

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Горный институт  
Кафедра физики

Иван Сергеевич Елкин

**МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ К-402.2**

Методические материалы к лабораторным работам

Рекомендовано учебно-методической комиссией  
направления подготовки 20.03.01 Техносферная  
безопасность в качестве электронного издания  
для использования в учебном процессе

Кемерово 2024

Рецензенты: Дугинова Е.Б. – кандидат физ. мат. наук, доцент кафедры физики ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

**Елкин, И.С. Молекулярная физика и термодинамика. Лабораторный практикум К-402.2:** Методические материалы к лабораторным работам для обучающихся всех технических специальностей и направлений подготовки всех форм обучения / сост. И.С. Елкин; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово, 2024. – Текст: электронный.

В методических материалах представлен необходимый перечень лабораторных работ, предусмотренных образовательным стандартом и рабочими программами по разделу «Молекулярная физика и термодинамика» дисциплины «Физика». Он включает в себя описание лабораторных установок, порядок измерений и алгоритмы расчета определенных физических величин.

© Кузбасский государственный  
технический университет имени  
Т. Ф. Горбачева, 2024

© Елкин И.С.,  
составление, 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
I. Лабораторная работа № 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА.....	4
II. Лабораторная работа № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ .....	7
III. Лабораторная работа № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ .....	13
IV. Лабораторная работа № 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА .....	13
V. Лабораторная работа № 5 ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА .....	22
VI. Лабораторная работа № 6 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ МЕТОДОМ ПУАЗЕЙЛЯ .....	29
VII. Лабораторная работа № 7 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОЛОВА.....	32
VIII. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ.....	37
IX. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	37

## ВВЕДЕНИЕ

Комплекс К-402.2 представляет собой необходимый перечень лабораторных работ, предусмотренных образовательным стандартом и рабочими программами по разделу «Молекулярная физика и термодинамика» дисциплины «Физика». Он включает в себя описание лабораторных установок, порядок измерений и алгоритмы расчета определенных физических величин.

Учебными планами для различных специальностей и направлений предусмотрено на самостоятельное изучение дисциплины «Физика» в течение семестра от 60 до 120 часов. Из них на лабораторные занятия приходится 20–40 часов, или 2–4 часа на одну работу. В течение этого времени студент должен: прочитать соответствующие параграфы в учебниках; выучить основные формулы и законы; ознакомиться с установкой и порядком измерений и разобраться с алгоритмом расчета физических величин.

Для допуска к выполнению работы на установке студент должен: знать устройство установки; уметь определять цену деления измерительного прибора; знать последовательность измерений; уметь обрабатывать результаты измерений; оценивать погрешность; отвечать на контрольные вопросы, помещенные в конце методических указаний.

После всех расчетов в конце отчета студент записывает вывод по проделанной работе. В выводе представляются основные результаты по исследованию физических закономерностей и соответствия их теоретическим представлениям, указывается примененный способ, приводятся основные полученные результаты по измеренным физическим величинам, а также погрешности и соответствие их теоретическим представлениям.

## I. Лабораторная работа № 1

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

#### 1. Цель работы

**1.1.** Познакомиться с основными понятиями и законами гидродинамики.

**1.2.** Изучить движение тела в вязкой среде и определить коэффициент внутреннего трения жидкости методом Стокса.

#### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – § 2.4, 3.5, 10.7–10.9; [2] – § 31–33; [4] – § 96–97. Для выполнения работы студент должен: а) знать законы динамики поступательного движения; б) уметь пользоваться измерительными приборами; в) уметь рассчитывать погрешности при прямых и косвенных измерениях.

#### 3. Выполнение работы

##### 3.1. Методика проведения измерений и расчетов

Для исследований используется колба с жидкостью и шарик диаметром 1–2 мм.

Коэффициент внутреннего трения может быть определен из наблюдений за движением шарика в вязкой среде под действием силы тяжести. Рассмотрим силы, действующие на небольшой твердый шарик радиусом  $r$ , движущийся в вязкой жидкости (рис. 1.1).

Падая с некоторой высоты в воздухе, шарик приобретает скорость  $v$ , которая будет являться начальной скоростью его движения в жидкости. В жидкости на шарик действуют сила тяжести, выталкивающая сила (сила Архимеда), сила сопротивления среды, обусловленная вязкостью жидкости.

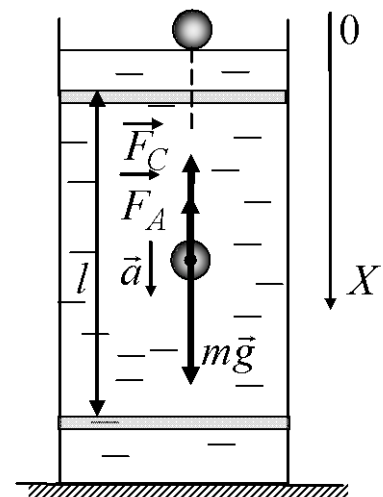


Рис. 1.1. Схема сил, действующих на движущийся в жидкости шарик

В начальный момент движения в жидкости шарик будет двигаться замедленно (убывающее по модулю ускорение направлено вертикально вверх). Уравнение движения шарика

$\sum_{i=1}^3 \vec{F}_i = m \vec{a}$ , а в проекции на ось  $X$  (см. рис. 1.1) имеет вид

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g - 6 \pi \eta r v = -ma, \quad (1.1)$$

где  $v$  – скорость движения шарика;  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения жидкости;  $\rho$  – плотность материала шарика;  $\rho_0$  – плотность жидкости;  $d$  – диаметр шарика.

Первое слагаемое в формуле (1.1) – это сила тяжести, второе – сила Архимеда, третье – сила внутреннего трения.

Сила сопротивления  $F_c = 6 \pi \eta r v$  уменьшается с убыванием скорости до тех пор, пока результирующая сила, а значит и ускорение, не обратятся в ноль:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_0 g - 6 \pi \eta r v_0 = 0, \quad (1.2)$$

где  $v_0$  – скорость установившегося равномерного движения.

Скорость  $v_0$  можно определить, зная расстояние  $\ell$  между метками и время  $t$  его равномерного движения:

$$v_0 = \frac{\ell}{t}. \quad (1.3)$$

Из уравнения (1.2) с учетом (1.3) находим коэффициент внутреннего трения:

$$\eta = \frac{(\rho - \rho_0) g d^2 t}{18 \ell}. \quad (1.4)$$

## 3.2. Измерение диаметра шарика

**3.2.1.** Измерьте диаметр шарика пять раз. Полученные результаты занесите в табл. 1.1.

**3.2.2.** Определите доверительный интервал нахождения истинного значения диаметра шарика. Результаты расчетов занесите в табл. 1.1.

**3.2.3.** Измерьте расстояние  $\ell$  между метками на цилиндре (по верхним краям меток). Определите абсолютную и относительную погрешность.

Таблица 1.1

*Результаты измерения диаметра шарика и расчета погрешностей*

№ п/п	$d_i$	$\langle d \rangle$	$\Delta d_i$	$\Delta d_i^2$	$\sum \Delta d_i^2$	$S_{\langle x \rangle}$	$t_{\alpha, n}$	$\Delta d_{\text{сл}}$	$\Delta d_{\text{пр}}$	$\Delta d$	$\varepsilon_d$	$\langle d \rangle \pm \Delta d$
	Мм	Мм	Мм	Мм <sup>2</sup>	Мм <sup>2</sup>	Мм		Мм	Мм	Мм	%	Мм
1							2,78					
...							при					
5							$\alpha=0,95$					

В табл. 1.1.  $S_{\langle x \rangle}$  – среднеквадратичное отклонение от среднего;  $t_{\alpha, n}$  – коэффициент Стьюдента при коэффициенте надежности  $\alpha$  и числе измерений  $n$ ;  $\Delta d_{\text{сл}}$ ,  $\Delta d_{\text{пр}}$ ,  $\Delta d$ ,  $\varepsilon_d$  – погрешности измерений: случайная, приборная, абсолютная и относительная соответственно.

### 3.3. Измерение времени движения

**3.3.1.** Опустите шарик в цилиндр через воронку. Когда шарик окажется на уровне края верхней метки, включите секундомер. Секундомер выключите, когда шарик достигнет верхнего края второй метки. Следите за тем, чтобы шарик не подходил близко к стенкам сосуда. Опыт повторите пять раз. Время движения  $t_i$  шарика занесите в таблицу, составленную самостоятельно аналогично табл. 1.1.

**3.3.2.** Определите доверительный интервал прямых измерений времени и относительную ошибку  $\varepsilon_t$ . Запишите результат измерений в виде  $t = \langle t \rangle \pm \Delta t$ .

### 3.4. Определение коэффициента внутреннего трения

**3.4.1.** По средним значениям диаметра шарика и времени движения вычислите коэффициент внутреннего трения по формуле (1.4). Данные измерений и вычислений занесите в табл. 1.2.

**3.4.2.** Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности результата косвенных измерений коэффициента внутреннего трения по формулам:

$$\varepsilon_{\eta} = \sqrt{4\varepsilon_d^2 + \varepsilon_t^2 + \varepsilon_{\ell}^2},$$

где  $\varepsilon_{\ell} = \frac{\Delta \ell}{\ell}$ ;  $\Delta \ell$  – абсолютная погрешность, которая равна половине цены деления шкалы линейки, с помощью которой измеряется расстояние, пройденное шариком при установившемся движении;

$$\Delta \eta = \langle \eta \rangle \varepsilon_{\eta}.$$

Результат вычислений запишите в виде

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

Результаты вычислений занести в табл. 1.2.

*Таблица 1.2*

*Результаты измерения коэффициента внутреннего трения*

$\langle d \rangle$	$\ell$	$\langle t \rangle$	$\rho$	$\rho_0$	$\langle \eta \rangle$	$\Delta \eta$	$\varepsilon_{\eta}$
М	м	с	кг/м <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	Па · с	Па · с	%

**3.5.** Сделайте выводы о характере движения шарика в вязкой среде и применяемых законах.

## **II. Лабораторная работа № 2**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ**

#### **1. Цель работы**

**1.1.** Изучение явления теплопроводности газов, явлений переноса в газах.

**1.2.** Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности воздуха.



## 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – § 10.7–10.9; [2] – § 46, 48; [4] – § 52, 53. Для выполнения работы студент должен: а) знать закон Фурье; физический смысл коэффициентов теплопроводности, диффузии и внутреннего трения; соотношения между характеристиками газов на основе молекулярно-кинетической теории; порядок измерений и расчета погрешностей; б) уметь пользоваться измерительными приборами.

## 3. Выполнение работы

### 3.1. Описание лабораторной установки

Нагреваемая вольфрамовая нить 5 находится в цилиндрическом баллоне 1 (рис. 2.1) с двойными стенками, между которыми залита вода 2. Баллон 6 с нитью укреплен в модуле II (рис. 2.2) лабораторного стенда. На панели этого модуля расположены электрические разъемы: для соединения его с источником питания 3 (см. модули I и II рисунка) и вольтметром 4.

Напряжение на нити измеряется цифровым вольтметром 4 (модуль I). Переключатель 5 позволяет в положении  $R_0$  измерять милливольтметром (кнопка «200mV» вольтметра 4) падение напряжения  $U_0$  на образцовом сопротивлении ( $R_{ш}$ ) и в положении  $R_n$  – падение напряжения  $U_n$  на нити (кнопка «20V» вольтметра 4). Напряжение на блоке питания изменяется регулятором 1, контролируется вольтметром 2 модуля I.

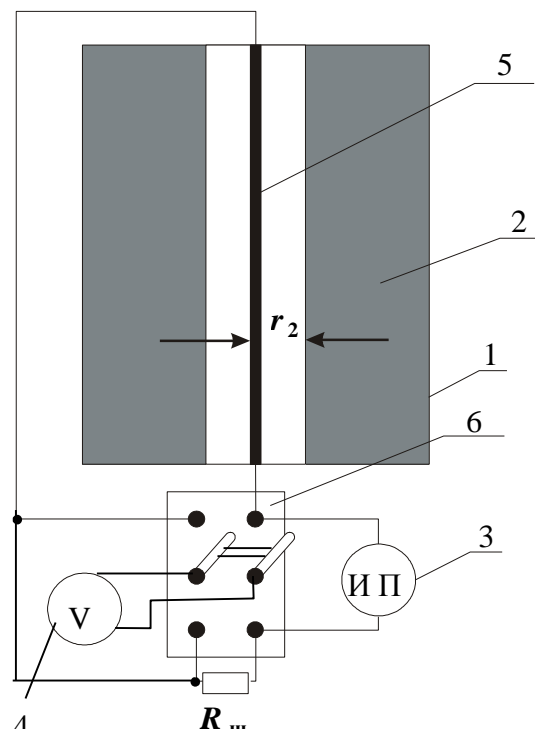


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки: 1 – цилиндрический баллон с двойными стенками; 2 – вода в баллоне; 3 – источник питания; 4 – вольтметр; 5 – вольфрамовая нить; 6 – двухполюсный переключатель

### 3.2. Методика измерений и расчета

Пусть в некоторой среде, где существует градиент температуры ( $\text{grad}T$ ), устранена конвекция, потери на лучеиспускание пренебрежимо малы, объем рассматриваемой системы не меняется. При этих условиях передача тепла будет осуществляться исключительно путем теплообмена, т. е. за счет теплопроводности.

Если относительное изменение температуры на расстоянии средней длины свободного пробега  $\lambda$  мало, то выполняется закон Фурье:

$$\vec{q} = -\chi \text{grad } T, \quad (2.1)$$

где  $\chi$  – коэффициент теплопроводности;  $\vec{q}$  – удельный тепловой поток.

Если совместить ось  $Z$  с нитью, то, очевидно, температура будет зависеть только от расстояния  $r$  от нити до точки наблюдения  $T = T(r)$  (рис. 2.3) и не будет зависеть от полярного угла  $\varphi$  и координаты  $Z$ .

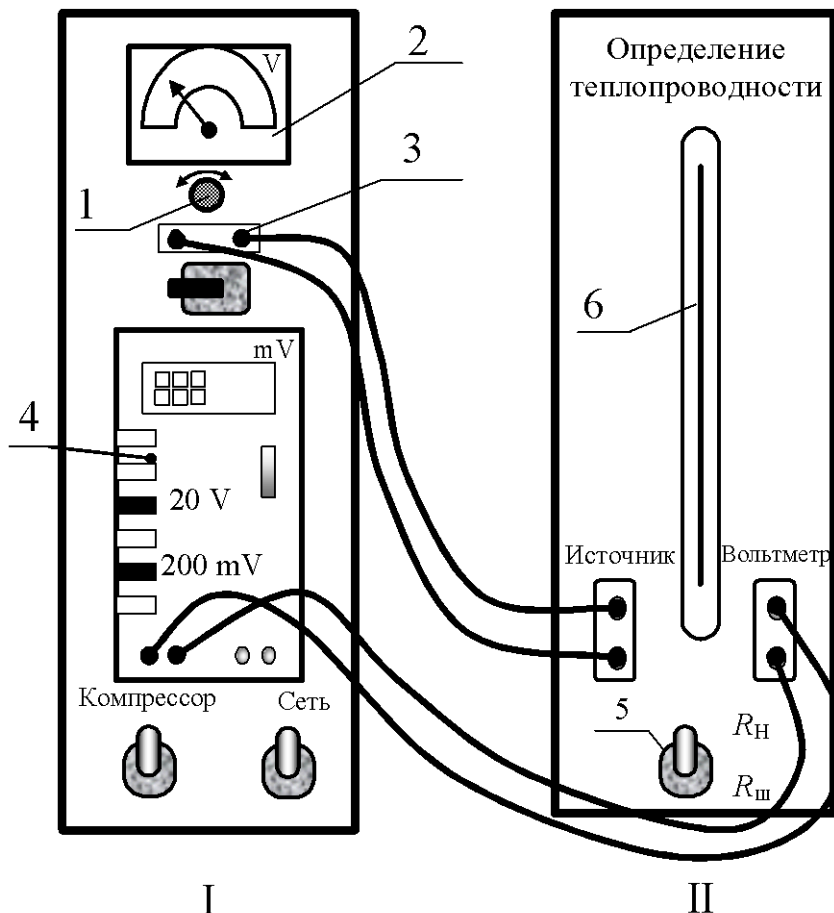


Рис. 2.2. Вид лабораторного комплекса

Для такого осесимметричного поля температур вектор плотности теплового потока равен

$$\vec{q} = -\chi \frac{dT}{dr} \vec{e}_r, \quad (2.2)$$

где  $\vec{e}_r$  – единичный вектор, орт.

С ростом  $r$  температура  $T$  убывает, поэтому в правой части (2.2) стоит знак «–». Вся энергия  $\delta Q$ , подводимая к нити за время  $dt$  при неизменной температуре нити  $T_n$ , будет переноситься через боковую поверхность воображаемого цилиндра, коаксиального с нагретой нитью. Площадь боковой поверхности

$$S_1 = 2\pi rL,$$

где  $r_1 \leq r \leq r_2$ ;  $r$  – радиус рассматриваемого цилиндра;  $L$  – длина нити;  $r_1$  – радиус нити.

С учетом этого из равенств (2.1) и (2.2) следует, что

$$-\chi \frac{dT}{dr} = \frac{\delta Q}{2\pi rL dt}, \quad (2.3)$$

где  $\frac{\delta Q}{dt} = P$  – мощность теплового потока через поверхность рассматриваемого цилиндра.

Подводимая мощность  $P$  определяется напряжением на нити  $U_n$  и током  $I_n$  и равна

$$P = I_n U_n. \quad (2.4)$$

Полагая  $\frac{\delta Q}{dt} \equiv P$ , из равенства (2.3) получим

$$P \frac{dr}{r} = -2\pi L \chi dT. \quad (2.5)$$

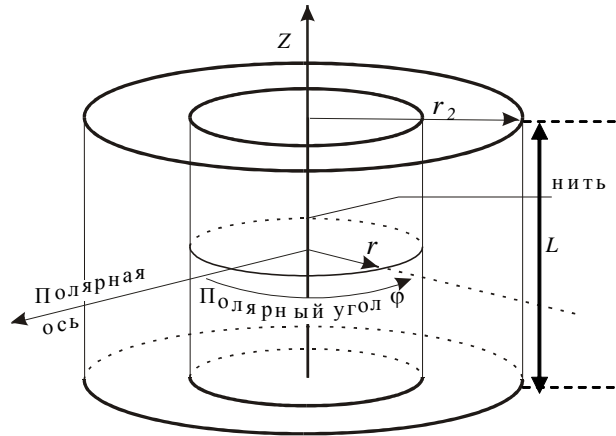


Рис. 2.3. Схема расчета теплового потока от нити в полярной системе координат

Интегрируем равенство (2.5) при постоянных мощности  $P$ ,  $\chi$  и при граничных условиях:

$$\begin{cases} \text{при } r = r_1, & T = T_{\text{н}}; \\ \text{при } r = r_2, & T = T_{\text{с}}, \end{cases}$$

где  $r_1$  – радиус нити;  $r_2$  – радиус внутренней цилиндрической поверхности баллона с водой;  $T_{\text{н}}$  – температура нити;  $T_{\text{с}}$  – температура цилиндрического сосуда с водой (в условиях опыта считается постоянной, равной температуре в лаборатории):

$$P \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi L \chi \int_{T_{\text{н}}}^{T_{\text{с}}} dT,$$

откуда

$$P \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\pi L \chi (T_{\text{н}} - T_{\text{с}}). \quad (2.6)$$

При изменении напряжения на нити изменяются мощность  $P$ , температура нити  $T_{\text{н}}$  и коэффициент теплопроводности  $\chi$ , т. е. из выражения (2.6) можно найти коэффициент теплопроводности при данной температуре нити  $T_{\text{н}}$ :

$$\chi(T_{\text{н}}) = \frac{P \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L (T_{\text{н}} - T_{\text{с}})}, \quad (2.7)$$

а также исследовать зависимость коэффициента теплопроводности от температуры нити.

Для данной установки длина нити  $L = 0,42$  м, радиус нити  $r_1 = 0,05$  мм, радиус внутренней поверхности баллона с водой  $r_2 = 3$  мм, поэтому

$$\frac{\ln r_2 / r_1}{2\pi L} = C = 1,55 \frac{1}{\text{м}},$$

и выражение (2.7) принимает вид

$$\chi(T_{\text{н}}) = C \cdot \frac{P}{T_{\text{н}} - T_{\text{с}}}. \quad (2.8)$$

Температуру нити  $T_{\text{н}}$  найдем из формулы зависимости сопротивления нити  $R_{\text{н}}$  от температуры:

так как 
$$R_{\text{н}} = R_{\text{он}} (1 + \alpha t_{\text{н}}), \quad (2.9)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления, то

$$t_{\text{H}} = \frac{R_{\text{H}} - R_{\text{OH}}}{\alpha R_{\text{OH}}} . \quad (2.10)$$

Очевидно, что

$$T_{\text{H}} - T_{\text{C}} = t_{\text{H}} - t_{\text{C}} = \frac{R_{\text{H}} - R_{\text{OH}}}{\alpha R_{\text{OH}}} - t_{\text{C}}, \quad (2.11)$$

где  $t_c$  – температура цилиндрического сосуда (по шкале Цельсия).

### 3.3. Подготовка лабораторного стенда к работе

**3.3.1.** Убедитесь, что все приборы выключены, поверните регулятор 1 напряжения блока питания против часовой стрелки до упора.

**3.3.2.** Соедините проводами источник питания 3 с нитью (см. рис. 2.2), подключите вольтметр 4 согласно схеме.

**3.3.3.** На цифровом вольтметре включите кнопку переключателя пределов измерений, соответствующую напряжению 20 В.

**3.3.4.** Включите стенд, включите цифровой вольтметр на модуле I.

### 3.4. Измерение коэффициента теплопроводности

**3.4.1.** Переключатель 6 поставьте в положение  $R_H$ . Регулятором 1 задайте напряжение на нити  $U_H \approx 2$  В, запишите значение  $U_H$  (по вольтметру 2) в табл. 2.1.

$$R_{\text{III}} = 0,1 \text{ O}_M; \quad R_{\text{OH}} = 5,2 \text{ O}_M; \quad \alpha = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Таблица 2.1

### Результаты измерений основных характеристик воздуха

[illegible]

**3.4.2.** Переведите переключатель 5 в положение  $R_{ш}$ , включите кнопку переключателя пределов измерений, соответствующую напряжению 200 мВ. Запишите напряжение  $U_0$  на образцовом сопротивлении, после этого переключатель пределов измерений верните в положение, соответствующее напряжению 20 В.

**3.4.3.** Повторите измерения согласно п. 3.4.1, 3.4.2 для напряжений на нити  $U_n = 3; 4; 5; 6$  В.

**3.4.4.** Уберите напряжение на нити, выключите вольтметр и стенд.

**3.4.5.** Для каждого из измеренных  $U_n$  и  $U_0$  найдите коэффициент теплопроводности  $\chi$ . Для этого значение  $I_n$  определите по формуле  $I_n = \frac{U_0}{R_{ш}}$ , а сопротивление нити —  $R_n = \frac{U_n}{I_n}$ , тогда по формуле (2.4) определите  $P$ , по формуле (2.10) —  $t_n$ , по формуле (2.11) разность температур —  $T_n - T_c$ . Зная  $T_n$ , найдите  $\chi$  по формуле (2.8). Рассчитанные значения занесите в табл. 2.1.

**3.4.6.** Постройте график зависимости  $\chi = f(T_n)$ .

**3.4.7.** Зная связь между коэффициентами теплопроводности  $\chi$  и динамической вязкости  $\eta$ , найдите  $\eta$  ( $M = 0,029$  кг/моль).

**3.4.8.** Найдите плотность воздуха  $\rho$  и коэффициент диффузии  $D$  при условиях эксперимента.

**3.5.** Сравните полученные результаты вычислений коэффициентов  $D$ ,  $\eta$ ,  $\chi$  с табличными значениями, взятыми из справочной литературы. Сделайте вывод о практичности данного метода определения коэффициентов переноса.

### III. Лабораторная работа № 3

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

##### 1. Цель работы

**1.1.** Изучить метод определения удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении способом протока воздуха через капилляр.

**1.2.** Изучить способы измерения разности температур и расхода воздуха.

## **2. Подготовка к работе**

Прочитать в учебниках следующие параграфы [1] – § 10.7, 10.11, 10.12; [2] – § 53; [4] – § 18, 89. Для выполнения работы студент должен: а) знать определение удельной теплоемкости при  $p = \text{const}$  и  $V = \text{const}$ ; формулу Пуазейля для расчета количества воздуха, прошедшего через капилляр; понятие термоЭДС и коэффициента внутреннего трения; б) уметь пользоваться измерительными приборами.

## **3. Выполнение работы**

### **3.1. Описание лабораторной установки**

Установка для определения удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении изображена на рис. 3.1.

Установка состоит из двух частей: I – измерительный модуль; II – модуль стенда.

На измерительном модуле I располагаются: переключатели «сеть» и «компрессор»; 1 – регулятор напряжения; 2 – клеммы источника питания; 3 – мультиметр.

На модуле стенда II располагаются: 5 – жидкостный манометр; 7 – клапан напуска; клеммы, подключаемые к источнику питания и мультиметру.

Модули соединяются гибким шлангом и четырьмя проводами.

Принципиальная схема установки представлена на рис. 3.2. Воздух прокачивается компрессором через трубку 1, размещенную в теплоизолирующей колбе 2 (сосуд Дьюара).

Измерение расхода воздуха производится по перепаду давлений на капилляре, который вместе с трубкой образует единую проточную магистраль. Протекая через трубку, воздух нагревается электрической спиралью 3. Разность температур на входе и выходе трубки измеряется дифференциальной термопарой 4. ЭДС термопары  $\xi$  измеряется вольтметром 5, подключенным к ней через разъем 6. Электрический нагреватель 3 питается постоянным током от блока питания (УБП), подключенного к нагревателю через разъемы 7.

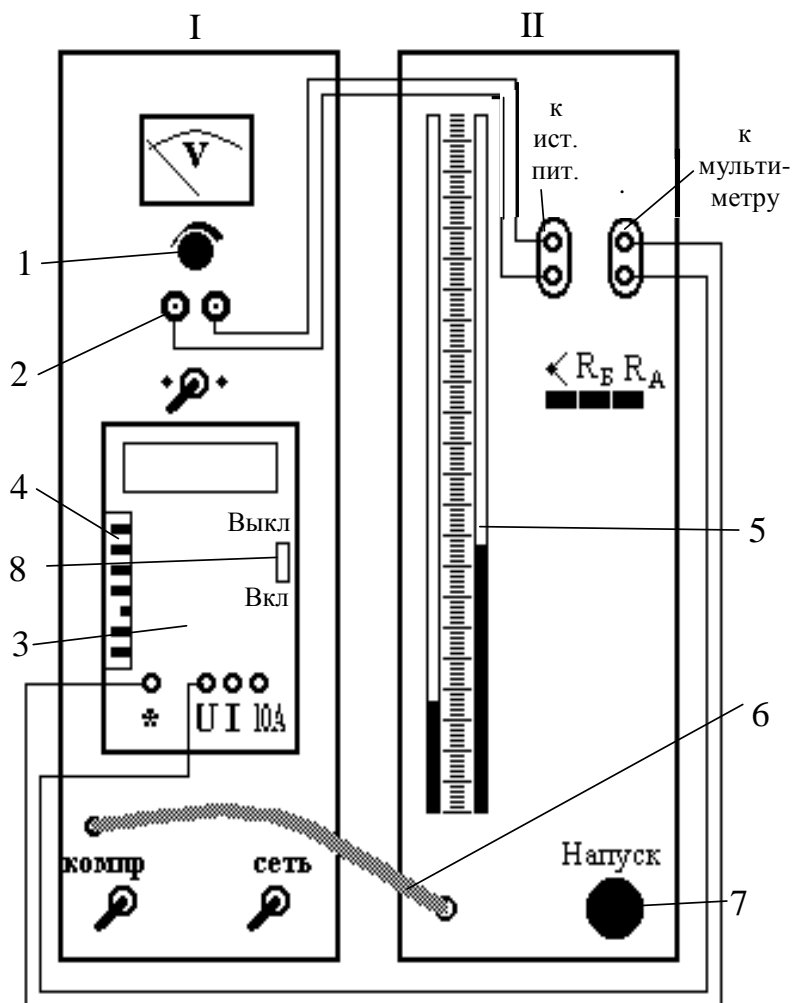


Рис. 3.1. Лабораторный комплекс:

- I – измерительный модуль; II – модуль стенда;  
 1 – регулятор напряжения; 2 – клеммы источника питания;  
 3 – мультиметр; 4 – переключатель пределов мультиметра;  
 5 – манометр; 6 – гибкий шланг; 7 – клапан напуска;  
 8 – движок выключателя мультиметра

Напряжение на нагревателе  $U_H$  измеряется вольтметром. Сила тока  $I_H$  в нагревателе определяется по измеренному вольтметром напряжению  $U_R$  на образцовом сопротивлении  $R_{обр}$ :

$$I_H = \frac{U_R}{R_{обр}}. \quad (3.1)$$



### 3.2. Методика измерений и расчета

Определяем количество тепла, отдаваемое нагревателем воздуху в единицу времени  $\Delta Q / \Delta t = I_{\text{н}} U_{\text{н}}$ , массовый расход воздуха через трубку Z (масса воздуха за единицу времени, кг/с), разность температур воздуха на входе и выходе сосуда Дьюара  $\Delta T$ .

Величина удельной теплоемкости при постоянном давлении определяется по формуле

$$c_{\text{тр}} = \frac{I_{\text{н}} U_{\text{н}}}{\Delta T Z}. \quad (3.2)$$

Надежность измерения определяется в основном качеством калориметра. Необходимо, чтобы количество тепла, затрачиваемое на нагревание исследуемого тела, было существенно больше тепла, расходуемого на нагревание калориметра и на потери, связанные с утечкой тепла из установки. При измерении теплоемкости воздуха эти требования выполнить очень трудно, так как масса воздуха, заключенного в калориметре, и, следовательно, количество тепла, идущего на его нагревание, очень малы. Чтобы увеличить количество воздуха при неизменных размерах установки, в данной работе воздух продувается сквозь калориметр, внутри которого установлен нагреватель. Измеряются количество тепла, отдаваемое нагревателем, масса протекающего воздуха и изменение его температуры.

Массовый расход воздуха  $Z = \frac{m}{t}$  можно определить используя формулу Пуазейля

$$Z = \frac{\pi r_0^4 \rho_{\text{возд}} \Delta p}{8 \ell \eta}, \quad (3.3)$$

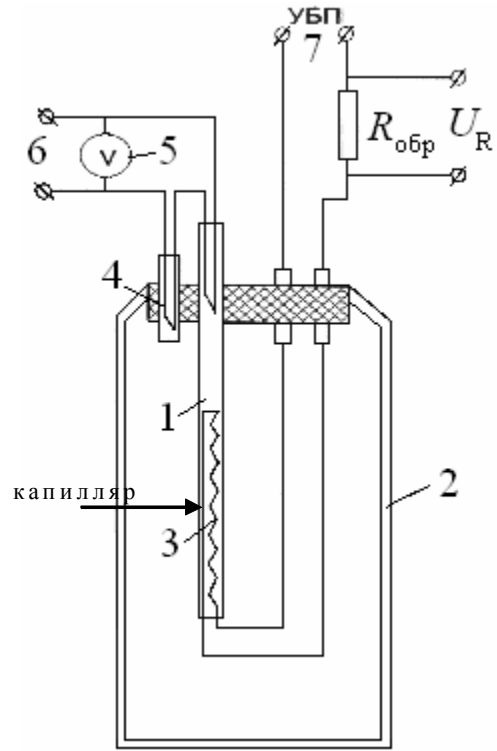


Рис. 3.2. Схема установки

где  $r_0$  – радиус капилляра;  $\rho_{\text{возд}}$  – плотность воздуха;  $\ell$  – длина капиллярной трубки;  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения воздуха.

### 3.3. Порядок выполнения работы

**3.3.1.** Запишите данные лабораторной установки в табл. 3.1.

**3.3.2.** Соедините проводами клеммы источника питания на измерительном модуле и клеммы «Ист. пит.» на модуле стенда. Соедините проводами клеммы «Вольт.» модуля стенда и клеммы «\*» и « $U$ » мультиметра измерительного стенда. Выведите регулятор напряжения источника питания на измерительном стенде в крайнее положение, вращая ручку против часовой стрелки. На переключателе пределов мультиметра (левый вертикальный ряд кнопок) установите предел напряжения 20 В, для этого нажмите кнопку «20V». Все остальные кнопки переключателя пределов должны быть отжаты.

Таблица 3.1

*Постоянные величины для расчета удельной теплоемкости при постоянном давлении*

$\ell$	м	0,16	$\rho_{\text{возд}}$	кг/м <sup>3</sup>	1,29
$k$	В/К	$5,43 \cdot 10^{-5}$	$\rho_{\text{ж}}$	кг/м <sup>3</sup>	$10^3$
$\eta$	Па·с	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$r_0$	м	$2 \cdot 10^{-3}$
$R_{\text{обр}}$	Ом	0,1	$g$	м/с <sup>2</sup>	9,81

**3.3.2.** Соедините проводами клеммы источника питания на измерительном модуле и клеммы «Ист. пит.» на модуле стенда. Соедините проводами клеммы «Вольт.» модуля стенда и клеммы «\*» и « $U$ » мультиметра измерительного стенда. Выведите регулятор напряжения источника питания на измерительном стенде в крайнее положение, вращая ручку против часовой стрелки. На переключателе пределов мультиметра (левый вертикальный ряд кнопок) установите предел напряжения 20 В, для этого нажмите кнопку «20V». Все остальные кнопки переключателя пределов должны быть отжаты.

**3.3.3.** Включите электропитание стенда, компрессор, вольтметр. Регулятором напряжений установите значение напряжения  $U_{\text{н}} \approx 4 \text{ В}$ .

**3.3.4.** Установите постоянный перепад давлений  $\Delta p$ , вращая винт 7 (рис. 3.1) клапана «Напуск» ( $\Delta h = 30 \div 60$  мм). Произведите отсчет разности уровней жидкости  $\Delta h$  в U-образном манометре и определите перепад давлений  $\Delta p$  на концах капилляра по формуле  $\Delta p = \rho_{\text{ж}} g \Delta h$ , где  $\rho_{\text{ж}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды,  $\Delta h$  – разность уровней жидкости в коленах манометра, м. Результаты измерений занесите в табл. 3.2.

**3.3.5.** Нажмите кнопку « $R_A$ » на модуле стенда и с индикатора мультиметра произведите отсчет напряжения  $U_{\text{н}}$  на нагревателе, при этом величина этого напряжения устанавливается поворотом ручки регулятора напряжения источника питания по часовой стрелке. Результаты измерений занесите в табл. 3.2.

**3.3.6.** Нажмите кнопку « $R_B$ » на модуле стенда и с индикатора мультиметра произведите отсчет напряжения  $U_R$  на образцовом сопротивлении, для этого переключите предел измерения мультиметра на 200 мВ (нажать кнопку «200mV» на переключателе пределов мультиметра).

**3.3.7.** Переключателем « $\rangle$ » подключите вольтметр к термopаре и следите за его показаниями до тех пор, пока они не будут постоянными. Произведите отсчет термоЭДС термopары по вольтметру  $\xi$ , пропорциональную разности температур нагретого воздуха:  $\xi = k \Delta T$ , где  $k = 5,43 \cdot 10^{-5} \text{ В / К}$ . Определите разность температур  $\Delta T$  на концах трубки по измеренной термоЭДС  $\xi$ .

**3.3.8.** Рассчитайте  $I_{\text{н}}$  по формуле (3.1). Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 3.2.

**3.3.9.** Определите расход  $Z$  воздуха через капилляр по формуле (3.3), используя данные табл. 3.1.

**3.3.10.** Рассчитайте экспериментальную удельную теплоемкость  $c_{\text{тр}}$  по формуле (3.2). Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 3.2.

**3.3.11.** Пункты 3.3.5–3.3.10 повторите для следующих четырех-шести значений напряжения  $U_{\text{н}}$  на нагревателе, изменяя напряжение от 4 до 12 В.

Таблица 3.2

## Результаты измерений и расчетов величин

№ п/п	$U_H$ В	$U_R$ В	$\xi$ В	$\Delta h$ м	$\Delta p$ Па	$\Delta T$ К	$I_H$ А	$Z$ кг/с	$c_{mp}$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
1	4								
...	...								
7	12								

**3.3.12.** Результаты измерений и вычислений занесите в табл. 3.2.

**3.3.13.** Рассчитайте теоретическую удельную теплоемкость для воздуха по формуле  $c_{mp} = \left( \frac{i + 2}{2} \right) \frac{R}{M}$ , где  $i = 5$ ,  $R = 8,31$  Дж/(К·моль),  $M = 0,029$  кг/моль. Сравните рассчитанное значение  $c_{mp}$  со средней удельной теплоемкостью при постоянном давлении, полученной в результате проведения опытов.

**3.4.** Сделайте вывод, в котором укажите особенности метода измерений и расчета и оцените погрешность измерений.

#### IV. Лабораторная работа № 4

##### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА МЕТОДОМ КЛЕМАНА-ДЕЗОРМА

###### 1. Цель работы

**1.1.** Экспериментально проверить основные термодинамические законы для идеального газа.

**1.2.** Определить коэффициент Пуассона для воздуха и сравнить его с расчетным значением.

###### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – § 9.5–9.6; [2] – § 50, 53–55; [4] – § 21, 22. Для выполнения работы студент должен: а) знать основные уравнения термодинамических процессов; первое начало термодинамики; понятие коэффициента Пуассона; методы расчета теплоты, работы и изменения внут-

ренной энергии; б) уметь пользоваться измерительными приборами.

### 3. Выполнение работы

#### 3.1. Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка для определения коэффициента Пуассона  $\gamma$  состоит из двух модулей (рис. 4.1). В модуле I находится компрессор, соединенный трубкой 3 с баллоном, находящимся в модуле II.

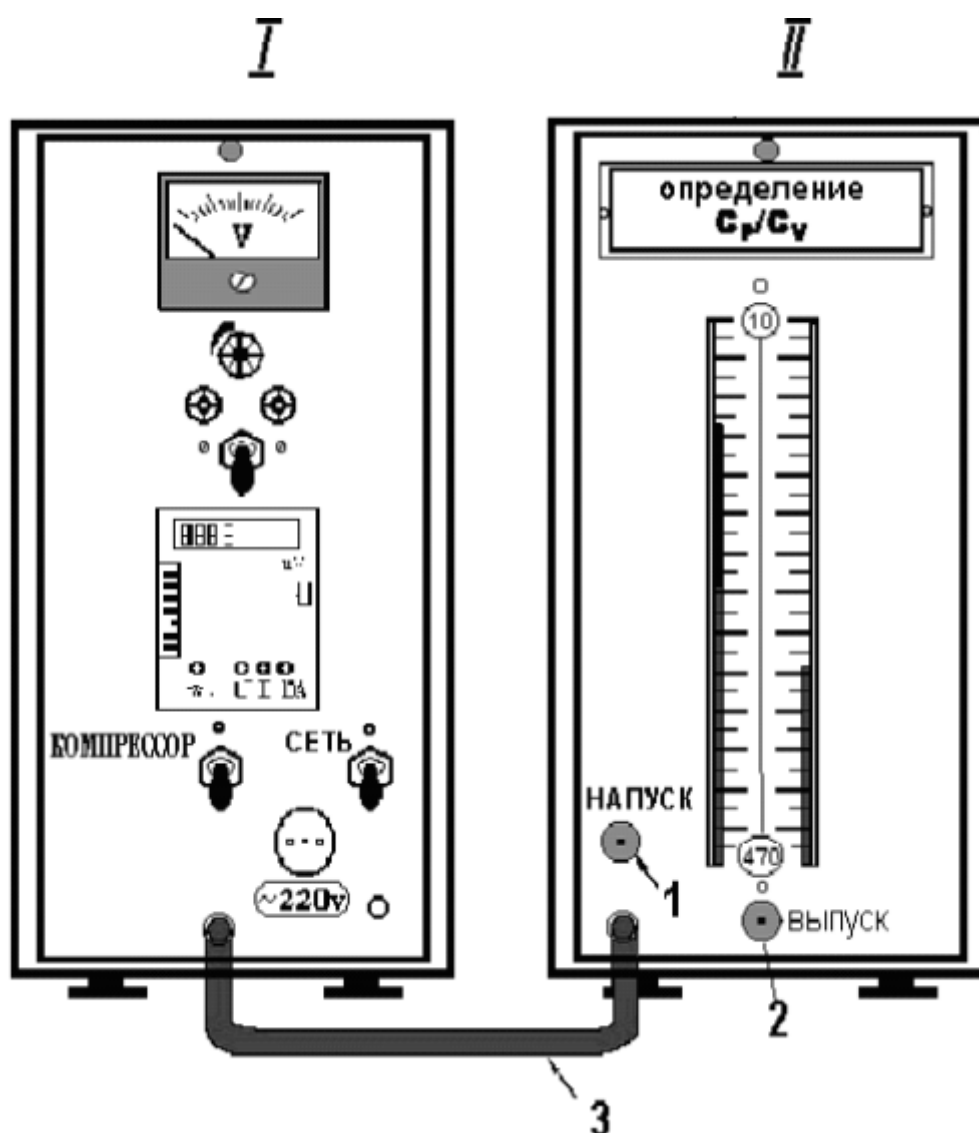


Рис. 4.1. Экспериментальная установка для определения отношения  $C_p / C_v$

Для накачивания воздуха в баллон нужно включить тумблер «сеть» и, включив тумблер «компрессор», нажать на клапан «напуск». Клапан 2 «выпуск» позволяет соединять баллон с ат-

мосферой. По  $U$ -образному жидкостному манометру, расположенному в модуле II, определяют дополнительное к атмосферному давление в баллоне по разности уровней жидкости в коленях манометра:  $\Delta p = \rho_{\text{ж}} g h$ , где  $h$  – разность уровней жидкости в коленях манометра;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости,  $\rho_{\text{ж}} = 10^3 \text{ кг / м}^3$ .

### 3.2. Методика измерений и расчета

Метод Клемана-Дезорма состоит в определении  $\gamma$  через измерение разности уровней в манометре  $h_1$  и  $h_2$ .

В баллон А с помощью насоса накачивается воздух до разности уровней в манометре примерно в 200–300 делений. Температура воздуха в баллоне в результате сжатия несколько повышается. После прекращения накачивания она будет понижаться до комнатной температуры  $T_0$ . Процесс понижения температуры происходит при постоянном объеме, сопровождаясь понижением давления и, следовательно, понижением разности уровней жидкости в манометре. После установления температурного равновесия воздух в сосуде будет характеризоваться параметрами  $p_1$  и  $T_0$ , причем  $p_1 = p_0 + \rho_{\text{ж}} g h_1$ , где  $p_0$  – атмосферное давление;  $h_1$  – установившаяся разность уровней жидкости в манометре;  $\rho_{\text{ж}} g h_1$  – гидростатическое давление столба жидкости в манометре высотой  $h_1$ , которое уравнивает добавочное давление в баллоне А;  $T_0$  – комнатная температура. Затем, открыв (на малое время) клапан 2, выпускают часть воздуха из баллона, после чего закрывают клапан 2. В результате этой операции происходит адиабатическое расширение газа и температура воздуха в бал-

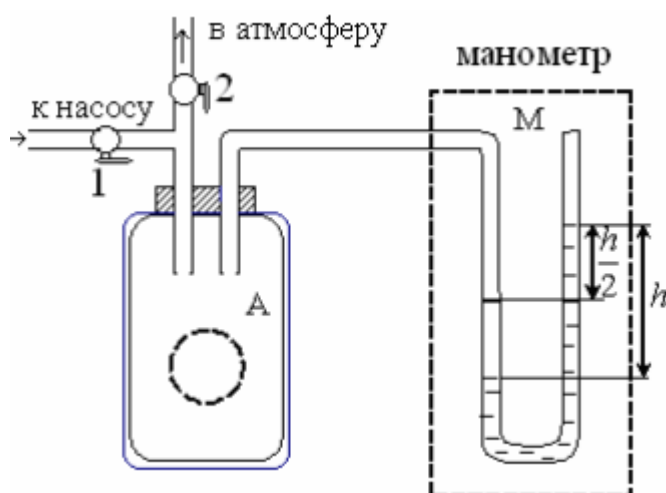


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки для определения  $\gamma$  :

А – сосуд; М – манометр

лоне понижается до некоторого значения  $T$ , а давление становится равным атмосферному  $p_0$ .

Поскольку температура  $T < T_0$ , то воздух в сосуде после закрытия клапана начнет изохорически нагреваться за счет получения тепла от окружающей среды. Давление в баллоне при этом повышается; повышается и разность уровней в манометре. Когда температура станет равной  $T_0$ , изменение уровней в манометре прекратится, и третье состояние газа будет характеризоваться параметрами  $p_2 = p_0 + \rho_{\text{ж}} g h_2$  и  $T_0$ , где  $h_2$  — новая установившаяся разность уровней в манометре.

### 3.3. Определение отношения теплоемкостей $\gamma$ воздуха

**3.3.1.** Включите на модуле I тумблеры «сеть» и «компрессор», на модуле II нажмите клапан «напуск», соединяющий компрессор с баллоном, добейтесь, чтобы разность уровней в U-образном манометре составила 250–300 мм.

**3.3.2.** Закройте клапан «напуск», выждите 2-4 минуты, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре воздуха в комнате (уровни в манометре перестанут перемещаться). По нижним уровням менисков определите уровни жидкости в коленях манометра и разность уровней  $h_1$ .

**3.3.3.** Резко нажмите клапан 2 на втором модуле и отпустите его сразу, как только в первый раз выровняются уровни жидкости в коленях манометра (возможны колебания).

**3.3.4.** Выждите 2-4 минуты, в течение которых температура воздуха в баллоне поднимется до комнатной (уровни жидкости в коленях манометра перестанут перемещаться). Определите разность уровней в коленях манометра  $h_2$ . Вычислите  $\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$ .

**3.3.5.** Повторите опыт не менее 10 раз, результаты занесите в табл. 4.1. Степень накачивания должна быть одинаковой во всех опытах.

**3.3.6.** Оцените отклонение  $\xi = \frac{|\gamma_{\text{теор}} - \gamma_{\text{экс}}|}{\gamma_{\text{теор}}} \cdot 100 \%$  результа-

тов измерения от расчетного значения  $\gamma_{\text{теор}}$ , определяемого по

формуле  $\gamma_{\text{теор}} = \frac{i+2}{i}$ , принимая воздух за двухатомный газ с числом степеней свободы  $i = 5$ .

**3.3.7.** Рассчитайте абсолютную  $\Delta h$  и относительную  $\varepsilon_h$  погрешность измерений разности уровней жидкости в манометре, результаты занести в таблицу, составленную самостоятельно.

Рассчитайте погрешность косвенных измерений коэффициента Пуассона  $\gamma$ .

$\varepsilon_\gamma = \sqrt{2\varepsilon_{h_1}^2 + \varepsilon_{h_2}^2}$  – относительная погрешность коэффициента Пуассона.

$\Delta\gamma = \langle \gamma_{\text{экс}} \rangle \varepsilon_\gamma / 100$  %, где  $\Delta\gamma$  – граница доверительного интервала.

Ответ представьте в виде  $\gamma = \langle \gamma \rangle \pm \Delta\gamma$ . Сделайте выводы.

Таблица 4.1

*Результаты измерений уровней жидкости  
и вычислений показателя адиабаты  $\gamma$*

№ п/п	$h_1$	$h_2$	$\gamma_{\text{экс}}$	$\langle \gamma_{\text{экс}} \rangle$	$\gamma_{\text{теор}}$	$\xi$
	мм	мм				%
1						
2						
...						
10						

**3.4. Определение изменения энтропии при изохорном нагревании воздуха**

**3.4.1.** Определите атмосферное давление  $p_0$ , комнатную температуру  $T_0$ , запишите значение плотности  $\rho_{\text{ж}}$  жидкости в коленах манометра, объем  $V$  баллона ( $V = 7,5$  л).

**3.4.2.** По формуле

$$\Delta S_V \approx \frac{i}{2} \frac{(p_0 + \rho_{\text{ж}} g h_2) V}{T_0} \frac{\rho_{\text{ж}} g h_2}{p_0},$$

вычислите изменение энтропии при изохорном нагревании.

**3.4.3.** Сделайте выводы.



## V. Лабораторная работа № 5

### ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЙ ПЕРЕНОСА

#### 1. Цель работы

Изучение явлений переноса, определение коэффициента внутреннего трения воздуха методом Пуазейля, длины свободного пробега молекул воздуха, коэффициентов диффузии и теплопроводности, числа Рейнольдса.

#### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – § 10.7–10.8; [2] – § 46, 48; [4] – § 86, 89. Для выполнения работы студент должен: а) знать формулу Пуазейля для определения коэффициента внутреннего трения; понятие коэффициентов диффузии и теплопроводности; физический смысл числа Рейнольдса и его расчет; б) уметь пользоваться измерительными приборами.

#### 3. Выполнение работы

##### 3.1. Описание лабораторной установки

Если в газе существуют неоднородности плотности, температуры или скорости неупорядоченного движения отдельных слоев газа, то происходит самопроизвольное выравнивание этих неоднородностей, возникают потоки вещества, энергии или импульса упорядоченного движения частиц, то есть наблюдаются явления переноса: диффузия, теплопроводность, внутреннее трение.

Лабораторная установка для изучения явлений переноса состоит из двух модулей (рис. 5.1). В модуле I расположены две емкости, соединен-

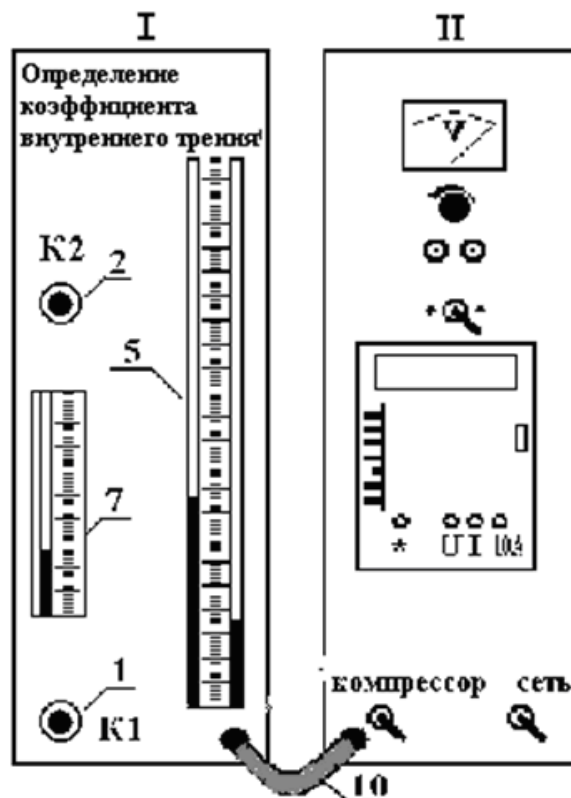


Рис. 5.1. Лабораторный комплекс

ные трубкой 8 (рис. 5.2). В модуле II расположен компрессор, соединенный с емкостью 6 через клапан 1 (K1) с помощью шланга 10. После включения компрессора и нажатия клапана K1 вода по трубке 8 вытесняется в сосуд 9. Мерная трубка 7 позволяет следить за уровнем жидкости в сосуде 6. Когда уровень воды в мерной трубке 7 достигает уровня 90, компрессор выключают и отпускают клапан K1. После нажатия клапана 2 (K2) выравниваются давления в сосуде 6, левом колене манометра 5 (рис. 5.2) и на «закрытом» конце капиллярной трубки 3. А на концах капиллярной трубки 3 (закрытом и открытом) создается разность давлений, которая измеряется манометром 5. Благодаря этому воздух после открытия 4 (см. рис. 5.2) протекает через капиллярную трубку. Объем его можно считать равным объему воды, перетекающей из сосуда 9 в сосуд 6.

Диаметр сосуда: 6  $d_c = 0,098$  м.

Длина капиллярной трубки:  $b = 0,238$  м.

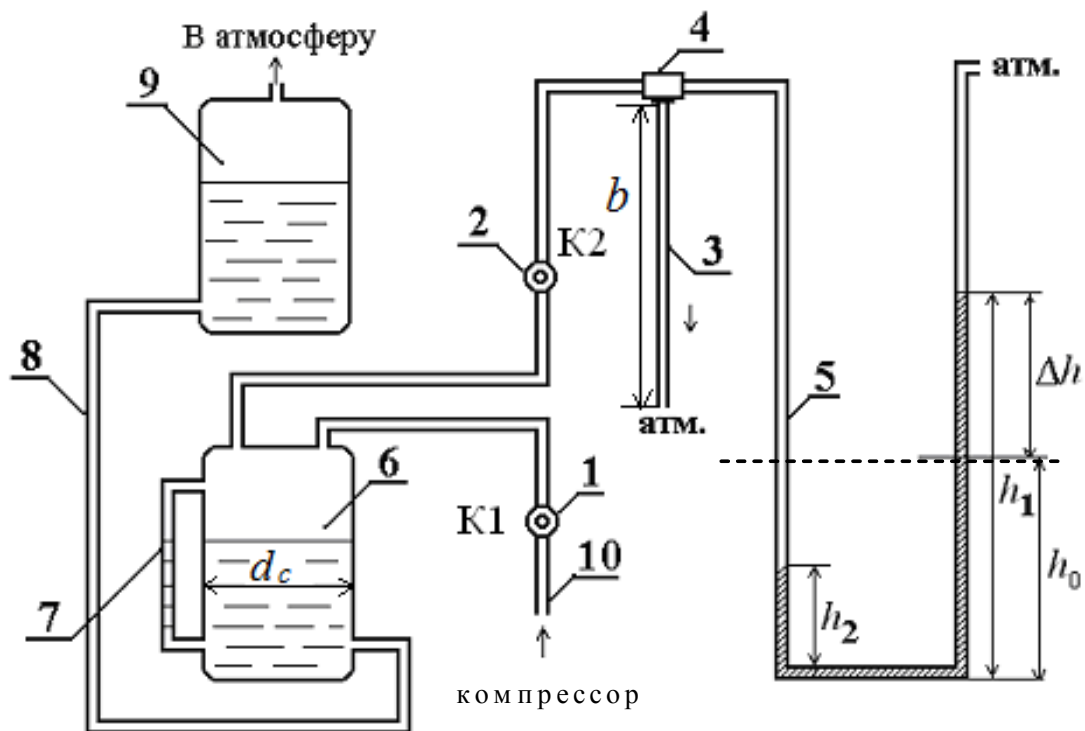


Рис. 5.2. Схема блока I

Диаметр капиллярной трубки:  $d = 0,55 \cdot 10^{-3}$  м.

### 3.2. Методика измерений и расчета

Из закона Пуазейля коэффициент динамической вязкости воздуха

$$\eta = \frac{(p_1 - p_2) R^4 \pi t}{8 b V}. \quad (5.1)$$

Разность давлений  $p_1 - p_2$  находится по разности уровней воды в манометре  $h_1 - h_2$  (рис. 5.2):

$$\Delta p = \rho_{\text{в}} g (h_1 - h_2),$$

где  $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды;  $g = 9,81 \text{ кг/м}^2$ .

Объем  $V$  воздуха, протекающего за время  $t$  через капиллярную трубку, находим по формуле  $V = \frac{1}{4} \pi d_c^2 \Delta H$ , где  $d_c$  – диаметр сосуда;  $\Delta H$  – изменение уровня воды в сосуде 6 определяем по мерной трубке 7.

Радиус капиллярной трубки  $R = d / 2$ . С учетом вышесказанного выражение (5.1) представим в виде

$$\eta = \frac{\rho_{\text{в}} g d^4}{32 d_c^2 b} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta H} t. \quad (5.2)$$

Средняя по сечению скорость потока воздуха в капилляре равна

$$\langle v \rangle = \frac{V}{St} = \frac{4V}{\pi d^2 t} = \frac{d_c^2 \Delta H}{d^2 t}. \quad (5.3)$$

Число Рейнольдса, определяющее характер движения воздуха по трубке, равно

$$\text{Re} = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta}. \quad (5.4)$$

Если  $\text{Re} < 1100$  – характер течения воздуха ламинарный, если  $1100 < \text{Re} < 2000$  – характер течения неустойчивый, при  $\text{Re} > 2000$  – течение газа турбулентное.

### 3.3. Экспериментальное определение вязкости воздуха

**3.3.1.** Включите (см. рис. 5.1) тумблеры «сеть», «компрессор» и нажмите на клапан К1. По стеклянной мерной трубке 7 следите за перемещением уровня воды. При достижении нижним краем мениска отметки 90 выключите тумблер «компрессор», от-

пустите клапан К1, выключите тумблер «сеть». По манометру 5 запишите первоначальное положение уровней  $h_0$  жидкости.

**3.3.2.** Нажмите клапан К2 и после прохождения нижним краем мениска жидкости в трубке 7 вверх примерно 5 делений включите секундомер и измерьте время  $t$  прохождения мениском 10 делений. Одновременно заметьте положение верхнего уровня жидкости  $h_1$  по манометру 5. Найдите  $\Delta h = 2(h_1 - h_0)$ , при этом  $\Delta H = 10$  мм. Результаты измерений занесите в табл. 5.1.

**3.3.3.** По формуле (5.2) найдите коэффициент вязкости  $\eta$ .

Таблица 5.1

Определение основных характеристик воздуха

№ п/п	$t$	$\Delta H$	$\Delta h$	$\eta_i$	$\langle \eta \rangle$	$\langle u \rangle$	$\rho$	$\langle \lambda \rangle$	$D$	$K$	Re
	с	мм	мм	Па·с	Па·с	м/с	кг/м <sup>3</sup>	м	м <sup>2</sup> /с	$\frac{H}{с \cdot K}$	
1											
2											
3											
4											
5											

**3.3.4.** Пункты **3.3.1–3.3.3** повторите 5 раз. При необходимости подкачайте компрессором воду в сосуд 9 (в соответствии с п. **3.3.1**) так, чтобы все замеры по мерной трубке находились в пределах 60–90 делений и  $\Delta H = 10$  мм.

**3.4. Определение средней длины свободного пробега молекул  $\langle \lambda \rangle$  и коэффициента диффузии  $D$**

**3.4.1.** По формуле  $\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}$ , где  $R = 8,31$  Дж/(К·моль);

$T$  – температура воздуха в лаборатории, найдите среднюю арифметическую скорость теплового движения молекул (для воздуха  $M = 0,029$  кг/моль).

**3.4.2.** Из уравнения Менделеева – Клапейрона найдите плотность воздуха  $\rho$  при нормальных условиях.

**3.4.3.** Из формулы  $\eta = \frac{1}{3} \langle u \rangle \langle \lambda \rangle \rho$  найдите среднюю длину свободного пробега молекул  $\langle \lambda \rangle$ .

**3.4.4.** Из формулы  $D = \frac{1}{3} \langle u \rangle \langle \lambda \rangle$  найдите коэффициент диффузии. Результаты вычислений занесите в таблицу. Сделайте выводы.

### **3.5. Определение коэффициента теплопроводности**

**3.5.1.** Из уравнения состояния идеального газа  $p = n_0 kT$  найдите концентрацию молекул воздуха  $n_0$ , при нормальных условиях.

**3.5.2.** Из формулы  $\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_m^2 n_0}$  найдите эффективный диаметр молекул  $d_m$ .

**3.5.3.** Сопоставьте эффективный диаметр молекул  $d_m$ , среднюю длину свободного пробега  $\langle \lambda \rangle$  и диаметр капиллярной трубки  $d$ . Проверьте, выполняется ли требуемое неравенство  $d_m \ll \langle \lambda \rangle \ll d$ . Если оно выполняется, то найдите коэффициент

теплопроводности  $K = \frac{1}{3} \rho \langle u \rangle \langle \lambda \rangle c_V = \eta c_V$ , где  $c_V = \frac{5}{2} \frac{R}{M}$  — удельная теплоемкость воздуха.

### **3.6. Определение характера течения воздуха через капиллярную трубку**

**3.6.1.** По формуле (5.3) найдите среднюю по сечению скорость потока воздуха  $\langle v \rangle$  через капиллярную трубку. Сравните ее со средней скоростью теплового движения молекул  $\langle u \rangle$ .

**3.6.2.** По формуле (5.4) найдите число Рейнольдса.

**3.7.** Сделайте вывод о характере течения воздуха через капиллярную трубку. Влияет ли здесь сила тяжести?

## VI. Лабораторная работа № 6

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ МЕТОДОМ ПУАЗЕЙЛЯ

#### 1. Цель работы

Изучить явления переноса и экспериментально определить коэффициент внутреннего трения жидкости методом Пуазейля.

#### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – 10.7–10.9; [2] – § 46, 48; [4] – § 96, 97. Для выполнения работы студент должен: а) знать физический смысл коэффициента внутреннего трения; вывод формулы Пуазейля; закон изменения скорости при ламинарном течении; б) уметь пользоваться измерительными приборами.

#### 3. Выполнение работы

##### 3.1. Описание лабораторной установки

Установка для определения коэффициента внутреннего трения жидкости (рис. 6.1) состоит из сосуда 1 с исследуемой жидкостью, которая своим весом создает гидростатическое давление  $p = \rho gh$ , где  $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$  – плотность воды;  $g = 9,81 \text{ кг/м}^2$ , капиллярной трубки 2 и сосуда 3 для сбора жидкости, протекающей через капилляр за время  $t$ .

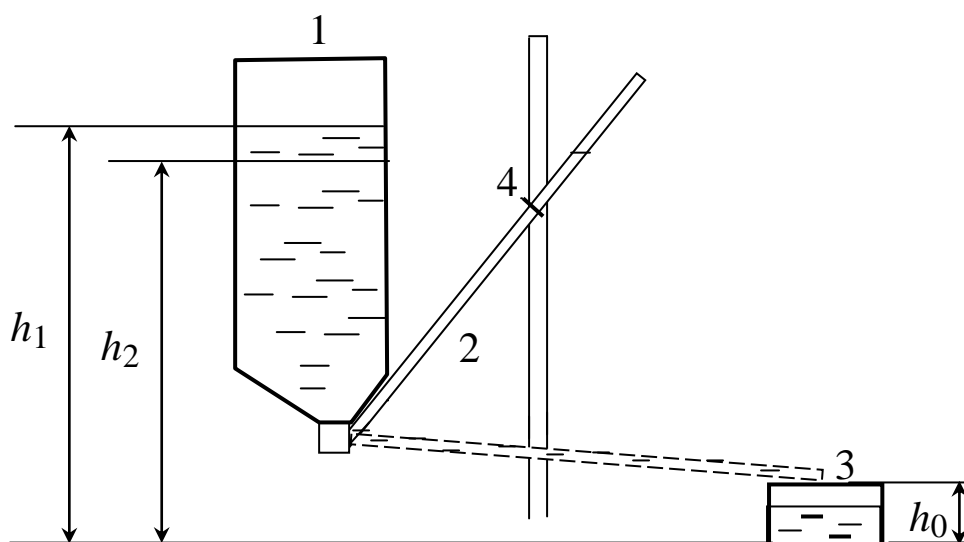


Рис. 6.1. Схема установки для определения коэффициента внутреннего трения

### 3.2. Методика измерений и расчета

При вытекании жидкости плотностью  $\rho$  через капилляр 2 за малое время  $dt$  ее уровень в сосуде 1 понижается на  $dh$ , что приводит к уменьшению давления на конце капилляра на  $dp$ :

$$dp = -\rho g dh. \quad (6.1)$$

За это же время  $dt$  через капилляр протекает жидкость объемом  $dV$ :

$$dV = \frac{\pi \Delta p R^4}{8 \ell \eta} dt. \quad (6.2)$$

Уменьшение гидростатического давления в сосуде за счет уменьшения в нем объема жидкости равно

$$dp = -\frac{\rho}{S} g dV, \quad (6.3)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения столба жидкости в сосуде 1.

Статические давления на концах капиллярной трубки определяются суммой атмосферного давления  $p_0$  и гидростатического давления жидкости:

$$p_1 = p_0 + \rho g h \quad \text{и} \quad p_2 = p_0 + \rho g h_0, \quad (6.4)$$

где  $h$  – высота уровня жидкости в сосуде в момент времени  $t = 0$ ;  $h_0$  – высота расположения нижнего конца капилляра (положение уровней отсчитывается от одной и той же поверхности).

Система уравнений (6.2)–(6.4) дает дифференциальное уравнение

$$dh = -\frac{\pi R^4 \rho g (h - h_0)}{8 S \ell \eta} dt,$$

решение которого после разделения переменных и интегрирования получим в виде

$$\ln \left( \frac{h_1 - h_0}{h_2 - h_0} \right) = \frac{\pi R^4 \rho g t}{8 S \ell \eta},$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – уровни жидкости в сосуде в начальный и конечный моменты времени протекания жидкости по капилляру.

Приняв во внимание, что площадь поперечного сечения столба жидкости в сосуде  $S = \pi d^2 / 4$  ( $d$  – внутренний диаметр сосуда), получим формулу для расчета коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Пуазейля

$$\eta = \frac{\rho g R^4 t}{2 d^2 \ell \ln \left( \frac{h_1 - h_0}{h_2 - h_0} \right)}. \quad (6.5)$$

### 3.3. Определение коэффициента внутреннего трения

**3.3.1.** Измерьте положение  $h_1$  уровня жидкости в сосуде 1 и внутренний диаметр  $d$  сосуда. Результаты занесите в табл. 6.1.

**3.3.2.** Снимите капиллярную трубку 2 с крючка 4 и поместите свободный ее конец на сосуд 3, одновременно включив секундомер для измерения времени  $t$  течения жидкости.

**3.3.3.** Закрепите капиллярную трубку на крючке 4, измерьте положение  $h_2$  уровня жидкости в сосуде после вытекания ее за время  $t$ .

Таблица 6.1

*Результаты измерения и расчета  
коэффициента внутреннего трения жидкости*

$\ell =$		м;		$R =$		м;		$\rho =$		кг/ м <sup>3</sup>	
№	$h_1$	$h_2$	$h_0$	$t$	$d$	$\eta$	$< \eta >$	$\eta_{\text{табл}}$	$\varepsilon$	$< \nu >$	
п/п	м	м	м	с	м	Па·с	Па·с	Па·с	%	м <sup>2</sup> /с	
1											
2											
3											
4											
5											

**3.3.4.** Рассчитайте по формуле (6.5) коэффициент внутреннего трения (динамическую вязкость) исследуемой жидкости и его среднее значение  $\langle \eta \rangle$ , сравните полученное значение с табличным  $\eta_{\text{табл}}$  при заданной температуре проведения эксперимента. Запишите вывод.

**3.3.5.** Рассчитайте среднее значение  $\langle \nu \rangle$  кинематической вязкости исследуемой жидкости (м<sup>2</sup>/с):

$$\nu = \eta / \rho.$$



### 3.3.6. Рассчитайте число Рейнольдса $Re$ :

$$Re = \frac{\rho \langle v \rangle d}{\eta}, \quad (6.6)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;  $\langle v \rangle = \frac{V_t}{t S}$  – средняя по сечению капиллярной трубки скорость потока, которая определяется отношением объема  $V_t$  жидкости, протекающей через капиллярную трубку за время  $t$ , к площади  $S$  поперечного сечения потока.

**3.3.7.** Сделайте вывод о характере течения жидкости в капиллярной трубке.

## VII. Лабораторная работа № 7

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОЛОВА

#### 1. Цель работы

Определение удельной теплоты кристаллизации олова и изменения энтропии при фазовом переходе I рода.

#### 2. Подготовка к работе

Прочитать в учебниках следующие параграфы: [1] – § 12.3; [2] – § 73, 75; [4] – § 111, 112, 120. Для выполнения работы студент должен: а) знать фазовые переходы I и II рода; физический и статистический смысл энтропии и характер ее изменения в различных системах; б) уметь пользоваться измерительными приборами.

#### 3. Выполнение работы

##### 3.1. Описание лабораторной установки

Принципиальная схема установки показана на рис. 7.1. Спай дифференциальной термомпары 2 находится в окружающей среде с постоянной температурой  $T_0$ , а спай 1 находится в ампуле с оловом

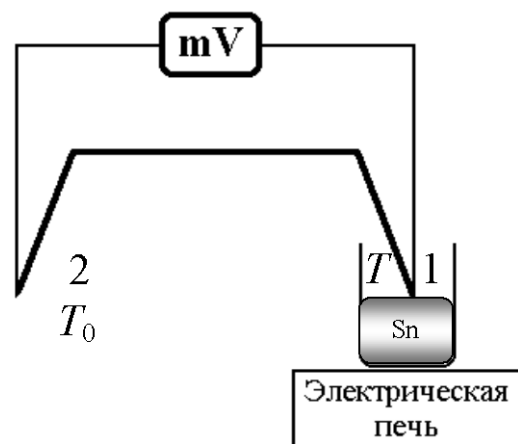


Рис. 7.1. Принципиальная схема установки

при температуре  $T$ . Так как термопары включены навстречу друг другу, то милливольтметр показывает термоЭДС, пропорциональную разности температур  $T - T_0$ . Ампула с оловом нагревается в электрической печи.

Конструктивно установка (рис. 7.2) состоит из модуля стенда I и измерительного модуля II, размещенных в унифицированных корпусах.

В модуле стенда находится ампула с оловом, которая нагревается в электрической печи, питающейся переменным током. Внутри ампулы находится металлическая трубка-чехол с дифференциальной хромель-копелевой термопарой. Таким образом, горячий спай находится в ампуле, а холодный – на воздухе. Выводы термопары соединены с гнездами 2 на лицевой панели стенда.

На лицевой панели

также расположено окно, в котором на вертикальной штанге установлен ползун, жестко соединенный с ампулой с оловом. Ползун фиксируется на штанге с помощью винта 1. Если, отвернув винт ползуна, опустить ползун вниз до упора, то ампула с оловом опустится в печь. Если же поднять ползун вверх до упора и зафиксировать винтом, то ампула с оловом будет находиться вне печи.

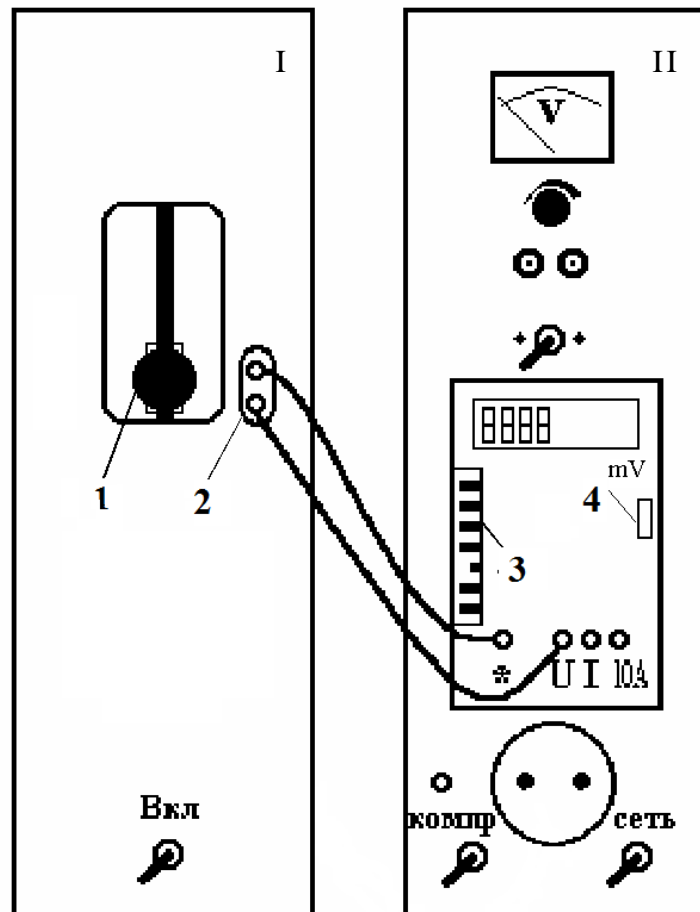


Рис. 7.2. Блок-схема установки

На лицевой панели модуля II измерительного стенда расположен мультиметр, милливольтметр которого соединяется с выходными гнездами 2 модуля I.

### 3.2. Методика измерений и расчета

Переход твердого вещества в жидкое состояние (плавление) и обратный переход (кристаллизация) относятся к фазовым переходам первого рода, при которых скачком изменяются плотность, внутренняя энергия, энтропия тела. При этом поглощается (при плавлении) или выделяется (при кристаллизации) энергия, называемая теплотой плавления (кристаллизации).

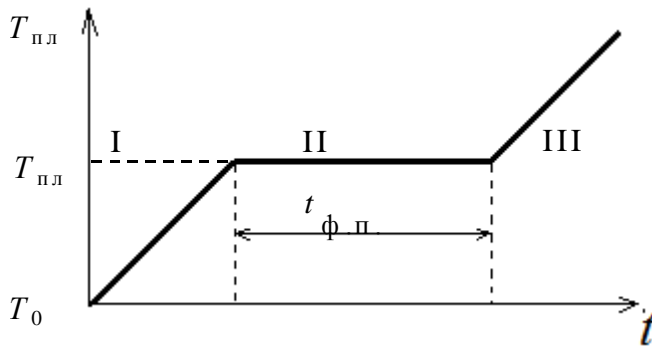


Рис. 7.3. Диаграмма плавления

Одним из возможных способов измерения температуры и теплоты плавления (кристаллизации) является получение диаграммы плавления (или отвердевания), т. е. кривой зависимости температуры  $T$  исследуемого вещества от

времени  $t$  при неизменных внешних условиях. Эта кривая качественно показана на рис. 7.3. Левая возрастающая часть показывает нагревание твердого образца и ампулы, а правая – нагревание расплава и ампулы. Тепловая мощность на любом из этих участков равна изменению внутренней энергии системы в единицу времени:

$$N = (m c + m_1 c_1) \frac{dT}{dt}, \quad (7.1)$$

где  $m$  – масса олова;  $m_1$  – масса ампулы;  $c$  – удельная теплоемкость олова;  $c_1$  – удельная теплоемкость ампулы;  $\frac{dT}{dt}$  – скорость изменения температуры системы.

Горизонтальный участок на рис. 7.3 соответствует процессу плавления металла. Ордината его – температура плавления, а длина горизонтального участка соответствует времени фазового перехода  $t_{ф.п.}$ . Для этого случая закон сохранения энергии может быть записан следующим образом:

$$N t_{\text{ф.п}} = \lambda m, \quad (7.2)$$

где  $\lambda$  – удельная теплота плавления олова.

Исключив  $N$  из формул (7.1) и (7.2), найдем:

$$\lambda = \frac{m c + m_1 c_1}{m} t_{\text{ф.п}} \frac{dT}{dt} \approx \frac{m c + m_1 c_1}{m} t_{\text{ф.п}} \frac{\Delta T}{\Delta t}. \quad (7.3)$$

Следовательно, для определения теплоты кристаллизации (плавления)  $\lambda$  в рассматриваемом процессе необходимо измерить  $T_{\text{пл}}$  и  $t_{\text{ф.п.}}$ , вычислить производную  $\frac{dT}{dt}$  функции  $T = f(t)$  в произвольной точке, соответствующей температуре твердого олова в процессе его нагревания (охлаждения). Производная  $\frac{dT}{dt}$  находится из графика, построенного по экспериментальным данным (кривая охлаждения), а скорость охлаждения образца приблизительно равна

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t}. \quad (7.4)$$

### 3.3. Определение температуры плавления и теплоты кристаллизации олова

**3.3.1.** Опустите ампулу с оловом в печь, для чего отверните на пол-оборота винт 1 (рис. 7.2) и опустите ползун вниз по штанге до упора.

**3.3.2.** Соедините проводами гнезда 2 (рис. 7.2) модуля стенда и гнезда «\*» и «U» мультиметра измерительного стенда, затем нажмите третью снизу кнопку левого вертикального ряда кнопок мультиметра 3, все остальные кнопки должны быть отжаты.

**3.3.3.** Подсоедините к питающей сети 220 В вилки обоих стендов и включите оба стенда с помощью тумблеров «вкл», «сеть» на лицевых панелях, а милливольтметр с помощью движка 4, находящегося с правой стороны его панели, сдвинуть вниз. Процесс нагревания и плавления олова занимает около 8 минут.

**3.3.4.** Проследите по показаниям милливольтметра в течение нескольких минут за тем, чтобы олово, находящееся в ампуле, расплавилось. Так как процесс плавления олова происходит при постоянной температуре, то при этом показания милливольт-

метра практически не изменяются. Окончание процесса плавления можно определить как момент времени, после которого показания милливольтметра начинают возрастать.

**3.3.5.** Через 1,5 минуты после окончания процесса плавления отключите электрическую печь тумблером «вкл» на модуле I и поднимите ампулу с оловом из печи. Для этого отверните на пол-оборота винт 1 и поднимите ползун по штанге вверх до упора, после этого закрутите винт 1.

**3.3.6.** Включите секундомер и через каждые 15 секунд снимите показания милливольтметра  $U$ , пропорциональные разности температур олова и окружающей среды  $T - T_0$ :

$$U = k(T - T_0), \quad (7.5)$$

где  $k = 5,43 \cdot 10^{-5}$  В/К для термопары хромель-копель.

**3.3.7.** Измерения продолжайте до тех пор, пока не будут пройдены три области процесса охлаждения: область полного расплава; область кристаллизации; область охлаждения твердого олова. Время опыта около 10 минут. Результаты занесите в таблицу.

Таблица 7.1

Результаты определения температуры плавления

№ опыта	$U$ , мВ	$T - T_0$ , К	$T$ , К	$t$ , с	$T_{пл}$ , К	$\lambda$ , Дж/кг	$\Delta S$ , Дж/К
1							
2							
...							
40							

**3.3.8.** По данным таблицы постройте диаграмму затвердевания олова  $T = f(t)$ , которая качественно показана на рис. 7.3. Из диаграммы определите температуру плавления олова  $T_{пл}$ , время фазового перехода  $t_{ф.п.}$  и скорость изменения температуры системы  $\frac{dT}{dt}$ . Воспользовавшись участком III (полного расплава) диаграммы, по формуле (7.3) вычислить удельную теплоту плавления

ния олова  $\lambda$  и изменение энтропии  $\Delta S = \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}}$  в процессе кристаллизации. Параметры установки:  $m = 78$  г,  $m_1 = 50$  г,  $c = 230$  Дж/(кг·К),  $c_1 = 1503$  Дж/кг·К.

**3.3.9.** Полученные значения  $T_{\text{пл}}$ ,  $\lambda$  сравните с табличными значениями, взятыми из справочной литературы. Сделайте выводы.

## VIII. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

8.1. При каких условиях возникают явления переноса? Сформулируйте основные законы их определяющие.

8.2. В чем состоит метод определения коэффициента внутреннего трения жидкости методом Стокса?

8.3. Какие силы действуют на шарик, движущийся внутри жидкости?

8.4. От чего и как зависит сила сопротивления, действующая на шарик, движущийся в жидкости?

8.5. Как связаны между собой коэффициенты  $\eta$ ,  $D$ ,  $K$ ?

8.6. Что понимают под средней длиной свободного пробега молекул?

8.7. Какая скорость входит в выражение для числа Рейнольдса? Что характеризует число Рейнольдса?

8.8. Как изменяется вязкость газов и жидкостей с ростом температуры?

8.9. Что называют теплопроводностью? Каков механизм теплопроводности газов?

8.10. Что называют вектором плотности теплового потока? Сформулируйте закон Фурье.

8.11. Одинаков ли механизм вязкости жидкостей и газов?

8.12. Запишите уравнения диффузии, теплопроводности, внутреннего трения.

8.13. Какова причина возникновения силы внутреннего трения?

8.14. Как получена формула Пуазейля, определяющая объем жидкости, протекающей по трубе за единицу времени?

8.15. От каких параметров зависит коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость)?

8.16. Что такое кинематическая вязкость? Каковы единицы ее измерения в СИ?

8.17. Какое течение жидкости называется ламинарным? Турбулентным?

8.18. Как влияют силы гравитации на изменение энергии потока?

8.19. Каков критерий определения характера течения жидкости?

8.20. Как определить число Рейнольдса?

8.21. Какими термодинамическими параметрами характеризуется состояние термодинамической системы? Назовите виды термодинамических процессов и приведите их уравнения.

8.22. Сформулируйте первый закон термодинамики, запишите его для различных термодинамических процессов.

8.23. Как рассчитать  $C_p$  и  $C_v$  для идеального газа?

8.24. Приведите уравнения адиабатного процесса. Что характеризует показатель адиабаты?

8.25. В чем состоит экспериментальный метод Клемана-Дезорма для определения коэффициента Пуассона?

8.26. С чем связано несоответствие экспериментального и теоретического значений коэффициента Пуассона?

8.27. В чем заключается физический смысл первого закона термодинамики? Как записывается математически первый закон термодинамики?

8.28. В каком случае изменение внутренней энергии системы равно работе, совершенной системой?

8.29. Какая связь между работой, совершенной системой при круговом термодинамическом процессе, и теплом, взятым и отданным системой?

8.30. Каковы удельные теплоемкости  $c_{mp}$  и  $c_{mV}$  смеси газов, содержащей кислород массой  $m_1 = 10$  г и азот массой  $m_2 = 20$  г.

8.31. Как опытным путем определить температуру плавления кристаллического твердого вещества?

8.32. Что такое фаза? Какие превращения называются фазовыми переходами I и II рода? Приведите примеры.

8.33. Что такое энтропия? В чем заключается ее статистический смысл?

8.34. Каков характер изменения энтропии для обратимых и необратимых процессов в закрытых и открытых системах?

8.35. Что такое теплота кристаллизации вещества?



## IX. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Детлаф, А. А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 10-е изд., стер. – Москва : Издат. центр «Академия», 2015. – 720 с. – Текст : непосредственный.

2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учебное пособие для студ. учреждений высшего образования / Т. И. Трофимова. – 24-е изд., стер. – Москва : Академия, 2020. – 560 с. – Текст : непосредственный.

3. Механика. Кинематика и динамика поступательного и вращательного движения : лабораторный практикум К-402.1 по дисциплине «Физика» для технических специальностей и направлений подготовки всех форм обучения / Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева ; кафедра физики ; составитель И. С. Елкин. – Кемерово : КузГТУ, 2020 – 37 с. – Текст : непосредственный.

4. Сивухин, Д. В. Общий курс физики : учебное пособие для вузов : в 5 т. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд., стереотип. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2021. – 543 с. – Текст : непосредственный.

5. Дырдин, В. В. Физика. Механика. Молекулярная физика и термодинамика : учебное пособие для студентов всех технических специальностей и направлений / В. В. Дырдин, С. А. Шепелева, Т. Л. Ким ; Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева. – Кемерово : КузГТУ, 2022. – 1 файл (4,1 Мб). – URL: <http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=91879&type=utchposob:common> (дата обращения: 18.04.2022). – Текст : электронный.

6. Физика : индивидуальные задания к самостоятельной работе обучающихся направлений подготовки: 15.03.01 «Машиностроение»; 15.03.04 «Автоматизация технологических процессов и производств»; 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» всех форм обучения / Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева ; составители : И. С. Елкин, Т. И. Янина, А. А. Мальшин. – Кемерово : КузГТУ, 2021. – 50 с. – URL:

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=10091>. – Текст : непосредственный + электронный.

7. Савельев, И. В. Курс физики : учебное пособие для вузов : в 3 томах / И. В. Савельев. – 8-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань [б. г.]. – Том 1 : Механика. Молекулярная физика – 2021. – 356 с. – ISBN 978-5-8114-6796-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/152453> (дата обращения: 21.04.2022). – Режим доступа: для авториз. пользователей.