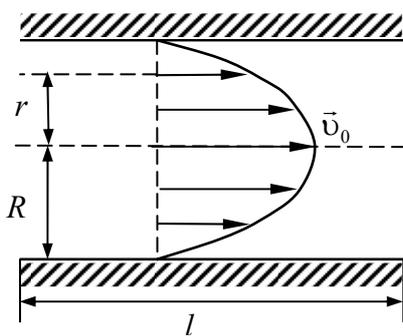


Рис. 5

Отсюда скорость

$$v_0 = \frac{2V}{\pi t R^2}. \quad (11)$$

Если на концах трубки поддерживается разность давления  $\Delta p$ , то на газ действует сила:

$$F = \Delta p \cdot \pi R^2, \quad (12)$$

где  $\pi R^2$  - площадь поперечного сечения трубки. Эта сила в режиме установившегося течения уравнивается силой внутреннего трения газа о внутреннюю поверхность трубки:

$$F = -\eta \left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=R} \cdot S_{\text{внутр.}} = 4\pi l \cdot v_0 \cdot \eta. \quad (13)$$

с учетом формулы (10) и  $S_{\text{внутр.}} = 2\pi R \cdot l$  - площадь внутренней поверхности трубки. Из формул (12) и (13) с учетом формулы (11) находим:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \cdot \Delta p \cdot t}{8V \cdot l}. \quad (14)$$

Формула (14) называется формулой Пуазейля.

Коэффициент динамической вязкости газов можно определить по формуле:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \cdot \bar{\lambda} \cdot \bar{v}. \quad (15)$$

Из формул (14) и (15) находим длину свободного пробега молекул газа:

$$\bar{\lambda} = \frac{3\pi R^4 \cdot \Delta p \cdot t}{8V \cdot l \cdot \rho \cdot \bar{v}}. \quad (16)$$

Плотность газа можно выразить из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu P}{RT}. \quad (17)$$

Средняя скорость молекул газа пропорциональна температуре:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}. \quad (18)$$

Из формулы (8) находим эффективный диаметр молекулы газа:

$$d = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2\pi\lambda} \cdot n}}, \quad (19)$$

где концентрация молекул

$$n = n_0 \cdot \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T} \quad (20)$$

где  $n_0 = 2,687 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$  – число Лошмидта (число молекул в единице объема газа при нормальных условиях:  $T_0 = 273 \text{ К}$ ,  $P_0 = 1 \text{ атм} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ).

### Описание установки

Приборы и принадлежности: цилиндрический сосуд с капилляром, стеклянный стаканчик, секундомер, весы с разновесами.

Установка состоит из стеклянного сосуда 2 (рис. 6), имеющего внизу кран 1, а сверху закрытого пробкой, через которую пропущена капиллярная трубка 4.

Разность давления между концами капиллярной трубки 4 образуется за счет столба воды, которой заполняется сосуд 2 примерно на  $\frac{3}{4}$ . Если открыть кран, вода выливается из сосуда отдельными каплями, а над поверхностью воды создается давление ниже атмосферного, в то время как верхний конец капилляра находится под атмосферным давлением. Разность давлений на концах капилляра:

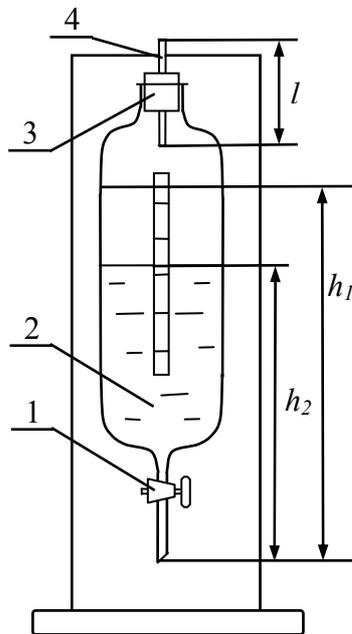


Рис.6

$$\Delta P = \rho_e \cdot g \cdot h$$

где  $\rho_e$  - плотность воды,  
 $h$  - высота столба жидкости,  
 $g$  - ускорение свободного падения.

Под действием этой разности давлений происходит протекание воздуха через капилляр.

### Измерения и обработка результатов измерений

1. Взвесить стаканчик.
2. Открыть кран 1 и, дождавшись, когда вода начнет вытекать из сосуда каплями, подставить предварительно взвешенный стаканчик, включив одновременно секундомер. В это же время измерить по шкале высоту начального уровня воды  $h_1$ .
3. Когда в стаканчике будет приблизительно  $50 \text{ см}^3$  воды, перекрыть кран и остановить секундомер. Измерить новый уровень воды  $h_2$ . Записать время истечения жидкости.
4. Взвесить стаканчик с водой и по массе вытекшей воды определить ее объем, который будет равен объему воздуха, вошедшего в сосуд через капилляр.

5. Разность давлений на концах капилляра рассчитать по формуле:

$$\Delta P = \rho_g \cdot g(h_1 + h_2) / 2.$$

6. Температуру измерить комнатным термометром, а атмосферное давление определить по барометру. Значения радиуса и длины капилляра задаются преподавателем.

7. По формулам (16), (17), (18) вычислить длину свободного пробега молекулы, а по формуле (19) вычислить эффективный диаметр молекулы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называется длиной свободного пробега и эффективным диаметром молекул? Объяснить явление вязкости.
2. Какая связь между средней длиной пробега молекул и вязкостью газа?
3. Объяснить методику измерений.

## **Лабораторная работа № 1.3.4**

### **Определение коэффициента динамической вязкости жидкости методом Стокса**

Цель работы: освоить способ измерения вязкости методом падающего шарика и вычислить коэффициент внутреннего трения маловязкой жидкости.

Перед выполнением работы изучить **краткую теорию лабораторной работы 1.3.3.**

## Описание методики измерения

Если металлический шарик свободно падает в жидкости, то на него действуют три силы: сила тяжести  $P$ , выталкивающая сила  $Q$  и сила вязкого сопротивления  $F$ :

$$P = m_{ш} g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ш} g ,$$

$$Q = m_{ж} g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{ж} g ,$$

$$F = 6\pi\eta v r .$$

где  $m_{ш}$  и  $m_{ж}$  – массы шарика и жидкости,  $\rho_{ш}$  и  $\rho_{ж}$  - их плотности,  $r$  – радиус шарика,  $v$  - скорость падения шарика,  $g$  - ускорение свободного падения,  $\eta$  - коэффициент динамической вязкости.

С возрастанием скорости падения шарика сила вязкого сопротивления  $F$  увеличивается. Силы, действующие на шарик, уравниваются, и, как следует из первого закона Ньютона, движение шарика становится равномерным, т.е.

$$F = P - Q .$$

Подставив в это уравнение формулы для  $F$ ,  $P$ ,  $Q$ , получим

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

откуда после некоторых преобразований

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{g r^2}{v} (\rho_{ш} - \rho_{ж}) . \quad (21)$$

## Описание установки

Приборы и принадлежности: вискозиметр, микрометр, весы, секундомер.

Вискозиметр представляет собой стеклянный цилиндрический сосуд, наполненный исследуемой жидкостью. Он может

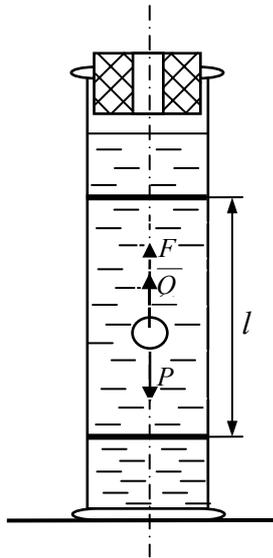


Рис.7

помещаться во второй сосуд, заполненный водой и выполняющий роль термостата (рис. 7). Температура воды измеряется термометром. Термостат находится на платформе. Вискозиметр снабжен приспособлением для извлечения со дна сосуда шариков. На вискозиметр надеваются два резиновых кольца на расстоянии  $l$  друг от друга. На этом участке шарик падает равномерно, скорость его определяется соотношением  $v = \frac{l}{\tau}$ , где  $\tau$  - время падения шарика между кольцами (рисками).

Подставляя это соотношение в уравнение (21), получим:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2 \tau}{l} \cdot (\rho_{ш} - \rho_{ж}). \quad (22)$$

Это уравнение справедливо лишь в случае падения шарика в безграничной среде. С учетом влияния боковых стенок вискозиметра расчетная формула примет вид:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{g \cdot r^2 \cdot \tau}{l} \cdot \frac{(\rho_{ш} - \rho_{ж})}{\left(1 + \frac{2,4r}{R}\right)}, \quad (23)$$

где  $R$  – внутренний радиус вискозиметра.

### Измерения и обработка результатов измерений

1. По отвесу с помощью регулировочных винтов на ножках платформы установить вискозиметр по вертикали.
2. Измерить расстояние между кольцами.
3. На аналитических весах определить массы трех шариков, измерить диаметры шариков и определить их плотность.
4. Измерить время падения шариков между кольцами (рисками). Результаты измерений оформить в виде табл. 3.

Таблица 3

№ шарика	$l$ , см	$m$ , г	$d$ , мм	$t$ , с	$\rho_{ш}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\eta$ , Па·с	$\Delta\eta_i$ , Па·с	$\Delta\bar{\eta}$ , Па·с
1								
2								
3								

5. Рассчитать коэффициент динамической вязкости. Плотность жидкости определить по справочнику для данной температуры.

6. Вычислить доверительный интервал для  $\eta$ . Определение производится с помощью косвенных измерений. Однако из-за использования шариков разных диаметров все три опыта будут независимыми. Поэтому определить  $\Delta\bar{\eta}$  можно по формулам для прямых измерений.

### Контрольные вопросы

1. Явление вязкости.
2. Физический смысл коэффициента динамической вязкости.
3. Какие силы действуют на шарик, свободно падающий в жидкости?
4. Почему движение шарика в жидкости становится равномерным?

## Лабораторная работа № 1.3.5

### Определение изменения энтропии при нагревании и плавлении олова

Цель работы: построение диаграммы плавления и кристаллизации олова, определение изменения энтропии олова.

#### Краткая теория

Первый закон термодинамики не определяет направление термодинамических процессов. На этот вопрос отвечает второй закон термодинамики.

Вычислим для идеального газа величину:

$$\begin{aligned}\frac{\delta Q}{T} &= \frac{dU + PdV}{T} = \frac{C_V dT + \nu \cdot RT \frac{dV}{V}}{T} = \\ &= C_V \frac{dT}{T} + \nu R \frac{dV}{V} = d(C_V \ln T + \nu R \ln V).\end{aligned}\tag{24}$$

где, согласно I закону термодинамики, теплота  $\delta Q$ , сообщенная системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии  $dU$  и совершение работы  $\delta A = P \cdot dV$ . Как следует из формулы (24), величина  $\frac{\delta Q}{T}$  является полным дифференциалом некоторой величины  $S = C_V \ln T + \nu R \ln V$ .

Тогда

$$\frac{\delta Q}{T} = dS.\tag{25}$$

Введенная таким образом величина  $S$  называется энтропией термодинамической системы. Энтропия является термодинамическим параметром состояния. Единица измерения в системе СИ:

$$[S] = \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

$$\text{Из формулы (25) следует: } \Delta S = S_2 - S_1 = \frac{\Delta Q}{T}.$$

Таким образом, изменение энтропии в любом обратимом процессе, переводящем систему из состояния 1 в состояние 2, равно отношению теплоты процесса к его температуре.

Обратимым называется термодинамический процесс, при проведении которого в обратном направлении система проходит через те же промежуточные состояния, что и в прямом направлении, а во внешней среде не остаются никаких изменений. Обратимым, например, является процесс бесконечно медленного расширения или сжатия газа.

В адиабатическом процессе теплообмен между системой и внешней средой отсутствует, т.е.

$$\delta Q = TdS = 0.$$

Отсюда  $dS = 0$  и  $S = \text{const}$ . В обратимом адиабатическом процессе энтропия не изменяется, т.е. он является изоэнтропийным процессом.

В курсе термодинамики доказывается, что энтропия изолированной системы не убывает при любых происходящих в ней процессах:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq 0. \quad (26)$$

В этом заключается II закон термодинамики. В обратимых процессах энтропия не изменяется, а в необратимых - увеличивается. Изолированной называется термодинамическая система, не способная обмениваться энергией и веществом с внешней средой.

## Описание методики измерения

Плавление олова относится к фазовым переходам первого рода, т.е. фазовым превращениям, сопровождающиеся поглощением теплоты и изменением удельного объема (плотности).

В данной работе изменение энтропии олова определяется как сумма изменений энтропии при нагревании олова от начальной температуры  $T_0$  до температуры плавления  $T_{пл}$  и при плавлении олова:

$$\Delta S = \frac{Q}{T_{пл}} + \int_{T_0}^{T_{пл}} \frac{\delta Q}{T} = \frac{m\lambda}{T_{пл}} + \int_{T_0}^{T_{пл}} \frac{m \cdot c \cdot dT}{T},$$

где  $\lambda$  - удельная теплота плавления,  $c$  - удельная теплоемкость олова. После интегрирования находим изменение удельной энтропии (энтропии единицы массы олова):

$$\Delta S_m = \frac{\Delta S}{m} = \frac{\lambda}{T_{пл}} + c \cdot \ln \frac{T_{пл}}{T_0}. \quad (27)$$

## Описание установки

Приборы и принадлежности: тигель с оловом, электроннагреватель, милливольтметр, секундомер, термопара.

Принципиальная схема установки показана на рис.8.

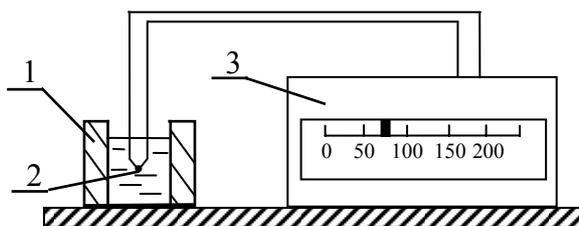


Рис.8

Температура олова измеряется с помощью термопары. Один спай термопары 2 погружен в тигель с оловом 1, обогреваемый электроннагревателем. Два конца термопары подключены к вольтметру 3, шкала которого проградуирована в градусах Цельсия.

### Измерения и обработка результатов измерений

1. Измерить температуру в лаборатории  $T_0$ .
2. Одновременно включить установку и секундомер, через каждую минуту измерять температуру олова. Результаты измерений записать в табл. 4.

Таблица 4

НАГРЕВАНИЕ							
$t$ , мин	0	1	2	3	4	5	....
$T$ , К							

ОХЛАЖДЕНИЕ							
$T$ , К							

Измерения проводить до тех пор, пока олово не расплавится, и продолжать далее 4-5 минут.

3. Выключить электронагреватель и провести аналогичные измерения температуры олова при его охлаждении примерно до  $50\text{ }^\circ\text{C}$ .

4. Построить диаграммы плавления и кристаллизации олова, т.е. графики  $T(t)$ . Определить температуру плавления олова  $T_{пл}$ .

5. По формуле (27) вычислить изменение удельной энтропии олова. Для олова:

$$c = 230 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}, \quad \lambda = 5,86 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

### Контрольные вопросы

1. Что называется энтропией?
2. II закон термодинамики.
3. Объяснить методику измерений. Почему при плавлении и кристаллизации олова его температура не меняется?

### Библиографический список

1. *Трофимова Т.И.* Курс физики: Учеб.пособие для вузов. – 4-е изд., испр. – М.: Высш.школа, 1997. – 542 с.
2. *Майсова Н.Н.* Практикум по курсу общей физики: М.: Высш.школа, 1970.- 448 с.

