

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

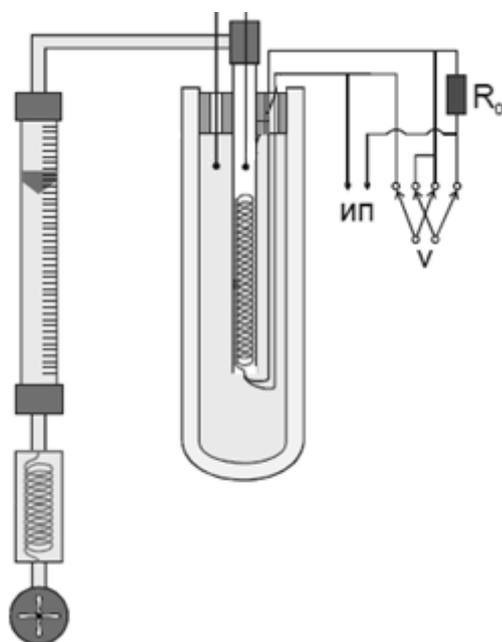
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра физики

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика»  
для студентов всех технических специальностей  
всех форм обучения



Воронеж 2021

УДК 539.1 (07)  
ББК 22.36я7

**Составители:**

канд. физ.-мат. наук Т. Л. Тураева,  
канд. физ.-мат. наук А. Г. Москаленко,  
канд. физ.-мат. наук Е. П. Татьяна,  
канд. пед. наук Т. В. Дубовицкая,  
канд. физ.-мат. наук Н. В. Матовых,  
канд. физ.-мат. наук О. И. Ремизова

**Молекулярная физика и термодинамика:** методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика» для студентов всех технических специальностей всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: Т. Л. Тураева, А. Г. Москаленко, Е. П. Татьяна, Т. В. Дубовицкая, Н. В. Матовых, О.И. Ремизова. — Воронеж: Изд-во ВГТУ.2021. — 32 с.

Методические указания содержат теоретический материал, необходимый для выполнения лабораторных работ по разделу «Молекулярная физика и термодинамика» дисциплины «Физика». Даны описание методик измерения, приборов и порядок выполнения лабораторных работ в учебных лабораториях кафедры физики ВГТУ.

Предназначены для студентов всех технических специальностей всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле ЛР\_МКТ\_ТД.pdf.

Ил. 18. Табл. 5. Библиогр.: 4 назв.

**УДК 539.1(07)**  
**ББК 22.36я7**

**Рецензент** – Е. В. Шведов, д-р. физ.-мат. наук,  
проф. кафедры физики ВГТУ

*Издается по решению редакционно-издательского совета  
Воронежского государственного университета*

# 1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.16

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

**Цель работы:** исследовать зависимость коэффициента внутреннего трения воздуха от температуры и сопоставить её с теоретической.

**Оборудование:** экспериментальная установка для определения коэффициента внутреннего трения.

### 1.1. Теоретическое введение

Минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул, называется эффективным диаметром молекулы  $d$  (рис. 1.1). В первом приближении эффективный диаметр можно считать постоянным, хотя он и зависит от скорости сталкивающихся молекул, т.е. от температуры газа.

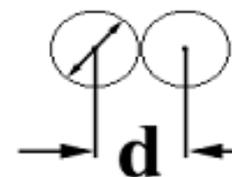


Рис.1.1

Путь, пройденный молекулой между двумя последовательными столкновениями, имеет самые различные значения. Среднее значение пути между столкновениями называют средней длиной свободного пробега  $\lambda$ .

Согласно молекулярно-кинетической теории, средняя длина свободного пробега определяется выражением

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi nd^2}, \quad (1.1)$$

где  $\sigma = \pi d^2$  – эффективное сечение молекулы,  $n$  – концентрация молекул газа в единице объёма.

Средняя длина свободного пробега обратно пропорциональна концентрации  $n$  молекул и, учитывая основное уравнение молекулярно-кинетической теории  $p=nkT$ , при постоянной температуре обратно пропорциональна давлению  $p$ :

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi pd^2} \sim \frac{1}{p}. \quad (1.2)$$

Средняя длина свободного пробега  $\lambda$  определяет явления переноса в реальных газах: вязкость, теплопроводность и диффузию.

Вязкость (внутреннее трение) обусловлено возникновением сил трения между слоями газа, перемещающимися параллельно друг другу с различными скоростями. Механизм возникновения внутреннего трения между слоями газа связан с переходом молекул между слоями, в результате которого происходит перенос импульса упорядоченного движения молекул из одного слоя в другой,

что в свою очередь, приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее.

Внутреннее трение описывается законом Ньютона:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dx} \right| S, \quad (1.3)$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости,  $\frac{dv}{dx}$  – градиент скорости в направлении перпендикулярном поверхности касания слоёв,  $S$  – площадь соприкасающихся поверхностей.

Из формулы (1.3) следует, что коэффициент динамической вязкости численно равен силе внутреннего трения, действующей на единицу площади поверхности слоя при градиенте скорости равном единице

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

Единица вязкости – паскаль-секунда ( $[\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}$ ). Это вязкость такой среды, в которой при градиенте скорости, равном единице, возникает сила внутреннего трения в 1 Н на 1 м<sup>2</sup> поверхности касания слоёв.

Выражение для коэффициент динамической вязкости через параметры газа:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \lambda, \quad (1.4)$$

где  $\rho = \frac{pM}{RT}$  – плотность газа;  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{M\pi}}$  – средняя скорость теплового движения молекул,  $M$  - молярная масса газа.

Учитывая (1.2) из (1.4) получим зависимость коэффициента динамической вязкости от температуры:

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \frac{pM}{RT} \cdot \sqrt{\frac{8RT}{M\pi}} \cdot \frac{kT}{\sqrt{2} p \pi d^2} = \text{const} \cdot \sqrt{T}. \quad (1.5)$$

## 1.2. Определения динамической вязкости методом Пуазейля

Один из методов определения коэффициента внутреннего трения газа основан на истечении воздуха через капилляр. Этот метод носит название метода Пуазейля.

Рассмотрим ламинарное (слоистое) течение газа (жидкости) в тонком капилляре радиусом  $R$  и длиной  $\ell$ . В газе мысленно выделим цилиндрический слой радиусом  $r$  и толщиной  $dr$  (рис. 1.2).

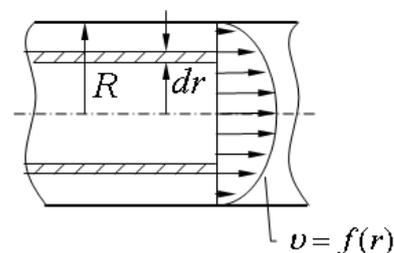


Рис. 1.2

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

$$F = -\eta \frac{dv}{dr} dS = -\eta 2\pi r \ell \frac{dv}{dr}, \quad (1.6)$$

где  $dS$  – боковая поверхность цилиндрического слоя, знак минус показывает, что при возрастании радиуса цилиндра скорость уменьшается.

При стационарном течении газа сила внутреннего трения, действующая на боковую поверхность цилиндра, уравнивается силой давления, действующей на его основание:

$$-\eta 2\pi r \ell \frac{dv}{dr} = -\Delta p \pi r^2, \quad \text{откуда} \quad dv = -\frac{\Delta p}{2\eta \ell} r dr.$$

Полагая, что вследствие прилипания, скорость газа у стенок на расстоянии  $R$  от оси равна нулю, получим закон изменения скорости газа по сечению капилляра

$$v = -\frac{\Delta p}{4\eta \ell} (R^2 - r^2)., \quad (1.7)$$

Согласно (1.7) скорость молекул газа изменяется по параболическому закону, причём вершина параболы лежит на оси капилляра (рис.1.2).

За время  $t$  из трубы вытечет газ, объём которого равен (формула Пуазейля)

$$V = \int_0^R v \cdot t \cdot 2\pi r dr = \frac{2\pi \Delta p t}{4\eta \ell} \int_0^R r(R^2 - r^2) dr = \frac{2\pi \Delta p t}{4\eta \ell} \left[ \frac{r^2 R^2}{2} - \frac{r^4}{4} \right]_0^R = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8\eta \ell},$$

откуда следует, что вязкость равна

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p t}{8V \ell}.$$

Таким образом, коэффициент динамической вязкости воздуха можно рассчитать по формуле

$$\eta = \frac{\pi r_0^4 (p_1 - p_2) \tau}{8LV}, \quad (1.8)$$

где  $(p_1 - p_2) = \rho_g g (h_1 - h_2)$  – разность давлений воздуха на входе и выходе из капилляра;  $(h_1 - h_2)$  – разность уровней воды в манометре;  $r_0$  – радиус капилляра;  $L$  – длина капилляра;  $V$  – объём воздуха, протекающего через капилляр за время  $\tau$  при данной температуре;  $\rho_g$  – плотность воды.

### 1.3. Описание экспериментальной установки

На рис.1.3 и рис.1.4 представлены лицевая панель и схема экспериментальной установки для измерения коэффициента внутреннего трения воздуха. Микрокомпрессор 1 (рис.1.4) прокачивает воздух через ротаметр 2 и затем воздух направляется в медный термостат (цилиндрическая трубка) 3, внутри которой находится капилляр 4. Внутри медного термостата находится спай

термопары 5, измеряющей температуру воздуха протекающего через капилляр 4 в атмосферу. Термоэлектроды 7 соединены с измерителем температуры 8 типа 2ТРМО. Перепад давления на капилляре измеряется U- манометром 6. Медный термостат 3 находится в керамическом цилиндре, на внешней поверхности которого находится электрический нагреватель 9, соединённый с регулятором мощности 10.



Рис. 1.3

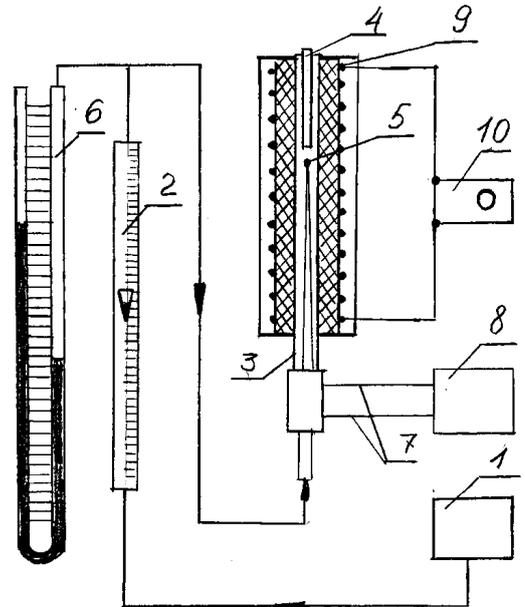


Рис. 1.4

На передней панели (рис. 1.3) находится тумблер включения питания установки 11, тумблер 12 включения нагревателя 9, регулятор температуры воздуха 10, протекающего через капилляр 4, измеритель температуры нагретого воздуха 13, измеритель объёмного расхода воздуха ротаметра 2, протекающего через капилляр 4 (ротаметр), U-манометр 6 для измерения перепада давления воздуха на капилляре, тумблер 14 включения компрессора 1, тумблер 15 включения вентилятора.

Двухканальный измеритель 2ТРМО предназначен для измерения температуры в двух различных точках, а также разности температур в этих точках с отображением данных на светодиодном цифровом индикаторе.

Для смены каналов измерения ( $T_1$ ;  $T_2$ ;  $\Delta T$ ) предназначена кнопка  (8).

#### 1.4. Порядок выполнения работы.

1. Включить электропитание установки тумблером 11.
2. Включить компрессор тумблером 14, измеритель температуры тумблером 13.
3. Включить питание регулятора температуры тумблером 12 и нажатием клавиши 16.
4. Повернуть со щелчком ручку 17 регулятора температуры по часовой стрелке и установить его метку в среднее положение.
5. При достижении температуры  $25^{\circ}\text{C}$  снять показания ротаметра и U-манометра (разность положений менисков на шкале  $\Delta h$ ).
6. Повторить измерения п.5 через каждые  $25^{\circ}\text{C}$  до достижения температуры  $150^{\circ}\text{C}$ .
7. Согласно показаниям ротаметра определить объёмный расход воздуха  $G$  по градуировочному графику рис.1.5. Для перевода в систему СИ учесть, что  $1 \text{ л/ч} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ .
8. Рассчитать значения коэффициента внутреннего трения газа при каждой температуре по формуле:

$$\eta = \frac{\pi r_0^4 (p_1 - p_2) \tau}{8LV} = \frac{\pi r_0^4 \rho_g g \Delta h}{8LG},$$

где  $r_0 = 0,5 \text{ мм}$  – радиус капилляра,  $L=40 \text{ мм}$  – длина капилляра,  $\rho_g=1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды,  $g=9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения.

9. Записать все результаты измерений и вычислений в табл. 1.1.
10. Построить график зависимости коэффициента динамической вязкости от термодинамической температуры  $\eta = f(T)$ . Сравните с теоретической зависимостью и сделайте вывод.

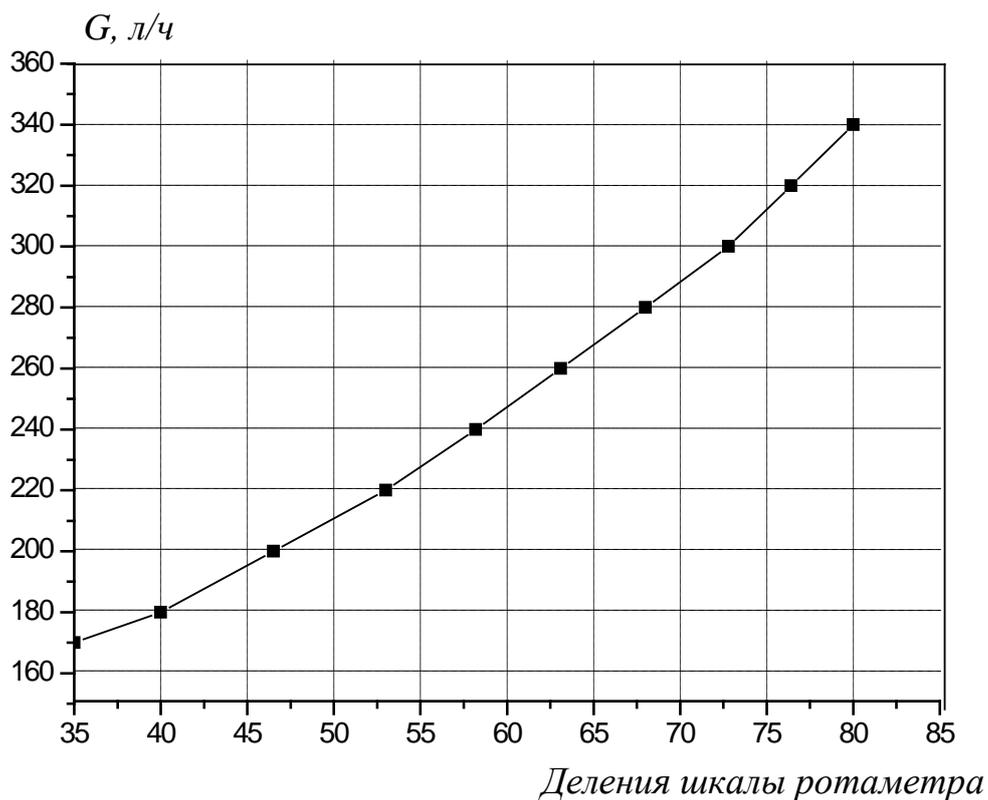


Рис. 1.5. Градуировочный график ротаметра

Таблица 1.1

Результаты измерений и вычислений

N п/п	$t, ^\circ C$	$T, K$	Показания ротаметра	$G = \frac{V}{\tau},$		$\Delta h, мм$	$\eta,$ Па·с
				л/ч	$\times 10^{-7}, м^3/с$		
1	25	298					
2	50	323					
3	75	348					
4	100	373					
5	125	398					
6	150	423					

## 2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.17 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

**Цель работы:** определения удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении.

**Оборудование:** экспериментальная установка для определения удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении, мультиметр.

### 2.1. Теоретическое введение

Удельной теплоёмкостью называют физическую величину  $c_{уд}$ , численно равную количеству теплоты, которое нужно сообщить единице массы вещества для изменения его температуры на  $1K$  в рассматриваемом термодинамическом процессе:

$$c_{уд} = \frac{\delta Q}{m dT}. \quad (2.1)$$

Молярной теплоёмкостью называют физическую величину  $C$ , численно равную количеству теплоты, которое нужно сообщить одному молю вещества для изменения его температуры на  $1K$  в рассматриваемом термодинамическом процессе. Очевидно, что

$$C = c_{уд} \cdot M, \quad (2.2)$$

где  $M$  – молярная масса вещества.

Величина теплоёмкости газа существенно зависит от того, при каких условиях он нагревается: при постоянном объёме или при постоянном давлении. Поэтому различают теплоёмкости: теплоёмкость при постоянном объёме  $C_v$  и постоянном давлении  $C_p$ .

Если нагревание происходит при постоянном объёме, то газ не совершает работы над внешними телами, следовательно, в соответствии с первым началом термодинамики, для одного моля газа всё тепло идёт на приращение внутренней энергии газа

$$\delta Q_v = dU = \frac{i}{2} R dT, \quad (2.3)$$

где  $i$  – число степеней свободы молекулы – определяется числом независимых координат, однозначно задающих движение молекулы.

Тогда

$$C_v = \frac{\delta Q_v}{\nu \cdot dT} = \frac{dU}{\nu \cdot dT} = \frac{i}{2} R \quad (2.4)$$

Отсюда внутреннюю энергию газа можно представить в виде:

$$U = \frac{i}{2} \nu RT = \nu C_V T. \quad (2.5)$$

Если нагревание происходит при постоянном давлении, то газ будет расширяться, совершая работу над внешними телами. Поэтому подводимое тепло идёт и на изменение внутренней энергии и на совершение работы. Первое начало термодинамики в этом случае запишется в виде:

$$\delta Q_p = dU + \delta A. \quad (2.6)$$

Работа газа при изобарном процессе:

$$\delta A = p dV = \nu R dT. \quad (2.7)$$

С учетом (2.5) и (2.7) уравнение (2.6) примет вид:

$$\delta Q_p = C_V dT + R dT = dT(C_V + R). \quad (2.8)$$

Тогда в соответствии с (2.2):

$$C_p = \frac{\delta Q_p}{\nu dT} = C_V + R. \quad (2.9)$$

С учетом (2.4)

$$C_p = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R. \quad (2.10)$$

$$C_p - C_V = R. \quad (2.11)$$

Соотношение (2.11) называют уравнением Майера для молярных теплоёмкостей. Для удельных теплоёмкостей оно имеет вид:

$$c_p - c_V = \frac{R}{M}. \quad (2.12)$$

Важной тепловой характеристикой газа является показатель адиабаты определяемый числом степеней свободы молекулы.

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}. \quad (2.13)$$

Из формул (2.4) и (2.10) следует, что  $C_p$  и  $C_V$  постоянны и не зависят от температуры. Однако на практике это справедливо только для идеальных газов.

## 2.2. Экспериментальная установка и методика измерений

На передней панели установки (рис. 2.1) находится двухканальный измеритель температур (5) 2ТРМО, подключённый к двум хромель-копелевым термопарам  $T_1$  и  $T_2$ , (1) – тумблер «Сеть», (2) – тумблер включения компрессора, (3) – источник питания, (4) – тумблер включения источника питания, (5) – измеритель температуры, (6) – тумблер включения измерителя температуры, (7) – ротаметр, (8) – тумблер переключатель для измерения напряжения на нагревателе и падения напряжения на образцовом сопротивлении 9 – клеммы подключения мультиметра, 10 – мультиметр.

На рис. 2.2 приведена схема экспериментальной установки. Воздух при температуре  $t_1$  подаётся компрессором (11) через холодильник (12) и ротаметр (13) по трубке в сосуд Дьюара (14). В трубке находится нихромовый нагреватель (15) к которому последовательно подключено образцовое сопротивление  $R_0$ . Протекая через трубку, воздух нагревается. Нагреватель питается от источника постоянного тока (ИП). Напряжение на нагревателе  $U_n$  и напряжение на образцовом сопротивлении  $U_o$  измеряется вольтметром (мультиметром)  $V$ . Температура воздуха на входе в сосуд Дьюара  $t_1$  и температура воздуха на выходе  $t_2$  после нагрева измеряется прибором 2ТРМО (см. инструкцию по эксплуатации). Объёмный расход воздуха  $G$  измеряется ротаметром (13).

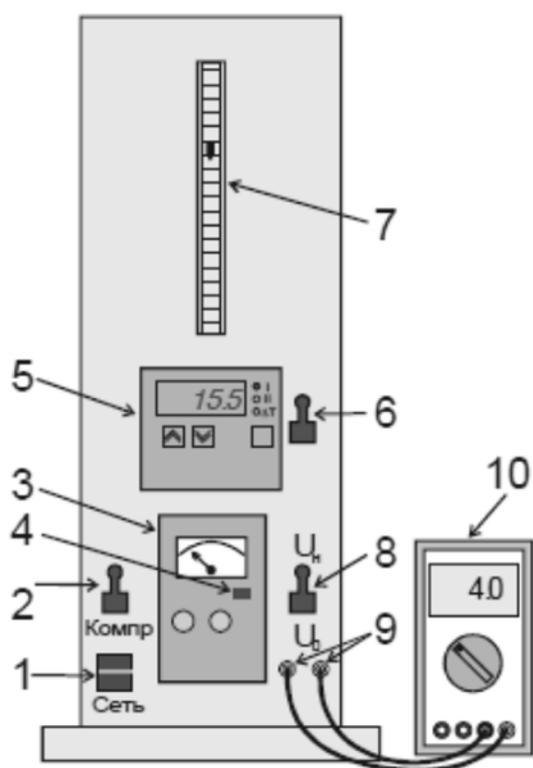


Рис. 2.1. Лицевая панель экспериментальной установки

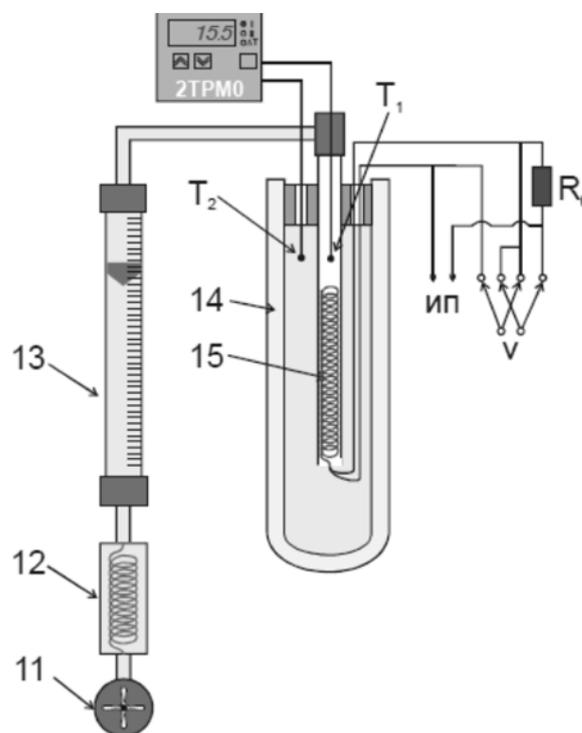


Рис 2.2. Схема экспериментальной установки

Двухканальный измеритель 2ТРМО предназначен для измерения температуры в двух различных точках, а также разности температур в этих точках с отображением данных на светодиодном цифровом индикаторе.

Для смены каналов измерения ( $T_1$ ;  $T_2$ ;  $\Delta T$ ) предназначена кнопка  .

**ВНИМАНИЕ!** При работе с мультиметром необходимо пользоваться оригинальными щупами. Когда мультиметр подключен к проверяемой цепи, не дотрагиваетесь до неиспользуемых гнезд. Перед тем, как повернуть переключатель пределов для смены рода работы, отключите щупы от проверяемой цепи.

### 2.3. Определение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении

Количество теплоты, отдаваемое нагревателем воздуху в единицу времени можно рассчитать по формуле электрической мощности

$$Q = I_n U_n = \frac{U_0}{R_0} U_n,$$

где  $I_n$  – сила тока в нагревателе,  $U_n$  напряжение на нагревателе,  $U_0$  напряжение на образцовом сопротивлении.

Учитывая потери энергии, только часть этой теплоты идет на нагревание воздуха при постоянном давлении:

$$Q = Q_p + Q_{потерь} = c_p m(t_2 - t_1) + Q_{потерь}.$$

Из графика зависимости количества теплоты от разности температур  $\Delta t$  (рис. 2.3) можно определить удельную теплоемкость, т.к. тангенс угла наклона графика

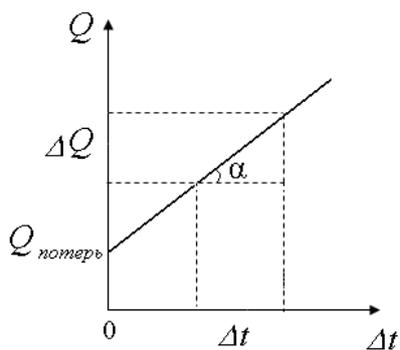


Рис. 2.3

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = c_p m,$$

то

$$c_p = \frac{\Delta Q}{m \Delta t}. \quad (2.14)$$

Для определения массового расхода воздуха  $m$  в работе измеряют объемный расход воздуха  $G$  с помощью ротаметра, тогда  $m = G\rho_в$ , где  $\rho_в = 1,29 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха.

### 2.3. Порядок выполнения работы

1. Подсоединить мультиметр (10) с помощью проводов к клеммам (9) на передней панели установки.

2. Включить питание установки тумблером (1) «Сеть», измеритель температуры (5) тумблером (6), компрессор тумблером (2).

3. Включить питание нагревателя кнопочным выключателем (4) источника питания (3) и установить первое значение напряжения  $U_n = 4B$ .

4. Включить мультиметр и измерить точное значение  $U_n$  и  $U_0$ , переключая тумблер (8) в соответствующие положения, рассчитать силу тока в нагревателе

по формуле:  $I_n = \frac{U_0}{R_0}$ , где  $R_0 = 0,1 \text{ Ом}$ .

#### Измерение мультиметром:

- подключите чёрный щуп к гнезду COM, а красный к гнезду V/ $\Omega$ ;
- установите переключатель рода работ в положение V- и установите автоматический режим выбора пределов измерения “AUTO” (на дисплее появится надпись “AUTO”);
- подключите щупы к источнику или нагрузке (клеммы 9 рис. 2.1);
- считайте показания индикатора. При контроле постоянного напряжения полярность красного щупа будет показана автоматически.

5. Через 7-10 минут (по достижении стационарного режима) снять показания температур  $t_1$  и  $t_2$  по измерителю 2ТРМО и деления ротаметра (7).

6. Повторить п.4-5 для напряжений на нагревателе:  $U_n = 6; 8; 10; 12 \text{ В}$ .

7. Записать в табл.1.1 показания ротаметра, температур  $t_1$  и  $t_2$ , напряжение на нагревателе  $U_n$ , напряжение на образцовом сопротивлении  $U_0$ , силу тока  $I_n$ .

8. Объёмный расход воздуха  $G$  л/ч определяется из градуировочного графика расхода воздуха от делений на шкале ротаметра (рис. 2.4). Объёмный расход воздуха необходимо перевести в систему СИ ( $1 \text{ л/ч} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

9. Вычислить массовый расход воздуха  $m = G \cdot \rho_в$ , где  $\rho_в = 1,29 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха.

10. Построить график зависимости  $Q = f(\Delta t)$ , аппроксимировать прямой.

11. Выбрать две точки на прямой. Для них определить приращение аргумента  $\Delta t$  и соответствующее приращение функции  $\Delta Q$ . Рассчитать по теплоемкости формуле:

$$c_p = \frac{\Delta Q}{m \Delta t},$$

и сравнить с табличным значением

$$c_p = \frac{i+2}{2M} R \approx 1 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

12. По точке пересечения графика с осью ординат определить  $Q_{\text{потерь}}$ .

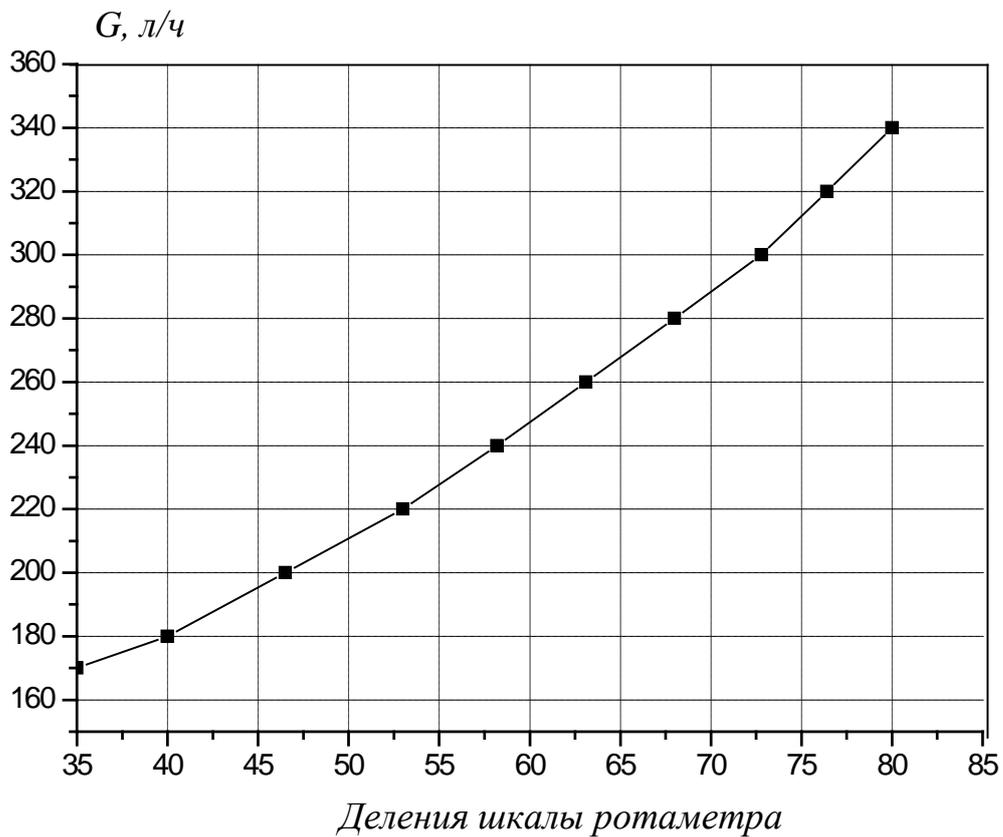


Рис. 2.4. Градуировочный график ротаметра

Таблица 2.1

Результаты измерений и вычислений

№ п/п	$U_n,$ $B$	$U_o,$ $mB$	$I,$ $A$	$Q,$ $Bm$	$t_1,$ $^{\circ}C$	$t_2,$ $^{\circ}C$	$\Delta t,$ $^{\circ}C$	Деления ротаметра	$G,$		$m,$ $kg/c$	$c_p,$ $Dж/(кг \cdot K)$
									$л/ч$	$м^3/с$		
1	4											
2	6											
3	8											
4	10											
5	12											

### 3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.18

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ПОСТОЯННОМ ОБЪЁМЕ

**Цель работы:** Определить экспериментальным путём значение показателя адиабаты  $\gamma = C_p/C_v$  для воздуха и сравнить с табличной величиной.

**Оборудование:** экспериментальная установка для определения отношения удельных теплоёмкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объёме.

### 3.1. Теоретическое введение

Процесс, протекающий без теплообмена с окружающей средой, называется адиабатным. Уравнение, связывающее параметры состояния идеального газа в этом процессе (уравнение Пуассона) имеет вид:

$$pV^\gamma = const,$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты.

Показатель адиабаты определяется отношением теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}.$$

Классическая теория теплоемкостей идеального газа, базирующаяся на законе о равномерном распределении энергии по степеням свободы, устанавливает связь между молярными теплоемкостями и числом степеней свободы молекул

$$C_v = \frac{i}{2}R, \quad C_p = \frac{i+2}{2}R.$$

Тогда показатель адиабаты можно выразить через число степеней свободы:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (3.13)$$

Число степеней свободы  $i$  – это число независимых координат, определяющих положение молекулы в пространстве – определяется числом атомов в молекуле и характером их связи. В общем случае находится как сумма поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы.

$$i = i_{\text{пост.}} + i_{\text{вр.}} + 2i_{\text{кол.}}$$

Значения числа степеней свободы и показатели адиабаты для различных молекул представлены в табл. 3.1

**Таблица 3.1**

Число атомов в молекуле	Характер связи между атомами	Число степеней свободы				Показатель адиабаты $\gamma$
		$i_{\text{пост.}}$	$i_{\text{вр.}}$	$2i_{\text{кол}}$	$i = i_{\text{пост.}} + i_{\text{вр.}} + 2i_{\text{кол.}}$	
1	–	3	–	–	3	1,67
2	жесткая	3	2	–	5	4,40
2	упругая	3	2	2	7	1,29
$\geq 3$	жесткая	3	3	–	6	1,33

### 3.2. Экспериментальная установка и методика измерения

Непосредственное измерение удельных теплоемкостей при постоянном давлении  $c_p$  и при постоянном объеме  $c_v$  экспериментально затруднительно,

проще измерить отношение этих величин:  $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_p}{C_v}$ . Одним из самых

простых методов определения данного отношения является методика с использованием адиабатического и изотермического процессов.

Принципиальная схема установки показана на рис.3.1. В стеклянный баллон 1, соединенный с компрессором 2, через напускной кран 3 накачивается воздух. Клапан сброса воздуха 4, находящийся на верхней крышке установки позволяет резко уменьшить давление в баллоне практически без теплообмена с окружающей средой. На рис.3.2 представлена передняя панель установки 6, на которой размещаются тумблер «СЕТЬ» 7, тумблер «КОМПРЕССОР» 8, водяной U - манометр 5, кран 3 перепуска воздуха со следующими положениями:

**НАПУСК** – положение ручки крана на данной отметке открывает линию к компрессору 2.

**ЗАКРЫТ** – положение ручки крана на данной отметке перекрывает баллон 1.

**РЕГУЛИРОВАНИЕ УРОВНЯ** – положение ручки крана на данной отметке позволяет отрегулировать уровень воды в коленах U-манометра после заполнения баллона воздухом.

Если накачать в баллон некоторое количество воздуха, то давление и температура воздуха внутри баллона повышается.

Вследствие теплообмена с окружающей средой через некоторое время температура воздуха, находящегося в баллоне, сравнивается температурой внешней среды. Внутри баллона устанавливается давление

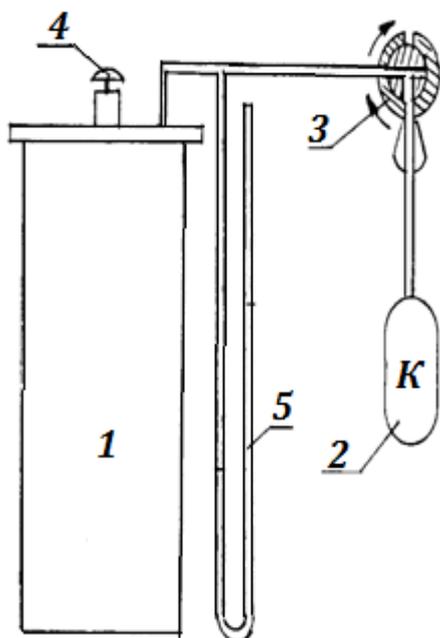


Рис. 3.1

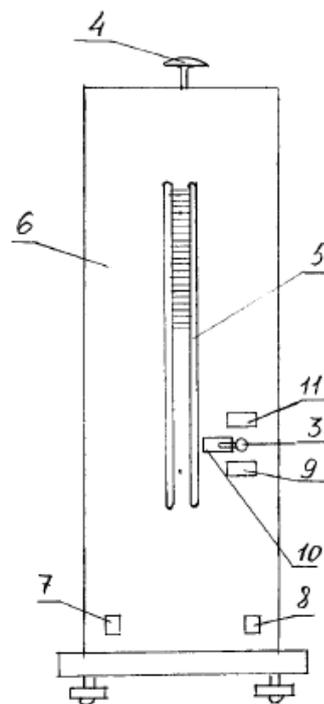


Рис. 3.2.

$$p_1 = p_0 + \rho g h_1, \quad (3.1)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление,  $\rho g h_1$  – добавочное давление, определяемое разностью уровней жидкостей  $h_1$  в манометре,  $\rho$  – плотность жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения.

Таким образом, состояние воздуха внутри баллона, которое назовём состоянием 1, характеризуется параметрами  $(p_0 + \rho g h_1)$ ,  $V_1$ ,  $T_1$ . Если открыть на некоторое время выпускной клапан, то процесс расширения газа можно считать адиабатическим (рис. 3.3).

Давление в сосуде установится равным атмосферному давлению  $p_0$ , температура газа понизится до  $T_2$ , а объём будет

$$V_2 = V_1 + \Delta V,$$

где  $\Delta V$  – объём воздуха, вышедшего из баллона.

Следовательно, в конце адиабатического процесса (состояние 2) параметрами являются  $p_0$ ,  $V_2$ ,  $T_2$ . Применяя к состояниям 1 и 2 уравнение Пуассона  $pV^\gamma = const$ , получим

$$(p_0 + \rho g h_1) \cdot V_1^\gamma = p_0 V_2, \quad (3.2)$$

$$(V_2/V_1)^\gamma = (p_0 + \rho g h_1)/p_0. \quad (3.3)$$

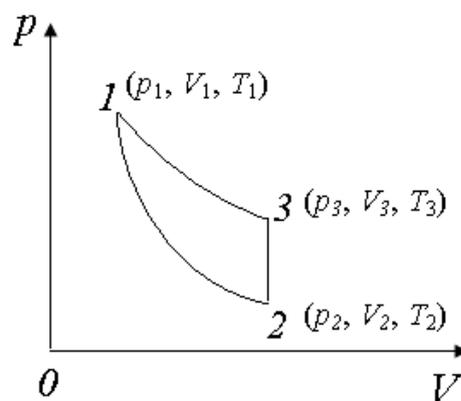


Рис. 3.3

Охладившийся при расширении воздух в баллоне и вне его через некоторое время вследствие теплопроводности нагревается до температуры внешней среды  $T_1$ ; давление возрастает до некоторой величины

$$p_2 = p_0 + \rho gh_2. \quad (3.4)$$

В состояниях 1 и 3 воздух имеет одну и ту же температуру (процесс изотермический). Поэтому можем применить закон Бойля-Мариотта.

$$(p_0 + \rho gh_1) \cdot V_1 = (p_0 + \rho gh_2) V_2. \quad (3.5)$$

Возведя обе части уравнения (3.5) в степень  $\gamma$ ,

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \left(\frac{p_0 + \rho gh_1}{p_0 + \rho gh_2}\right)^\gamma \quad (3.6)$$

и, пользуясь выражением (3.2) и (3.3), получим:

$$\frac{p_0 + \rho gh_1}{p_0} = \left(\frac{p_0 + \rho gh_1}{p_0 + \rho gh_2}\right)^\gamma. \quad (3.7)$$

Логарифмируя последнее выражение и решая полученное относительно  $\gamma$ , находим:

$$\gamma = \frac{\ln(p_0 + \rho gh_1) - \ln(p_0)}{\ln(p_0 + \rho gh_1) - \ln(p_0 + \rho gh_2)}. \quad (3.8)$$

Давления  $p_0$ ,  $p_0 + \rho gh_1$ ,  $p_0 + \rho gh_2$  мало отличаются друг от друга, поэтому разности логарифмов давлений можно считать пропорциональными разностям давлений и приближённо положить:

$$\gamma = \frac{(p_0 + \rho gh_1) - p_0}{(p_0 + \rho gh_1) - (p_0 + \rho gh_2)}; \quad \gamma = \frac{\rho gh_1}{\rho g(h_1 - h_2)} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (3.9)$$

Таким образом, экспериментальное определение  $C_p/C_v$  сводится к измерению разностей уровней жидкости в манометре  $h_1$  и  $h_2$ .

### 3.3. Порядок выполнения работы:

1. Включить установку тумблером «СЕТЬ». Нажать выпускающий клапан 4 для выравнивания давления. Включить тумблером «КОМПРЕССОР».

2. Повернуть ручку крана 3 в положение **НАПУСК** (9). Установить разность уровней воды в манометре 200-250 мм. После этого закрыть напускной клапан поворотом ручки крана 3 в положение **ЗАКРЫТ** (10).

3. Подождать 2-4 минуты до тех пор, пока температура воздуха в баллоне не станет равна температуре окружающей среды.

4. Определить разницу уровней воды  $h_1$  в коленях манометра.

5. Резко (**но не сильно!**) нажать и отпустить выпускной клапан 4 (баллон соединяется с атмосферой).

7. Через 3-4 минуты, после того как уровни воды в манометре стабилизируются, определить разницу уровней  $h_2$ .

8. Повторить п. 1-6 пять раз. Следить за тем, чтобы начальная разность уровней в манометре была постоянной (пункт 2).

9. Привести установку к исходному состоянию: отключить компрессор, сеть, отключить питание

10. Вычислить показатель адиабаты в каждом опыте по формуле

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$$

и определить его среднее арифметическое значение.

11. Записать результаты измерений и вычислений в табл. 3.2.

12. Сравнить результат эксперимента с табличными данными  $\gamma_{\text{возд}} = 1,40$ , оценить относительную погрешность измерений по формуле.

$$\varepsilon = \frac{\Delta\gamma}{\gamma_{\text{возд}}} \cdot 100\%.$$

**Таблица 3.2**

Результаты измерений и вычислений

№	$h_1$ , мм	$h_2$ , мм	$\gamma$
1			
2			
3			
4			
5			
Среднее значение			

#### **4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.19**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОЛОВА**

**Цель работы:** определение изменения энтропии при фазовом переходе первого рода на примере кристаллизации олова из расплава при его охлаждении. Определение удельной теплоты кристаллизации вещества из закона сохранения энергии.

**Оборудование:** экспериментальная установка для определения удельной теплоты кристаллизации и изменения энтропии при охлаждения жидкого олова.

#### 4.1. Теоретическое введение

Кристаллизация – процесс перехода вещества из жидкого состояния в твердое. Процесс кристаллизации связан с выделением количества теплоты, равного теплоте плавления. Для химически чистых веществ процесс кристаллизации протекает при постоянной температуре, равной температуре плавления.

Количество теплоты, которое необходимо отвести от единицы массы жидкости при температуре кристаллизации для перехода жидкости в твердое состояние, называется удельной теплотой кристаллизации  $\lambda_{кр}$ . Из первого начала термодинамики  $\delta Q = dU + \delta A$  следует

$$\lambda_{кр} = U_{Тв} - U_{жс} + p(V_{Тв} - V_{жс}), \quad (4.1)$$

где  $U_{Тв}$ ,  $U_{жс}$  – внутренняя энергия единицы массы в твердом и жидком состоянии;  $V_{Тв}$ ,  $V_{жс}$  – удельный объем твердой и жидкой фазы соответственно;  $p$  – давление в процессе кристаллизации.

Поскольку при переходе из жидкого в твердое состояние объем олова практически не меняется, имеем  $p(V_{Тв} - V_{жс}) \ll U_{Тв} - U_{жс}$ . В этом случае

$$\lambda_{кр} \approx U_{Тв} - U_{жс}. \quad (4.2)$$

Энтропия – функция состояния термодинамической системы. Изменение энтропии в равновесном процессе равно отношению количества теплоты, сообщенного системе, к термодинамической температуре системы:

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

Энтропия определяется с точностью до постоянной. Разность энтропий в двух состояниях при обратимом процессе равна

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}, \quad (4.3)$$

где  $\delta Q$  – элементарное количество теплоты, полученное или отданное при бесконечно малом изменении параметров термодинамической системы;  $T$  – температура теплоотдающего тела.

В процессе кристаллизации олово отдает тепло окружающей среде при  $T = \text{const}$ . При этом количество теплоты, отданное окружающей среде

$$Q = \lambda_{кр} M_0. \quad (4.4)$$

Здесь  $M_0$  – масса олова. Так как  $Q$  – количество теплоты, отданное окружающей среде, то  $Q < 0$ .

Из (4.3) и (4.4) следует, что

$$S_2 - S_1 = \frac{\lambda_{кр} M_0}{T_{кр}}$$

или

$$S_2 - S_1 = \frac{(U_{Тв} - U_{ж})}{T_{кр}} M_0. \quad (4.5)$$

В процессе кристаллизации происходит упорядочивание структуры вещества, внутренняя энергия вещества уменьшается, что приводит к убыванию энтропии системы.

Простейшей моделью охлаждения тела является охлаждение в среде с постоянной температурой  $T_{cp}$  (в термостате). Если процесс охлаждения происходит достаточно медленно, температуру произвольной точки тела в каждый момент времени можно считать одинаковой. Такой процесс охлаждения состоит из непрерывно следующих друг за другом равновесных состояний и, следовательно, является квазистатическим обратимым процессом.

Применим закон сохранения энергии к квазистатическому процессу охлаждения твердого олова после кристаллизации:

$$(c_0 M_0 + c_a M_a) dT + \alpha F (T - T_{cp}) d\tau = 0. \quad (4.6)$$

Здесь  $(c_0 M_0 + c_a M_a) dT < 0$  – количество теплоты, отданное телом среде при его охлаждении за время  $d\tau$ ;  $\alpha F (T - T_{cp}) d\tau > 0$  – количество теплоты, полученное окружающей средой через поверхность ампулы площадью  $F$  за время  $d\tau$ .

В (4.6)  $c_0, c_a$  – удельные теплоемкости олова и материалы ампулы,  $M_0, M_a$  – массы олова и ампулы;  $T$  – температура твердого олова;  $T_{cp}$  – температура окружающей среды;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности ампулы в окружающую среду. В дальнейшем считаем, что значение  $\alpha$  в течение всего опыта постоянно.

Решение этого уравнения имеет вид

$$\Theta = \Theta_{кр} e^{-m(\tau - \tau_2)}, \quad (4.7)$$

где  $\Theta = T - T_{cp}$ ;  $\Theta_{кр} = T_{кр} - T_{cp}$ ;  $m = \alpha F / (c_0 M_0 + c_a M_a)$ .

Коэффициент  $m$  называют темпом охлаждения. Он характеризует относительную скорость изменения температуры тела. Темп охлаждения можно определить из линейной зависимости, полученной логарифмированием функции (6.7):

$$\ln \Theta = \ln \Theta_{кр} - m(\tau - \tau_2), \quad (4.8)$$

откуда

$$m = \frac{\ln \Theta_1 - \ln \Theta_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (4.9)$$

Применяя теперь закон сохранения энергии к процессу кристаллизации олова, можно получить уравнение

$$\lambda_{кр} M_0 + \alpha F (T_{кр} - T_{ср}) \Delta \tau = 0. \quad (4.10)$$

Здесь  $Q = \lambda_{кр} M_0$  – количество теплоты, отданное оловом при его кристаллизации за время кристаллизации  $\Delta \tau$ .

Так как тепло отдано окружающей среде, то  $Q < 0$ . Второй член суммы в (6.10):  $\alpha F (T_{кр} - T_{ср}) \tau > 0$  – количество теплоты, полученное окружающей средой через поверхность ампулы за время кристаллизации.

Из соотношений (6.9), (6.10) и (6.5) находим окончательно

$$\lambda_{кр} = -(c_0 M_0 + c_a M_a) \frac{\tau}{M_0} m \Theta_{кр}, \quad (4.11)$$

$$S_2 - S_1 = -(c_0 M_0 + c_a M_a) \frac{\tau}{T_{кр}} m \Theta_{кр}. \quad (4.12)$$

Реальный процесс охлаждения сопровождается явлениями, вносящими погрешность в определение  $\lambda_{кр}$ . Главными источниками погрешности являются: отклонение процесса охлаждения от квази-статического; изменения температуры окружающей среды.

Эти процессы приводят к методической погрешности определения  $\lambda_{кр}$ , не превышающей  $\pm 10\%$ .

## 4.2. Описание экспериментальной установки

На рис.4.1 изображена принципиальная схема установки. В плавильную печь 1 с помощью подъемного устройства 2 опускается ампула с оловом 3, в которой размещена ХК-термопара 4, соединенная с первым каналом измерителя температуры 5 (2ТРМО). По окончании плавления всей массы олова ампула поднимается из печи и подъемное устройство стопорится винтом 7. Термопара 6, измеряющая температуру воздуха вблизи поднятой из печи ампулы, соединена с вторым каналом измерителя температуры. Для ускорения охлаждения ампулы используется вентилятор 8. На рис.4.2 показана лицевая панель установки.

## 4.3. Порядок выполнения работы

1. С помощью подъемного устройства 7 опустить ампулу с оловом 3 в электрическую печь 1.
2. Включить питание установки тумблером 11.
3. Включить питание печи тумблером 13 <<НАГРЕВ>>. Ручку регулятора температуры повернуть по часовой стрелке до ее среднего положения (желтая метка 14).
4. Тумблером 15 включить измеритель температуры.

5. Следить за показаниями первого канала измерителя температуры. При достижении точки плавления ( $t_{пл}=308^{\circ}\text{C}$ ) выключить питание электропечи.
6. При достижении температуры  $310^{\circ}\text{C}$  поднять ампулу из печи и зафиксировать ее крепежным винтом подъемного устройства.
7. Включить секундомер (или секундную стрелку любого таймера) и произвести измерения температуры олова при его охлаждении до полной кристаллизации и далее до  $t=100^{\circ}\text{C}$  через равные промежутки времени (15 сек.).

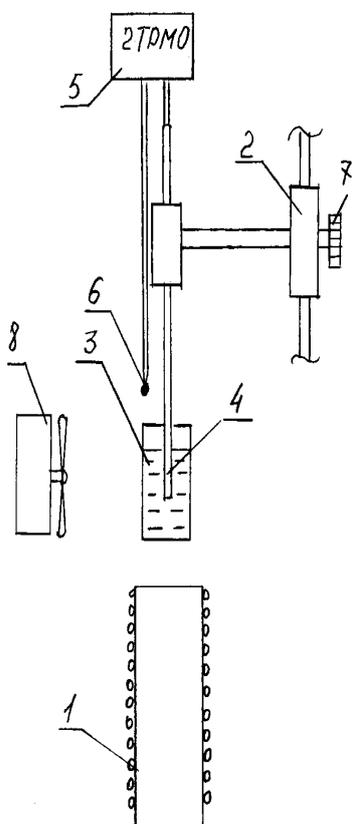


Рис. 4.1

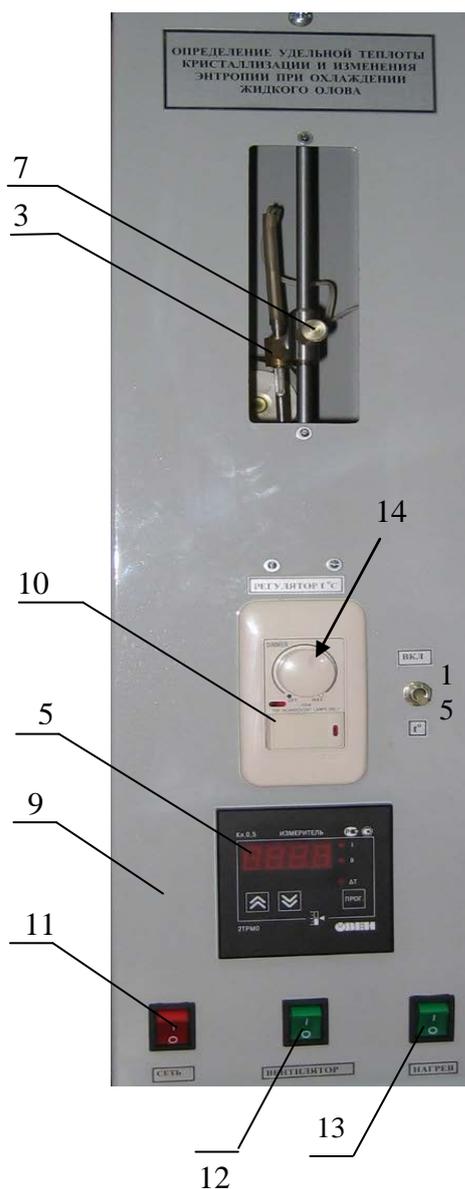


Рис. 4.2

#### 4.4. Обработка результатов измерений

1. Записать данные установки:

масса олова	$M_0=0,07$	(кг)
масса ампулы	$M_a=0,09$	(кг)
уд. теплоемкость олова	$c_0=230$	(Дж/кг К)
уд. теплоемкость ампулы	$c_a=380$	(Дж/кг К)

2. Построить график зависимости температуры охлаждения олова  $T$  от времени  $\tau$ . Определить время кристаллизации  $\tau$ .
3. Построить график зависимости  $\ln\theta$  от  $\tau$  для охлаждения твердого олова. Рассчитать по формуле (6.9) темп охлаждения твердого олова.
4. Рассчитать удельную теплоту кристаллизации олова по формуле (6.11).
5. Рассчитать изменение энтропии при кристаллизации олова по формуле (6.12).
6. Оценить относительную погрешность измерения удельной теплоты кристаллизации

$$E = \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda_0} \cdot 100\% ,$$

где  $\lambda_0=58$  кДж/кг – табличные значения удельной теплоты кристаллизации.

#### 5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.20 ИЗУЧЕНИЕ РЕАЛЬНОГО ГАЗА (Эффект Джоуля-Томсона)

**Цель работы:** определение изменения температуры воздуха в процессе адиабатного дросселирования. Расчет поправочных коэффициентов  $a$  и  $b$  для уравнения состояния реального газа.

**Оборудование:** экспериментальная установка для изучения реального газа.

##### 5.1. Теоретическое введение

Уравнение состояния реального газа должно учитывать конечный физический объем молекул и уменьшение давления в результате их взаимного притяжения. Из большого числа уравнений самым простым и вместе с тем дающим достаточно хорошие результаты оказалось уравнение Ван-дер-Ваальса, полученное путем внесения поправок в уравнение Менделеева-

Клапейрона. Поправка  $\frac{a}{V_m^2}$  учитывает внутреннее давление, обусловленное взаимным притяжением молекул. Поправка  $b$ , учитывающая собственный объем молекул, равна учетверенному объему всех молекул в одном моле газа:  $b = 4N_A V_l$ , где  $V_l = (\pi d^3)/6$  – объем одной молекулы,  $d$  – диаметр молекулы.

Для одного моля газа уравнение Ван-дер-Ваальса имеет вид:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT, \quad (5.1)$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  называются постоянными Ван-дер-Ваальса.

Взаимодействие между молекулами реального газа обуславливает их взаимную потенциальную энергию  $E_p$ , которая входит во внутреннюю энергию газа наряду с кинетической энергией движения молекул  $E_k$ :

$$U = E_k + E_p.$$

С учетом потенциальной энергией взаимодействия для внутренней энергии реального одного моля газа получается следующее выражение:

$$U_m = C_V T - \frac{a}{V_m}, \quad (5.2)$$

из которого следует, что внутренняя энергия растет как при повышении температуры, так и при увеличении объема.

Пропуская газ по теплоизолированной трубке с пористой перегородкой, Джоуль и Томсон обнаружили, что при расширении, которым сопровождается прохождение газа через перегородку, температура его несколько изменяется. В зависимости от начальных давления и температуры изменение температуры  $\Delta T$  имеет тот или иной знак и, в частности, может оказаться равным нулю. Это явление получило название эффекта Джоуля-Томсона. Если температура газа понижается ( $\Delta T < 0$ ), эффект считается положительным; если газ нагревается ( $\Delta T > 0$ ), эффект считается отрицательным.

Схема адиабатного течения воздуха через дроссель с пористой перегородкой приведена на рис. 5.1.

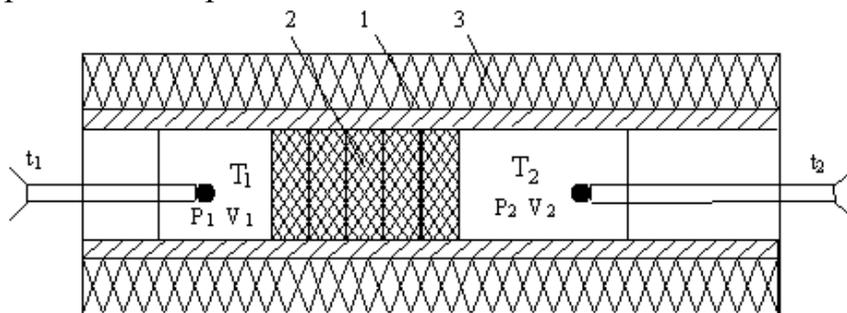


Рис. 5.1. Схематичное изображение дросселя.

Текстолитовая гильза (1), пористая перегородка (2), слой теплоизолятора (3),  $t_1$  и  $t_2$  – термопары для измерения температуры.

Проходя через перегородку за время  $\tau$ , некоторое количество газа совершит работу:

$$A = p_2V_2 - p_1V_1, \quad (5.3)$$

где  $p_1, V_1$  – давление и объём некоторого количества газа со стороны высокого давления до перетекания через перегородку;  $p_2, V_2$  – давление и объём того же количества газа со стороны низкого давления после его перетекания через перегородку.

Считая, что этот процесс перетекания газа через пористую перегородку квазистатическим (равновесным) адиабатным, применим первый закон термодинамики:

$$\begin{aligned} Q &= \Delta U + A = 0 \\ \Delta U &= -A, \end{aligned} \quad (5.4)$$

где  $\Delta U = U_1 - U_2$  – изменение внутренней энергии газа.

Подставляя (5.3) в (5.4), получим:

$$U_1 + p_1V_1 = U_2 + p_2V_2, \quad (5.5)$$

Таким образом, в условиях опыта Джоуля-Томсона сохраняется не внутренняя энергия газа, а являющаяся функцией состояния величина  $H = U + pV$ , называемая в термодинамике теплотосодержанием или энтальпией.

Учитывая, что внутренняя энергия  $\nu$  молей газа Ван-дер-Ваальса равна:

$$U = \nu C_V T - \frac{\nu^2 a}{V}, \quad (5.6)$$

Запишем соотношение (5.5) в виде:

$$\nu C_V T_1 - \frac{\nu^2 a}{V_1} + p_1 V_1 = \nu C_V T_2 - \frac{\nu^2 a}{V_2} + p_2 V_2, \quad (5.7)$$

Из соотношения (5.7) можно определить постоянную Ван-дер-Ваальса

$$a = \frac{1}{\nu} \left( \frac{V_1 V_2}{V_2 - V_1} \right) \left( C_V (T_2 - T_1) + \frac{1}{\nu} (p_2 V_2 - p_1 V_1) \right), \quad (5.8)$$

где  $\nu = \frac{\rho_2 V_2}{M}$  – число молей воздуха в объёме  $V_2$  или  $V_1$ ;  $V_1 = \frac{(p_2 V_2 T_1)}{p_1 T_2}$  –

объём того же количества молей воздуха до перетекания через пористую перегородку;  $\rho_2$  – плотность воздуха на выходе из дросселя при  $T_2$  и  $p_2$ .

Константы Ван-дер-Ваальса связаны с критическими параметрами газа:

$$V_{m_{кр}} = 3b; \quad p_{кр} = \frac{a}{27b^2}; \quad T_{кр} = \frac{8a}{27bR}.$$

## 5.2. Экспериментальная установка и методика измерения

На передней панели установки (рис 5.1) находится (1) – тумблер «Сеть», (2) – тумблер включения компрессора, (3) – кран регулировки давления, (4) – ротаметр, (5) – регулировочный вентиль ротаметра, (6) – манометр, (7) – измеритель температуры (7) типа 2ТРМО, подключённый к двум хромель-копелевым термопарам  $t_1$  и  $t_2$ , (8) – тумблер включения измерителя.

Принцип работы установки состоит в следующем (рис 5.2.): сжатый воздух с помощью компрессора (9) подается в дроссель (12) через сепаратор (10) и холодильник (11). Давление воздуха на входе в дроссель регулируется краном (3). Манометр (6) измеряет избыточное давление  $\Delta p$  по отношению к атмосферному, т.е. давление на входе в дроссель  $p_1 = p_{атм} + \Delta p$ , а на выходе  $p_2 = p_{атм}$ . Расход воздуха измеряется с помощью ротаметра (4).

## 5.3. Порядок выполнения работы

1. Включить установку тумблером «Сеть» 1 (рис. 5.1).
2. Включить измеритель температуры (7) (2ТРМО) тумблером (8). Нажатием сенсорной кнопки переключить прибор для измерения  $T_1$  или  $T_2$ . Если температура на входе и выходе дросселя одинаковая, то  $\Delta T_0 = T_1 - T_2 = 0$ .
3. Поворотом против часовой стрелки открыть кран (3).
4. Включить тумблером (2) компрессор и установить давление на входе в дроссель равное 0,2 – 0,3 МПа (по манометру (6)) краном (3) поворотом по часовой стрелке.
5. Через 1–2 минуты произвести отсчёт температуры  $T_1$  и  $T_2$ . Записать показания ротаметра.
6. Выключить компрессор.

**Внимание! Повторное включение компрессора производить через 2-3 минуты!**

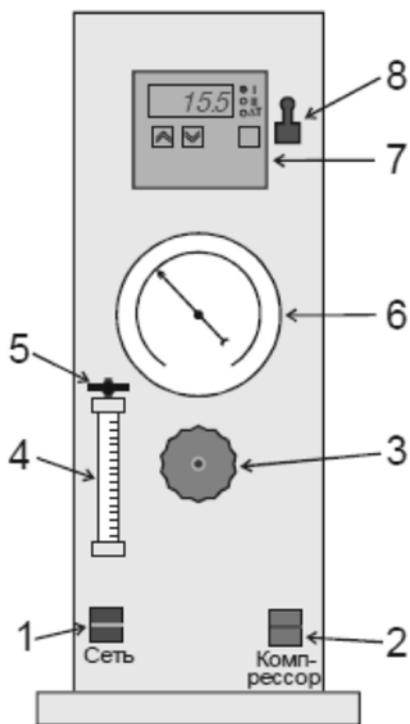


Рис. 5.1. Лицевая панель экспериментальной установки

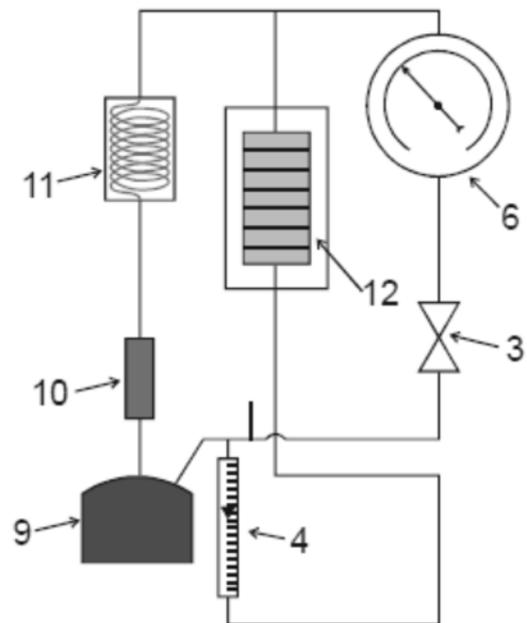


Рис. 5.2. Схема экспериментальной установки

7. Для повторения опыта записать значения  $T_1$  и  $T_2$  (они могут быть не равны) и определить исходную разность температур  $\Delta T_0 = T_2 - T_1$ .

8. Выключить компрессор и установить следующее значение давления на входе в дроссель ( $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ ).

9. Через 1 – 2 минуты произвести отсчет температуры  $T_1$  и  $T_2$  ( $\Delta T_2 = T_2 - T_1$ ). Истинная разность температур на входе и выходе из дросселя определяется с учётом поправки на исходную разность температур.

$$\Delta T_{\text{ист}} = \Delta T_2 - \Delta T_0$$

10. Пункты 6 – 9 повторить для следующего значения давления на входе в дроссель ( $p_2 = 0,7 \text{ МПа}$ ).

11. Определить объёмный расход воздуха  $G$  л/ч по градуировочному графику расхода воздуха от делений на шкале ротаметра (рис. 5.3) для каждого опыта. Выразить значения в единицах СИ ( $1 \text{ л/ч} = 2,78 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

12. Рассчитать объём воздуха до перетекания через пористую перегородку

$$V_1 = \frac{p_2 V_2 T_1}{p_1 T_2}, \text{ и после его перетекания через перегородку: } V_2 = G \text{ (за } t = 1 \text{ с).}$$

13. Вычислить число молей воздуха в объёме  $V_2$  по формуле:  $\nu = \frac{\rho V_2}{M}$ ,

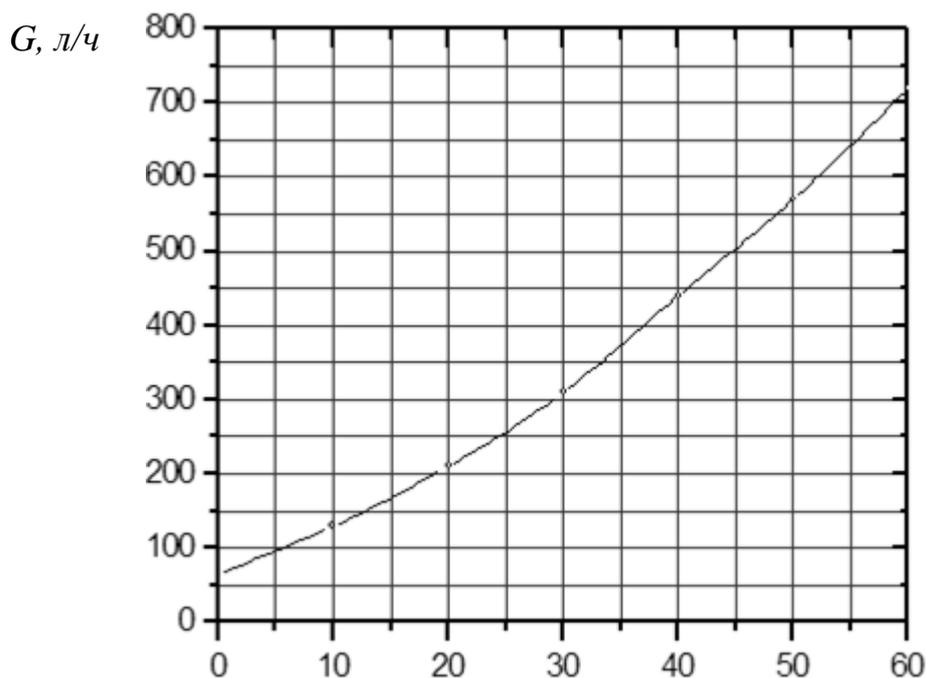
где  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха,  $M$  – молярная масса воздуха 29 г/моль.

14. По формуле 5.8 рассчитать постоянную Ван-дер-Ваальса.

12. Вторым поправочный коэффициент Ван-дер-Ваальса рассчитать по

формуле:  $b = \left( \frac{a}{27 p_{кр}} \right)^{\frac{1}{3}}$ , где давление воздуха в критической точке принять равным  $p_{кр} = 3,2$  МПа.

13. Внести се результаты измерения и вычислений в табл. 5.1



*Деления шкалы ротаметра*

Рис. 5.3. Градуировочная кривая ротаметра

**Таблица 5.1.**

Результаты измерений и вычислений

№	$T_1,$ К	$T_2,$ К	$\Delta T,$ К	$p_1,$ МПа	$p_2,$ МПа	$V_1,$ м <sup>3</sup>	$V_2,$ м <sup>3</sup>	$\nu,$ моль	$a$	$b$
1										
2										
3										
4										
5										
6										

## 6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МИНИМУМ

Л.р	Темы
№1.16 №1.20	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Уравнение Клайперона-Менделеева. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов.</li> <li>• Барометрическая формула. Распределение Больцмана.</li> <li>• Максвелловское распределение молекул по скоростям.</li> <li>• Эффективный диаметр и средняя длина свободного пробега молекул.</li> <li>• Явления переноса. Вязкость газов. Диффузия. Теплопроводность. Механизм вязкости газов. Зависимость вязкости газов от температуры. Формула Пуазейля и ее применение для определения вязкости газов.</li> <li>• Реальные газы. Силы межмолекулярного взаимодействия.</li> <li>• Поправки Ван-дер-Ваальса. Уравнение Ван-дер-Ваальса.</li> </ul>
№1.17 №1.18 №1.19	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Термодинамическая система и её параметры.</li> <li>• Число степеней свободы молекул. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы.</li> <li>• Внутренняя энергия и теплоёмкость идеального газа. Недостаточность классической теории теплоемкости.</li> <li>• Работа в термодинамике.</li> <li>• Первое начало термодинамики и её применение к изопротессам.</li> <li>• Уравнение адиабаты.</li> <li>• Фазы и фазовые переходы 1 и 2 рода.</li> <li>• Уравнение Клапейрона-Клаузиуса.</li> <li>• Диаграмма состояния. Тройная точка.</li> <li>• Энтропия системы. Закон возрастания энтропии.</li> <li>• Энтропия идеального газа.</li> </ul>

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. Курс физики [Текст]: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2016. - 542 с.
2. Детлаф, А.А. Курс физики [Текст]: учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. - М.: Высш. шк., 1989. - 608 с.
3. Савельев, И.В. Курс общей физики [Текст]: в 3-т.т. Т.1. Механика. Молекулярная физика. – СПб.: Изд-во «Лань».2018 г. С. 252 – 258.
4. Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк. 2015. - 608с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ВОЗДУХА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ.....	3
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.17. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЁМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ.....	9
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.18. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНЫХ ТЕПЛОЁМКОСТЕЙ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ И ПОСТОЯННОМ ОБЪЁМЕ .....	15
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.19. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОЛОВА.....	19
5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.20. ИЗУЧЕНИЕ РЕАЛЬНОГО ГАЗА (ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ-ТОМСОНА) .....	24
6. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МИНИМУМ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	31

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Физика»  
для студентов всех технических специальностей  
всех форм обучения

### **Составители:**

**Тураева** Татьяна Леонидовна  
**Москаленко** Александр Георгиевич  
**Татьянина** Елена Павловна  
**Дубовицкая** Татьяна Викторовна  
**Матовых** Николай Васильевич  
**Ремизова** Оксана Ивановна

В авторской редакции

Подписано к изданию 28.01.2021

Уч.-изд.л. 1,7 «С».

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

394026 Воронеж, Московский просп.,14