



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
УПРАВЛЕНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ОБУЧЕНИЯ И ПОВЫШЕНИЯ  
КВАЛИФИКАЦИИ

Кафедра «Физика»

**Лабораторные работы**  
**М20, М21, М22, М27**  
«Молекулярная физика. Термодинамика»  
по дисциплине

**«Физика»**

Авторы

Благин А. В., Гордеева А. Б.,  
Жданова Т. П., Илясов В. В.,  
Кудря А. П., Лещева О. А.,  
Лемешко Г. Ф., Литвищенко В. Л.,  
Пруцакова Н. В., Холодова О. М.

Ростов-на-Дону, 2018

## Аннотация

Лабораторный практикум одержит краткое описание рабочих установок и методики определения исследуемых величин по разделам «Молекулярная физика» и «Термодинамика».

Предназначен для студентов дневной и заочной форм обучения всех специальностей, изучающих физику (раздел «Молекулярная физика и термодинамика»).

## Авторы

д.ф.-м.н., профессор Благин А.В.,  
к.ф.-м.н., доцент Гордеева А.Б.,  
к.ф.-м.н., доцент Жданова Т.П.,  
д.ф.-м.н., профессор Илясов В.В.,  
ст. преподаватель Кудря А.П.,  
доцент Лещева О.А.,  
к.ф.-м.н., профессор Лемешко Г.Ф.,  
к.ф.-м.н., доцент Литвищенко В.Л.,  
к.ф.-м.н., доцент Пруцакова Н.В.,  
доцент Холодова О.М.



## Оглавление

<b>ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ .....</b>	<b>4</b>
Молекулярно-кинетическая теория.....	4
Термодинамика .....	5
<b>Лабораторная работа М20 .....</b>	<b>9</b>
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА, СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ И ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА.....	9
<b>Лабораторная работа М21 .....</b>	<b>15</b>
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА.....	15
<b>Лабораторная работа М22 .....</b>	<b>20</b>
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПУАССОНА МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА .....	20
<b>Лабораторная работа М27 .....</b>	<b>25</b>
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ.....	25
<b>Список литературы .....</b>	<b>29</b>

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Молекулярно-кинетическая теория

**Идеальный газ** – воображаемый газ, в котором размеры молекул пренебрежимо малы (материальные точки), между молекулами отсутствует взаимодействие, столкновения между собой и со стенками – упругие.

*Основное уравнение молекулярно-кинетической теории:*

$$P = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{кв} \rangle^2 = \frac{2}{3} n \langle E_k \rangle = \frac{1}{3} \rho \langle v_{кв} \rangle^2 = nkT,$$

где  $P$  – давление газа;  $n = N/V$  – концентрация молекул;  $m_0$  – масса одной молекулы;  $\langle v_{кв} \rangle$  – средняя квадратичная скорость одной молекулы;  $\rho = nm_0 = m/V$  – плотность газа;  $T$  – абсолютная температура,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана.

#### Средняя кинетическая энергия поступательного движения одной молекулы:

$$\langle E_k \rangle = \frac{m_0 \langle v_{кв} \rangle^2}{2} = \frac{3}{2} kT.$$

**Изопроцессы** (газовые законы) – для  $m = const$  :

1)  $T - const$  – изотермический:  $P_1 V_1 = P_2 V_2$  ;

2)  $P - const$  – изобарный:  $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$  ;

3)  $V - const$  – изохорный:  $\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$  .

**Уравнение Клапейрона – Менделеева:**

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

где  $V$  – объём газа;  $m$  – масса газа;  $M$  – молярная масса;  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) – универсальная газовая постоянная.

**Количество вещества:**

## Физика

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

где  $N$  – общее число молекул,  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – постоянная Авогадро, т.е. число атомов или молекул, содержащиеся в одном моле вещества.

**Скорости молекул:**

– Средняя арифметическая скорость

$$\langle v \rangle = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_N}{N} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8PV}{\pi m}}.$$

– Средняя квадратичная скорость

$$\langle v_{\text{кв.}} \rangle = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3PV}{m}}.$$

Наиболее вероятной называется скорость, которой обладает

большинство молекул:  $v_g = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2PV}{m}}.$

## Термодинамика

**Первое начало термодинамики:**  $\delta Q = dU + \delta A,$

где  $\delta Q$  – бесконечно малое количество теплоты, сообщённое системе;

$dU = \frac{i}{2} R \cdot dT$  – бесконечно малое изменение внутренней энергии системы, где  $i$  – **число степеней свободы** – количество независимых координат, с помощью которых можно определить положение системы в пространстве,  $\delta A = P \cdot dV$  – элементарная работа, совершённая системой

против внешних сил ( $dU$  – полный дифференциал,  $\delta Q$  и  $\delta A$  таковыми не являются).

**Применение первого начала термодинамики для изопроцессов:**

1)  $T - const - dU = 0 \Rightarrow \delta Q = \delta A;$

2)  $V - const - \delta A = 0 \Rightarrow \delta Q = dU;$

3)  $P - const - \delta Q = dU + \delta A;$

## Физика

4)  $\delta Q = 0$  – адиабатический процесс, т.е. происходящий без теплообмена с внешней средой, следовательно  $dU = -\delta A$ .

**Молярная теплоемкость** газа определяется количеством теплоты, которое необходимо сообщить 1 молю газа для нагревания его на 1 К:

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT} + \frac{\delta A}{\nu dT}.$$

**Молярные теплоёмкости** для одного моля газа при постоянном объёме ( $C_V$ ) и постоянном давлении ( $C_P$ ):

$$C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R, \quad C_P = \frac{dU}{dT} + \frac{\delta A}{dT} = \frac{i+2}{2} R,$$

где  $i$  – число степеней свободы,  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  – универсальная газовая постоянная.

**Уравнение Майера:**  $C_P = C_V + R$ .

**Удельная теплоемкость** газа определяется количеством теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг газа для нагревания его на 1 К:

$$c = \frac{\delta Q}{m \cdot dT}.$$

**Связь** между удельной ( $c$ ) и молярной ( $C$ ) теплоёмкостями:

$$c = C / M,$$

где  $M$  – молярная масса.

**Уравнение Пуассона** для адиабатного процесса:

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

где  $\gamma$  – постоянная адиабаты;  $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}$  ( $i$  – число степеней свободы).

### Явления переноса

**Явления переноса** – особые необратимые процессы, возникающие в термодинамически неравновесных процессах, в результате которых происходит пространственный перенос энергии (теплопроводность), массы (диффузия), импульса (внутреннее трение).

## Внутреннее трение (вязкость)

Механизм возникновения внутреннего трения между параллельными слоями жидкости (газа), движущимися с различными скоростями, заключается в том, что из-за хаотичного теплового движения происходит обмен молекулами между слоями, в результате чего импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а движущегося медленнее – увеличивается, что приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее.

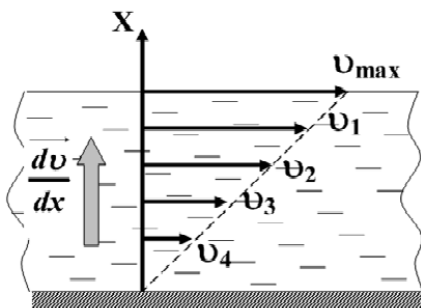
Экспериментально установлено, что модуль силы внутреннего трения, приложенной к слоям, определяется формулой:

$$F = \eta \cdot \left| \frac{dv}{dx} \right| \cdot S,$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости, коэффициент пропорцио-

нальности;  $\left| \frac{dv}{dx} \right|$  – градиент скорости – изменение скорости

$v$  на единицу длины  $x$  в направлении, перпендикулярном скоростям  $v_1, v_2, \dots$  (рисунок);  $S$  – площадь слоя, на который действует сила  $F$ .



Коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения при  $\frac{dv}{dx} = 1 \frac{м}{с}$  и  $S = 1 м^2$ . В системе СИ единица измерения  $\eta$ :

$$[\eta] = \frac{Н \cdot с}{м^2} = \frac{кг}{м \cdot с}.$$

Исходя из основных представлений молекулярно-кинетической теории, коэффициент вязкости газов равен:

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

где  $\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул – среднее расстояние между двумя последовательными столкновениями молекул;  $\langle v \rangle$  – средняя арифметическая скорость движения молекул;  $\rho$  – плотность газа.

Поскольку  $\langle \lambda \rangle$  и  $\langle v \rangle$  растут с увеличением температуры, коэффициент вязкости газов увеличивается с ростом температуры.

Следует отметить, что коэффициент вязкости жидкостей уменьшается при увеличении температуры. Это говорит о том, что у жидкостей и газов различные механизмы внутреннего трения.

Динамический коэффициент вязкости жидкостей примерно в  $10^4$  раз больше, чем у газов.



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА М20

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА, СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ И ИХ ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА

**Цель работы:** определение коэффициента вязкости воздуха, средней длины свободного пробега молекул и их эффективного диаметра.

**Оборудование:** экспериментальная установка, секундомер, мерный стакан.

#### Теоретическая часть

**Средняя длина свободного пробега молекул газа**  $\langle \lambda \rangle$  – среднее расстояние между двумя последовательными столкновениями молекул.

На основе молекулярно-кинетической теории можно получить формулу:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n}, \quad (1)$$

где  $\langle v \rangle$  – средняя арифметическая скорость;  $\langle z \rangle$  – среднее число столкновений каждой молекулы с остальными за единицу времени;  $\sigma$  – эффективный диаметр молекулы;  $n$  – число молекул в единице объема.

**Эффективный диаметр молекулы**  $\sigma$  – минимальное расстояние, на которое могут сблизиться молекулы при столкновении.

Из молекулярно-кинетической теории получается формула для коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \langle v \rangle \cdot \langle \lambda \rangle, \quad (2)$$

где  $\langle \lambda \rangle$  – средняя длина свободного пробега молекул;  $\langle v \rangle$  – средняя арифметическая скорость движения молекул;  $\rho$  – плотность газа.

Экспериментальное определение коэффициента вязкости основано на изучении ламинарного течения газа или жидкости в капилляре. (Ламинарным называется течение, при котором жидкость или газ перемещается слоями без перемешивания и пульсаций). Такой метод был предложен французским физиком и врачом Жаком Пуазейлем. Используя законы ламинарного течения, Ж. Пуазейль получил формулу для определения коэффициента вязкости в таком виде:

## Физика

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot t \cdot \Delta P}{8 \cdot V \cdot l}, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус капилляра;  $t$  – время прохождения газа;  $\Delta P$  – разность давлений на входе и выходе капилляра;  $V$  – объем газа, протекающего через сечение капилляра;  $l$  – длина капилляра.

Приравняв правые части уравнений (2) и (3), выразив из уравнения Клапейрона – Менделеева плотность воздуха:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{M \cdot P}{R \cdot T}, \quad (4)$$

и учитывая значение средней арифметической скорости:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot M}}, \quad (5)$$

получим формулу для определения средней длины свободного пробега молекул воздуха в таком виде:

$$\langle \lambda \rangle = \alpha \cdot \frac{t \cdot \Delta P \cdot \sqrt{T}}{P \cdot V}, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – постоянный коэффициент для данного лабораторного прибора (указан на установке);  $t$  – время истечения жидкости;  $T$  и  $P$  – абсолютная температура и давление воздуха в лаборатории соответственно;  $\Delta P$  – разность давлений на входе и выходе капилляра;  $V$  – объем жидкости, совпадающий с объемом воздуха, прошедшего через капилляр.

Из формулы (1) можно определить эффективный диаметр молекулы воздуха:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot n \cdot \langle \lambda \rangle}}, \quad (7)$$

Для определения концентрации  $n$ , используем уравнение Клапейрона – Менделеева в таком виде:

$$P = n \cdot k \cdot T, \quad (8)$$

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

Подставляя (8) в (7) получаем выражение для эффективного диаметра:

$$\langle \sigma \rangle = \sqrt{\frac{k \cdot T}{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot \langle \lambda \rangle \cdot P}}, \quad (9)$$

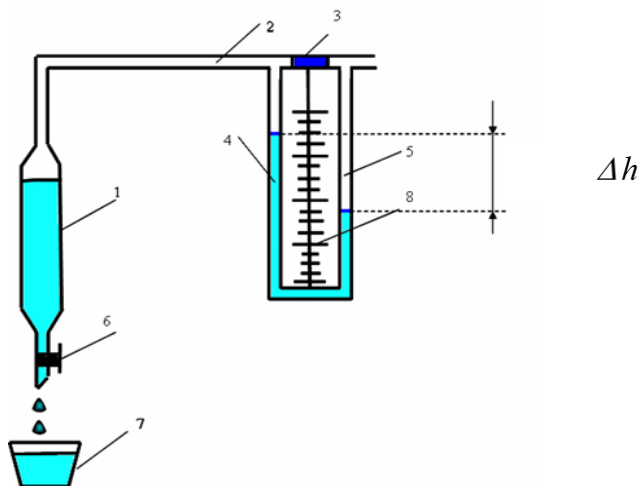
Подставляя (4) и (5) в (2) получаем выражение для коэффициента вязкости воздуха

$$\langle \eta \rangle = \frac{2}{3} \cdot P \cdot \langle \lambda \rangle \sqrt{\frac{2 \cdot M}{\pi \cdot R \cdot T}} \quad (10)$$

где  $M = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$  – молярная масса воздуха,  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – универсальная газовая постоянная.

### Описание экспериментальной установки

Прибор состоит из стеклянного сосуда 1, заполненного водой (рисунки). В верхнюю часть сосуда впаивается стеклянная трубка 2, внутри которой расположен капилляр 3, по обе стороны которого впаиваются стеклянные трубки 4 и 5 водяного манометра.



Экспериментальная установка

В нижней части сосуда находится кран  $b$ , с помощью которого можно открывать сосуд, и вода начинает вытекать в стакан  $7$ . При вытекании воды из сосуда давление воздуха в нем уменьшается, и воздух начинает через капилляр  $3$  заходить в сосуд.

Измерения выполняются при установившемся течении воздуха по капилляру, при этом вода вытекает из сосуда каплями, а водяной манометр показывает разность уровней  $\Delta h$ , значение которой можно определить по шкале  $8$ . Разность давлений определяется по формуле

$$\Delta P = \rho g \Delta h, \quad (11)$$

где  $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ .

### Порядок выполнения работы

1. Под отверстие в стеклянном сосуде подставить стаканчик, открыть кран. В момент, когда вода из отверстия станет вытекать каплями, подставить второй мерный стакан и включить секундомер. Отсчет времени  $t$  необходимо производить до тех пор, пока объем жидкости  $V$  в стаканчике не станет равным 20–30 мл.

2. По манометру измерить разность уровней жидкости в начале ( $\Delta h_1$ ) и в конце ( $\Delta h_2$ ) опыта. Вычислить среднее значение  $\langle \Delta h \rangle = \frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2}$ .

3. По формуле (11) для средних значений  $\langle \Delta h \rangle$  найти разность давлений  $\Delta P$  на входе и выходе капилляра.

4. Определить температуру окружающей среды  $T$  по комнатному термометру, атмосферное давление  $P$  по барометру. Эти приборы находятся у инженера лаборатории. Результаты занести в таблицу:

$\alpha = \frac{M^4}{c \cdot \sqrt{K}}; V = M^3; T = K; P = Pa$								
Номер	$t$	$\Delta h_1$	$\Delta h_2$	$\langle \Delta h \rangle$	$\Delta P$	$\lambda$	$\Delta \lambda$	$\delta$
[ ]	$c$	$m$	$m$	$m$	$Pa$	$m$	$m$	%
1								X
2								
3								
Ср								
$\langle \sigma \rangle = m; \quad \langle \eta \rangle = \frac{KZ}{M \cdot c}$								

5. Вылить воду из мерного стаканчика в стеклянный сосуд 1.
6. Повторить пункты 1–5 три раза.
7. Рассчитать длину свободного пробега для каждого измерения по формуле (6).
8. Рассчитать среднюю длину свободного пробега молекул воздуха  $\langle \lambda \rangle$ .
9. Найти абсолютную погрешность каждого измерения  $\Delta \lambda$  и среднюю абсолютную погрешность  $\langle \Delta \lambda \rangle$ .
10. Найти относительную погрешность по формуле
 
$$\delta = \frac{\langle \Delta \lambda \rangle}{\langle \lambda \rangle} 100\%.$$
11. Полученные результаты занести в таблицу.
12. Окончательный результат представить в виде:
 
$$\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \langle \Delta \lambda \rangle.$$
13. По формуле (9) по среднему значению  $\langle \lambda \rangle$  рассчитать средний эффективный диаметр молекул воздуха  $\langle \sigma \rangle$ , по формуле (10) определить средний коэффициент вязкости воздуха  $\langle \eta \rangle$ . Результаты занести в таблицу.

### Контрольные вопросы

1. Что такое вязкость газа (жидкости)?
2. Что такое средняя длина свободного пробега молекул газа и от чего она зависит?
3. Дайте определение эффективного диаметра молекул? Почему эффективный диаметр всегда больше истинного?
4. Сформулируйте понятие модели идеального газа. Запишите уравнение Клапейрона – Менделеева.

Физика

5. Запишите основное уравнение молекулярно-кинетической теории.
6. Дайте определение средней арифметической, средней квадратичной и наиболее вероятной скоростей молекул.
7. Что такое число Авогадро?
8. Сделайте вывод формул для  $\langle \lambda \rangle$ ,  $\sigma$ ,  $\eta$  .ж

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА М21

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

**Цель работы:** познакомиться со способом определения коэффициента вязкости жидкости методом Стокса.

**Оборудование:** стеклянный цилиндр с исследуемой жидкостью, измерительная линейка, микрометр, секундомер, набор металлических шариков.

#### Теоретическая часть

##### Описание метода и установки для определения коэффициента вязкости

Установка для определения коэффициента вязкости состоит из высокого цилиндрического сосуда, наполненного исследуемой жидкостью (рисунок).

**Метод Стокса** основан на определении скорости медленно движущихся в жидкости тел сферической формы. Рассмотрим падение тела (в нашем случае – металлического шарика) в вязкой покоей жидкости. На тело действуют следующие силы:

1. Сила тяжести, направленная вертикально вниз:

$$F_m = mg = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{ш} \cdot g,$$

(4)

где  $r$  – радиус шарика;  $\rho_{ш}$  – плотность материала шарика;  $g$  – ускорение свободного падения.

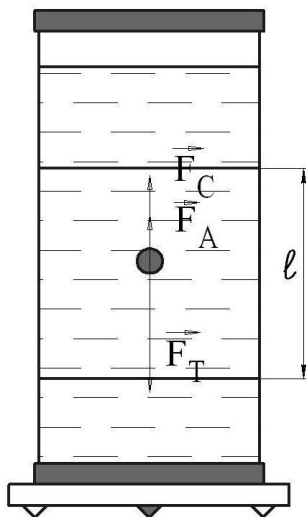
2. Сила Архимеда, направленная вертикально вверх:

$$F_A = V_{ш} \cdot \rho_{ж} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{ж} \cdot g,$$

где  $V_{ш}$  – объем шарика;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости.

3. Сила сопротивления (эмпирически установленная Дж. Стоксом), направленная вертикально вверх:

$$F_C = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v,$$



где  $\eta$  – коэффициент вязкости;  $v$  – скорость падения тела.

Выражение (6) справедливо при обтекании тела жидкостью (газом) без образования вихрей. Поэтому размеры шарика должны быть значительно меньше размеров сосуда.

Направление сил показано на рисунке.

При движении тела в жидкости, ее молекулы взаимодействуют с молекулами тела. За счет действия межмолекулярных сил в процесс движения вовлекаются соседние молекулы жидкости. Появляется слой жидкости, движущийся вместе с телом со скоростью движения тела. Этот слой увлекает в своем движении соседние слои жидкости, которые на некоторый период времени приходят в плавное безвихревое (ламинарное) движение (случай малых скоростей и малых размеров тела).

Вначале скорость движения тела будет возрастать, так как сила тяжести больше суммы сил сопротивления и силы Архимеда.

По второму закону Ньютона:

$$ma = F_T - F_C - F_A. \quad (7)$$

По мере увеличения скорости тела сила сопротивления будет возрастать, наступит такой момент, когда сила тяжести  $F_T$  уравновесится суммой сил  $F_A$  и  $F_C$ , т. е. тело будет двигаться с постоянной скоростью. Тогда формула (7) с учетом (4), (5), (6) запишется так:

$$\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{ш} \cdot g = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_{ж} \cdot g + 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot v. \quad (8)$$

Учитывая, что скорость тела постоянна и равна:

$$v = \frac{l}{t}, \quad (9)$$

где  $l$  – путь, пройденный в жидкости;  $t$  – время, а также, что диаметр тела  $d = 2r$ .

Для коэффициента вязкости из (8), учитывая (9), получим:

$$\eta = \frac{(\rho_{ш} - \rho_{ж}) \cdot d^2 \cdot g \cdot t}{18 \cdot l}. \quad (10)$$

Выражение (10) справедливо лишь при условии  $d \ll D$ , где  $D$  – диаметр сосуда, в который помещается исследуемая жидкость. На практике также необходимо следить за тем, чтобы при движении тело не приближалось к стенкам сосуда.

### Порядок выполнения работы

1. С помощью микрометра измерить диаметр шарика (методика измерений с помощью микрометрического винта приведена в приложении).



## Физика

2. По заданию преподавателя выбрать длину  $l$ , отступив от верхнего уровня жидкости 5–10 см (в этом случае движение шарика можно считать равномерным).

3. Отпустить шарик в цилиндр с нулевой начальной скоростью и измерить с помощью секундомера время его прохождения длины  $l$  внутри жидкости.

4. Результат измерения внести в таблицу:

Номер п/п	$d$	$l$	$t$	$\eta$	$\Delta\eta$	$\delta$
	м	м	с	$\frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}\cdot\text{с}}$	%
1						X
2						
3						
4						
5						
$\langle \rangle$	X	X	X			

5. Повторить пп. 1–4 для других шариков для различных или одинаковых  $l$  (не менее пяти).

6. Используя формулу (10) вычислить коэффициент вязкости  $\eta$  для каждого измерения.

7. Вычислить среднее значение  $\langle \eta \rangle$ .

8. Вычислить абсолютные погрешности по формуле:

$$\Delta\eta_i = |\langle \eta \rangle - \eta_i|$$

9. Вычислить среднее значение абсолютной погрешности  $\langle \Delta\eta \rangle$ .

10. Найти относительную погрешность по формуле

$$\delta = \frac{\langle \Delta\eta \rangle}{\langle \eta \rangle} \cdot 100\%.$$

11. Записать значение коэффициента вязкости в виде:

$$\eta = \langle \eta \rangle \pm \langle \Delta \eta \rangle.$$

12. Значения всех погрешностей внести в отчетную таблицу.

### Контрольные вопросы

1. Какие явления называются явлениями переноса?
2. Чему равна сила вязкого трения?
3. Что такое градиент скорости?
4. Что называют коэффициентом вязкости?
5. Единицы измерения коэффициента вязкости в системе СИ.
6. В чем заключается метод определения коэффициента вязкости жидкости (метод Стокса)?
7. Расставьте силы, действующие на тело, движущееся внутри вязкой жидкости.
8. Почему необходимо соблюдать условие  $d \ll D$ ?
9. Почему путь  $l$  нужно выбирать, отступив от верхнего уровня жидкости 5–10 см?
10. Получите формулу для расчета  $\eta$ .
11. Как зависят коэффициенты вязкости жидкостей и газов от температуры?
12. В чем заключается механизм возникновения вязкого трения в жидкостях и газах?

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### Микрометрический винт. Микрометр

Микрометрический винт применяется в точных измерительных приборах и дает измерения до сотых долей миллиметра.

Микрометрический винт представляет собой стержень, снабженный точной винтовой нарезкой. Высота подъема винтовой нарезки за один оборот называется шагом микрометрического винта.

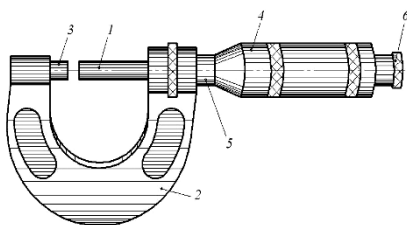


Рис. П1

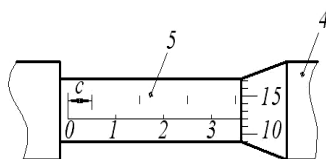


Рис. П2

Микрометр состоит из двух основных частей: микрометрического винта 1 и скобы 2 (рис. П1).

Микрометрический винт 1 проходит через отверстие 5 с внутренней резьбой. Против микрометрического винта 1, на скобе, имеется упор 3. На винте 1 закреплен барабан 4 с делениями по окружности. При вращении микрометрического винта барабан скользит по линейной шкале, нанесенной на стебле 5.

Наиболее распространен микрометр, у которого цена деления линейной шкалы стебля  $s=0,5$  мм. Верхние и нижние риски шкалы сдвинуты друг относительно друга на полмиллиметра, т. е. нижняя шкала представляет собой миллиметровую шкалу (рис. П2).

Для того чтобы микрометрический винт 1 передвинулся на 1 мм, нужно сделать два оборота барабана 4. Таким образом, шаг микрометрического винта равен 0,5 мм. У такого микрометра на барабане имеется шкала, содержащая 50 делений.

Для измерения микрометром предмет помещают между упором 3 и микрометрическим винтом 1 и вращают винт 1 за головку 6 до тех пор, пока измеряемый предмет не будет зажат между упором 3 и концом винта 1 (вращение необходимо производить только за головку 6, в противном случае прибор легко сломать!)

Числовое значение, например, длины  $L$  измеряемого предмета, показанного на рис. П2 находят следующим образом: замечают по шкале число целых делений -3, что составляет 3 мм, число половин делений - половине деления соответствуют 0,50 мм и добавляют число делений на барабане в нашем случае 12, что составляет 0,12 мм. Таким образом,  $L=3+0,50+0,12=3,62$  мм.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА М22

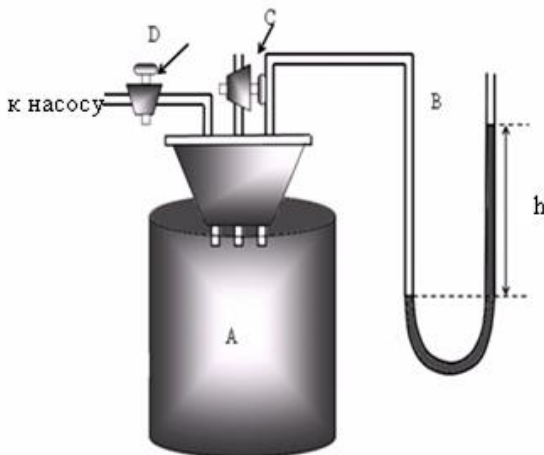
### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ ПУАССОНА МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА

**Цель работы:** определение постоянной Пуассона в результате проводимых в лабораторных условиях адиабатного и изохорного процессов.

**Оборудование:** экспериментальная установка, водяной манометр.

#### Принцип работы экспериментальной установки и вывод рабочих формул

Экспериментальная установка состоит из баллона  $A$ , соединенного с водяным манометром  $B$  и с насосом (рисунок). С помощью крана  $C$  баллон  $A$  может быть соединен с атмосферой. Если насосом накачать в баллон некоторое количество воздуха, то давление и температура воздуха внутри баллона повысятся. Вследствие теплообмена воздуха с окружающей средой через некоторое время температура воздуха, находящегося в баллоне, сравняется с температурой внешней среды (температурой в аудитории)  $T_1$ , а давление изменяется до  $P_1 = P_0 + \rho g h_1$ , где  $P_0$  – начальное (атмосферное) давление;  $\rho$  – плотность воды;  $h_1$  – разность уровней водяного манометра  $B$  (состояние 1).



Экспериментальная установка

Если открыть на короткое время кран  $C$ , часть воздуха из баллона выйдет в атмосферу. Процесс выхода (расширения) воздуха протекает быстро, воздух не успевает обмениваться теплом с окружающей средой, поэтому его можно считать адиабатическим.

В конце адиабатического процесса (состояние 2) объём газа увеличится до  $V_2$ , температура понизится до  $T_2$ , а давление сравняется с атмосферным  $P_0$ .

Применим уравнение Пуассона к состояниям 1 и 2:

$$\frac{P_1^{\gamma-1}}{T_1^\gamma} = \frac{P_0^{\gamma-1}}{T_2^\gamma}. \quad (1)$$

Охладившийся воздух в баллоне через некоторое время нагреется вследствие теплообмена до температуры в лаборатории  $T_1$ , давление возрастет до некоторой величины  $P_2 = P_0 + \rho g h_2$ , а объем останется прежним  $V_2$  (состояние 3).

Переход воздуха из состояния 2 в состояние 3 является изохорическим нагреванием. Уравнение этого процесса имеет вид:

$$\frac{P_0}{T_2} = \frac{P_2}{T_1}. \quad (2)$$

Исключив из уравнений (1) и (2) температуры, получим:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^\gamma = \frac{P_1}{P_0}. \quad (3)$$

Логарифмируя уравнение (3), получим:

$$\gamma = \frac{\lg P_1 - \lg P_0}{\lg P_1 - \lg P_2}.$$

Поскольку значения  $\rho g h_1$  и  $\rho g h_2$  значительно меньше значения атмосферного давления  $P_0$ , после разложения  $\lg P_1$  и  $\lg P_2$  в ряд Тейлора, можно взять только два первых члена:

$$\lg P_1 = \lg(P_0 + \rho g h_1) = \lg P_0 + \frac{\rho g h_1}{P_0} + \dots;$$

$$\lg P_2 = \lg(P_0 + \rho g h_2) = \lg P_0 + \frac{\rho g h_2}{P_0} + \dots,$$

тогда

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (4)$$

Формула (4) является рабочей для нахождения постоянной Пуассона.

### Порядок выполнения работы

1. Установить кран  $C$  в положение 1. С помощью насоса накачать в баллон  $A$  воздух так, чтобы разность уровней в водяном манометре  $B$  была 15 – 20 см.

2. Перекрыть кран  $C$  так, чтобы воздух в баллоне был отсоединен от насоса (положение 2).

3. Для установления равновесного состояния требуется некоторое время, от 1,5 до 2 минут, в течение которого будет происходить теплообмен воздуха с окружающей средой, и уровни жидкости в манометре будут перемещаться. После того, как перемещение уровней прекратится, температура воздуха в баллоне станет равной комнатной температуре. Разность уровней жидкости в манометре станет  $h_1$ . Измерить величину  $h_1$  и занести в таблицу:

Номер п/п	$h_1$	$h_2$	$\gamma$	$\Delta\gamma$	$\delta$
[ ]	мм	мм	-	-	%
1					X
2					
3					
4					
5					
Ср.	X	X			

4. На следующем этапе кран  $C$  открыть (положение 3), соединяя тем самым воздух, находящийся в баллоне, с наружным воздухом и быстро закрыть (положение 2). Кран  $C$  следует перекрывать сразу же, как только уровни жидкости в манометре выравняются.

5. После перекрывания крана  $C$  температура воздуха будет ниже, чем температура окружающей среды. Для установления термодинамического равновесия между воздухом в баллоне и окружающей средой потребуется **1,5 – 2 мин.** В данном случае наблюдается перемещение уровней жидкости в манометре  $B$ .

## Физика

6. После того, как перемещение уровней прекратилось, между ними установилась разность  $h_2$ . Измерить величину  $h_2$  и занести в таблицу.

7. Опыт повторить 5 раз.

8. Для каждой пары значений  $h_1$  и  $h_2$  вычислить величину  $\gamma$  по формуле (4), **округляя значения до сотых**. Для пяти полученных значений  $\gamma$  вычислить среднее значение  $\langle \gamma \rangle$ .

9. Найти абсолютную погрешность каждого измерения  $\Delta\gamma$ .

10. Найти среднюю абсолютную погрешность  $\langle \Delta\gamma \rangle$ .

11. Найти относительную погрешность по формуле:

$$\delta = \frac{\langle \Delta\gamma \rangle}{\langle \gamma \rangle} 100\%.$$

12. Полученные результаты занести в таблицу.

13. Окончательный результат представить в виде:

$$\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \langle \Delta\gamma \rangle.$$

14. Рассчитать  $\gamma$  по формуле  $\gamma = \frac{i+2}{i}$ , считая воздух двух-

атомным газом ( $i=5$ ) и сравнить с экспериментально полученным. Сделать выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Дайте определение молярной и удельной теплоемкостей.  
 2. Что представляет собой модель идеального газа.  
 3. Чем отличается молярная теплоемкость при постоянном давлении от молярной теплоемкости при постоянном объеме? Почему  $C_p > C_v$ ?

4. Сформулируйте уравнение Клапейрона – Менделеева.

5. Что такое изопроцессы? Запишите уравнения изохорического, изобарического и изотермического процессов.

6. Сформулируйте первое начало термодинамики и покажите его применение к изопроцессам.

7. При каких условиях возможно протекание адиабатического процесса? Запишите уравнение адиабатического процесса. Сформулируйте первое начало термодинамики для адиабатического процесса.

Физика

8. От чего зависит значение кинетической энергии многоатомных молекул? Как определяется число степеней свободы молекул?

9. Дайте определение постоянной Пуассона.

10. Какие процессы происходят с воздухом при определении от-

ношения  $\frac{C_p}{C_v}$  методом Клемана – Дезорма?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА М27

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

**Цель работы:** определение теплоемкости воздуха при постоянном объеме методом электрического нагревателя и сравнение результата с теоретическим значением, полученным для модели идеального газа.

**Оборудование:** экспериментальная установка.

#### Теоретическая часть

Молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме

$$C_V = \frac{dU}{\nu \cdot dT}. \quad (1)$$

Согласно первому началу термодинамики при нагревании изменение внутренней энергии  $dU$  равно:

$$dU = \delta Q - p \cdot dV.$$

Тогда уравнение (1) примет вид

$$C_V = \frac{\delta Q - p \cdot dV}{\nu \cdot dT} \quad (2)$$

где  $\nu$  – количество вещества (число молей).

Из уравнения Клапейрона – Менделеева ( $PV = \nu RT$ ) путем дифференцирования получаем

$$dT = \frac{1}{\nu \cdot R} \cdot (P \cdot dV + V \cdot dP) . \quad (3)$$

Тепло поступает от электронагревателя, поэтому по закону Джоуля-Ленца:

$$\delta Q = u \cdot I \cdot dt \quad (4)$$

где  $u$  – напряжение;  $I$  – сила тока;  $dt$  – время протекания тока через нагреватель.

Подставляя (3) и (4) в (2), получаем

$$C_V = R \cdot \frac{u \cdot I \cdot dt - P \cdot dV}{P \cdot dV + V \cdot dP} .$$

Для удобства перейдем от бесконечно малых приращений к  $\Delta$ :

$$C_V = R \cdot \frac{u \cdot I \cdot \Delta t - P \cdot \Delta V}{P \cdot \Delta V + V \cdot \Delta P} . \quad (5)$$

Малые приращения давления газа  $\Delta P$  в установке измеряются с помощью жидкостного (масляного) манометра: при повышении давления газа из-за полученного тепла газ частично вытесняет жидкость в манометре в наклонную трубку, при этом несколько увеличивается объем газа. Конструкция манометра такова, что приращения давления и объема связаны линейной зависимостью:

$$\Delta V = \alpha \cdot \Delta P, \quad (6)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

Подставив (6) в (5), получаем

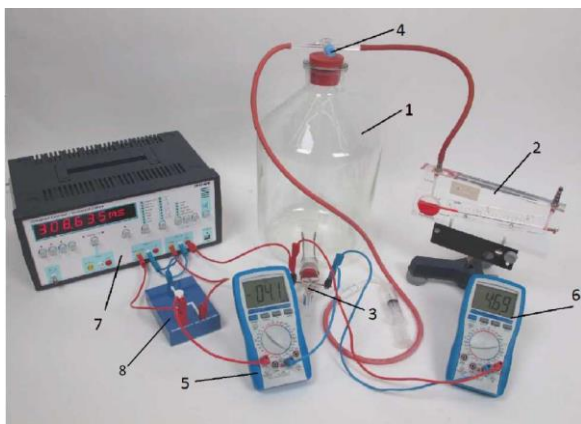
$$C_V = R \cdot \left( \frac{u \cdot I \cdot \Delta t}{(\alpha \cdot P + V) \cdot \Delta P} - \frac{\alpha \cdot P}{\alpha \cdot P + V} \right), \quad (7)$$

где  $V = 10^{-2} \text{ м}^3$  – объем сосуда;  $P$  – атмосферное давление;

$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  $\alpha$  – указан на установке.

### Принцип работы экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из сосуда объемом  $V = 10 \text{ л}$ , в нижней части которого вмонтированы герметичные электрические вводы для подачи напряжения на спираль нагревателя, помещенного в сосуд (рисунок). Сосуд 1 соединён с масляным манометром 2 с помощью трехпозиционного крана 4. Сосуд 1 соединён с масляным манометром 2 с помощью трехпозиционного крана 4.



Экспериментальная установка для определения  $C_V$ :

1 – сосуд объемом 10 л с помещенным внутрь электронагревателем; 2 – масляный манометр; 3 – однопозиционный кран; 4 – трехпозиционный кран; 5 – амперметр; 6 – вольтметр; 7 – цифровой счетчик; 8 – двухходовой переключатель

### Подготовка установки к измерениям

## Физика

1. Включить цифровой счетчик 7 (переключатель расположен на задней панели прибора). Кнопкой «Function» установить режим измерения времени «Timer» (ms). Нажимая несколько раз кнопку «Trigger», установить режим  $\square\square$ . Нажать кнопку «Reset», при этом должна загореться красная кнопка напротив «Digits». С помощью кнопок «+» и «-» добиться необходимой точности измерений.

2. Соединить сосуд 1 с манометром 2 через кран 4. Проверить, чтобы бутылка была плотно закрыта. Нижний кран 3 должен быть закрыт, а кран 4 находится в горизонтальном положении (красная точка внизу), при котором в сосуде и манометре устанавливается атмосферное давление.

3. Добиться с помощью шприца, чтобы уровень масла в манометре соответствовал нулевой отметке шкалы.

4. Включить амперметр 5 и вольтметр 6 нажатием кнопки «Power».

Установить пределы измерений 20 А и 20 В.

**Порядок выполнения работы**

1. Нажать кнопку «Stop», затем кнопку «Start» на цифровом счетчике 7.

2. Нажать на амперметре и вольтметре режим PK HOLD.

3. Кратковременно включить ток ключом 8 на время (не более 1 секунды).

4. При достижении жидкости в манометре максимального значения (в диапазоне от 0,1 до 1 мбар) кран 4 повернуть на 90 градусов против часовой стрелки.

5. Записать показания амперметра  $I$ , вольтметра  $u$ , цифрового счетчика  $\Delta t$  и манометра  $\Delta P$  в таблицу (1 деление манометра соответствует 10 Па):

	$u$	$I$	$\Delta t$	$\Delta P$	$\Delta P$	$C_V$	$ \Delta C_V $	$\delta C_V$
[ ]	В	А	с	дел	Па	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$	%
1								X
2								
3								
4								
5								
< >	X	X	X	X	X			

6. Привести систему в исходное состояние. Добиться нулевой отметки шкалы на манометре (при необходимости использовать шприц). Кран 4 повернуть в горизонтальное положение (красная точка внизу).

7. Провести 5 таких опытов, повторив пп. 1–6 данного задания.

8. По формуле (7) рассчитать  $C_V$  для каждого измерения.

9. Найти среднее значение  $\langle C_V \rangle$ .
10. Найти абсолютную погрешность каждого измерения  $(\Delta C_V)_i$ .
11. Найти среднюю абсолютную погрешность  $\langle \Delta C_V \rangle$ .
12. Найти относительную погрешность по формуле

$$\delta C_V = \frac{\langle \Delta C_V \rangle}{\langle C_V \rangle} 100\%.$$

13. Посчитать теоретическое значение  $C_V^{теор}$  по формуле

$$C_V^{теор} = \frac{i}{2} R, \quad (8)$$

где  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;  $i = 5$  – число степеней свободы для молекул воздуха.

14. Сравнить  $\langle C_V \rangle$  и  $C_V^{теор}$ . Сделать выводы.
15. Окончательный результат представить в виде:

$$C_V = \langle C_V \rangle \pm \langle \Delta C_V \rangle.$$

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение молярной и удельной теплоемкостей.
2. Что представляет собой модель идеального газа?
3. Чем отличается молярная теплоемкость при постоянном давлении от молярной теплоемкости при постоянном объеме? Почему  $C_p > C_V$ ?
4. Сформулируйте уравнение Клапейрона – Менделеева.
5. Что такое изопроцессы? Запишите уравнения изохорического, изобарического и изотермического процессов.
6. Сформулируйте первое начало термодинамики и покажите его применение к изопроцессам.
7. При каких условиях возможно протекание адиабатического процесса? Запишите уравнение адиабатического процесса. Сформулируйте первое начало термодинамики для адиабатического процесса.
8. От чего зависит значение кинетической энергии многоатомных молекул? Как определяется число степеней свободы молекул?

9. Произведите вывод уравнения Майера.
10. Дайте определение постоянной Пуассона.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Трофимова Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 2010.
2. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М: Наука, 2010. – Т. 1.