

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«УЛЬЯНОВСКИЙ ИНСТИТУТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
ИМЕНИ ГЛАВНОГО МАРШАЛА АВИАЦИИ Б. П. БУГАЕВА»**

ФИЗИКА

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано
редакционно-издательским советом института*

Ульяновск 2018

УДК 53 (075.8)

ББК В3я7

Ф50

Физика. Статистическая физика и термодинамика : лабор. практикум / сост. Т. Н. Кодратова, С. С. Леонов, А. В. Синдяев. – Ульяновск : УИ ГА, 2018. – 61 с.

Содержит необходимые теоретические сведения по статистической физике и термодинамике, описания лабораторных установок, порядок выполнения лабораторных работ, контрольные вопросы, а также справочные таблицы.

Разработан в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом и рабочей программой учебной дисциплины «Физика».

Предназначен для курсантов и студентов заочной формы обучения всех специальностей и направлений подготовки.

УДК 53 (075.8)

ББК В3я7

ОГЛАВЛЕНИЕ

Лабораторная работа № 1. Определение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении	3
Лабораторная работа № 2. Определение отношения молярных теплоемкостей для воздуха	11
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента теплопроводности воздуха.....	20
Лабораторная работа № 4. Определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса.....	31
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента внутреннего трения и средней длины свободного пробега молекул воздуха	37
Лабораторная работа № 6. Определение удельной теплоты кристаллизации и изменения энтропии при охлаждении олова	46
Рекомендуемая литература	55
Библиографический список	55
Приложение. Справочные таблицы	56

© ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева», 2018

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Цели – экспериментальное определение теплоемкости воздуха при постоянном давлении методом противотока; изучение метода измерения разности температур.

Теоретические основы работы

Теплоемкостью тела называется физическая величина, численно равная отношению количества теплоты (δQ), сообщенного телу, к изменению его температуры (dT). Теплоемкость единицы массы вещества называется **удельной теплоемкостью** (c). Таким образом,

$$c = \frac{\delta Q}{m dT}, \quad (1.1)$$

где δQ – элементарное количество теплоты, полученное телом; m – масса тела; dT – элементарное изменение температуры тела.

Теплоемкость одного моля вещества (C_μ) равна

$$C_\mu = c\mu, \quad (1.2)$$

где μ – молярная масса вещества.

Теплоемкость идеального газа зависит от вида процесса, в результате которого к телу подводится теплота. Для расчета теплоемкости одного моля идеального газа следует использовать **первое начало термодинамики для элементарного квазистатического процесса**:

$$\delta Q = dU + p dV, \quad (1.3)$$

где δQ – бесконечно малое количество теплоты, подводимое к термодинамической системе; dU – элементарное приращение внутренней энергии газа; p – давление газа; dV – элементарное приращение объема газа.

Для одного моля газа уравнение Менделеева – Клапейрона имеет следующий вид:

$$pV = RT, \quad (1.4)$$

а выражение для внутренней энергии

$$U = \frac{iRT}{2}, \quad (1.5)$$

где i – сумма числа поступательных, вращательных и удвоенного числа колебательных степеней свободы молекулы ($i = n_{\text{пост}} + n_{\text{вращ}} + 2n_{\text{колеб}}$); R – универсальная газовая постоянная.

Квазистатическим процессом называется термодинамический процесс, происходящий настолько медленно, что термодинамическая система в течение всего процесса остается близкой к состоянию равновесия.

Из соотношений (1.1)–(1.5) молярные теплоемкости идеального газа в изохорном и изобарном процессах равны соответственно

$$C_{\mu V} = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{1}{2} iR; \quad (1.6)$$

$$C_{\mu p} = C_{\mu V} + p \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = C_{\mu V} + R. \quad (1.7)$$

Для воздуха молярная масса с учетом процентного содержания азота и кислорода $\mu = 0,029$ кг/моль, $i = 5$ (азот и кислород – двухатомные газы). Теоретическое значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении (c_p) равно

$$c_p = \frac{C_{\mu p}}{\mu} = \frac{7R}{2\mu}, \quad (1.8)$$

если считать воздух идеальным газом.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из базового и измерительного модулей.

Измерительный модуль подключен к базовому модулю с помощью соединительного кабеля и пневмопровода [1].

Базовый модуль (рис. 1.1) предназначен для питания измерительных модулей постоянным электрическим током с регулировкой величины выходного напряжения, измерения напряжений и токов на элементах измерительных модулей и питания измерительных модулей сжатым воздухом. Базовый модуль состоит из универсального блока питания (УБП) 7 с органами управления и

контроля, компрессора 15, мультиметра 4 с органами управления. Все устройства смонтированы в настольном металлическом корпусе башенного типа. Питающие напряжения УБП, а также входные разъемы мультиметра подключены к штеккерному разъему, установленному на задней стенке корпуса. Там же установлен штуцер подачи сжатого воздуха. Блок подключается к сети переменного тока 220 В, 50 Гц с помощью шнура с вилкой.

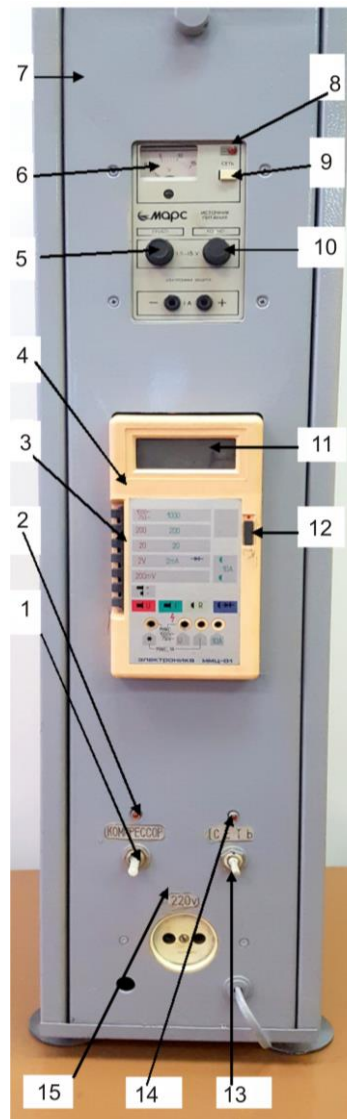


Рис.1.1. Внешний вид и органы управления базового модуля:

1 – выключатель питания компрессора; 2 – индикатор включения компрессора; 3 – переключатели пределов измерения и рода работы мультиметра; 4 – мультиметр; 5 – регулятор напряжения «Грубо» УБП; 6 – вольтметр УБП; 7 – УБП; 8 – индикатор включения УБП; 9 – выключатель питания УБП; 10 – регулятор напряжения «Точно» УБП; 11 – дисплей мультиметра; 12 – выключатель питания мультиметра; 13 – выключатель питания базового модуля; 14 – индикатор включения питания базового модуля; 15 – компрессор

Измерительный модуль (рис. 1.2) предназначен для получения экспериментальных данных исследуемого процесса и представляет собой стандартный корпус 1, в котором смонтирована экспериментальная установка.

Воздух, подаваемый компрессором базового модуля через кран подачи воздуха, прокачивается через трубчатый электронагреватель, помещенный в теплоизолирующую оболочку, и выпускается в атмосферу через калиброванное отверстие. Разность температур на входе и выходе измеряется дифференциальным электронным термометром с диодными термодатчиками, включенными по мостовой схеме. Электронный термометр выполняет функцию преобразователя «температура – напряжение». Напряжение с выхода электронного термометра, пропорциональное разности температур на входе и выходе нагревателя, подается через переключатель «SB₃» на мультиметр базового модуля, который показывает непосредственное значение разности температур ($T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}} = \theta$) на входе и выходе электронагревателя.

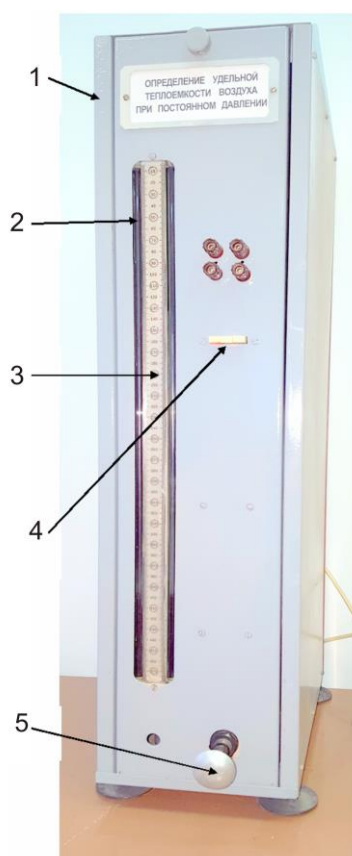


Рис. 1.2. Внешний вид и органы управления измерительного модуля:

1– корпус; 2 – U-образный манометр; 3 – шкала U-образного манометра; 4 – переключатели рода работы; 5 – рукоятка управления краном

Расход воздуха, проходящего электронагреватель, измеряется по перепаду давлений в капилляре с помощью U -образного манометра 2. Электронагреватель питается постоянным током от стабилизированного блока питания базового модуля. Напряжение, подаваемое на электронагреватель, можно регулировать от 0 до 15 В с помощью регуляторов «Грубо» и «Точно» блока питания базового модуля. Напряжение на электронагревателе контролируется с помощью мультиметра базового модуля при нажатом переключателе «SB₁(U_H)». При изменении напряжения изменяется и ток через электронагреватель. Его величина измеряется по величине падения напряжения ($U_{ш}$) на образцовом сопротивлении ($R_{ш}$) (сопротивлении шунта), включенном последовательно с электронагревателем. Измерение величины $U_{ш}$ производится мультиметром базового модуля при нажатом переключателе «SB₂($U_{ш}$)» измерительного модуля и определяется по формуле

$$I_H = \frac{U_{ш}}{R_{ш}}. \quad (1.9)$$

При изменении значения удельной теплоемкости при постоянном давлении (c_p) воздух, прокачиваемый через электронагреватель за единицу времени, получает количество теплоты (Q), которое определяется по формуле

$$Q = I_H U_H. \quad (1.10)$$

Массовый расход воздуха через нагреватель в единицу времени (m) определяется по формуле Пуайзеля:

$$m = \frac{\pi r_0^4 \Delta p \rho_B}{8l\eta}, \quad (1.11)$$

где r_0 – радиус капилляра; Δp – перепад давлений воздуха на концах капилляра; ρ_B – плотность воздуха при условиях опыта; l – длина капилляра; η – коэффициент внутреннего трения воздуха при данной температуре.

Разность температур воздуха на входе и выходе электронагревателя ($\theta = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$) измеряется с помощью мультиметра базового модуля. Значение удельной теплоемкости при постоянном давлении (c_p) рассчитывается из соотношения

$$c_p = \frac{Q}{\theta m} = \frac{I_H U_H}{\theta m}, \quad (1.12)$$

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Определить данные установки и условия проведения опыта:
 - давление воздуха: $p = \dots$ кПа;
 - температура воздуха: $T = \dots$ К; $\Delta T = \dots$ К;
 - радиус капилляра: $r_0 = 0,475 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta r_0 = \dots$ м;
 - длина капилляра: $l = 44 \cdot 10^{-3}$ м; $\Delta l = \dots$ м;
 - плотность воздуха: $\rho_{\text{в}} = \dots$ кг/м³; $\Delta \rho_{\text{в}} = \dots$ кг/м³ (при данных p и T);
 - коэффициент внутреннего трения воздуха: $\eta = \dots$ Па·с; $\Delta \eta = \dots$ Па·с (при данных p и T);
 - величина образцового сопротивления: $R_{\text{ш}} = 0,1$ Ом.
2. Убедиться в том, что выключатели питания базового модуля, УБП, мультиметра, компрессора и измерительного модуля находятся в положении «Выключено», регуляторы УБП «Грубо» и «Точно» находятся в крайнем положении против часовой стрелки, а кран подачи воздуха (K_1) измерительного модуля закрыт.
3. Убедиться в том, что переключатели рода работы и пределов измерения мультиметра базового модуля находятся в отжатом положении, кроме переключателя пределов измерения, который установлен в положении «200 мВ».
4. Включить последовательно выключатель «Сеть» базового модуля, выключатель мультиметра, компрессор, УБП.
5. Убедиться в том, что на дисплее мультиметра индицируются цифры «000,0» или «000,1».
6. Включить выключатель питания измерительного модуля, открыть кран подачи воздуха (K_1).
7. Убедиться в том, что напряжение на нагревателе равно 0, т. е. стрелка вольтметра УБП базового модуля показывает «0», а на дисплее мультиметра индицируются цифры «000,0» или «000,1» при нажатом переключателе «SB₁(U_н)». Переключатели «SB₂» и «SB₃» должны находиться в отжатом положении.
8. Выяснить у преподавателя, при каких значениях напряжения на электронагревателе необходимо провести измерения. Рекомендуемые значения должны находиться в пределах 2–10 В.

9. Регуляторами «Грубо» и «Точно» УБП установить первое из заданных значений напряжения (U_H) по дисплею мультиметра. Умножить показания дисплея на 100.

10. Через 4–5 мин нажать на переключатель «SB₂($U_{ш}$)» и измерить значение напряжения ($U_{ш}$) на образцовом резисторе ($R_{ш}$) по дисплею мультиметра. Переключатели «SB₁» и «SB₃» при этом должны находиться в отжатом положении. Результаты измерений внести в табл. 1.1.

11. Рассчитать величину тока (I_H) через электронагреватель и количество теплоты (Q), отдаваемое электронагревателем, по формулам (1.9) и (1.10) соответственно. Результаты расчетов внести в табл. 1.1.

12. Нажать на переключатель «SB₃» (Q) и наблюдать за показаниями мультиметра до тех пор, пока они не перестанут изменяться (это происходит примерно через 7–10 мин после изменения напряжения на нагревателе). Переключатели «SB₁» и «SB₃» при этом должны находиться в отжатом положении. Результаты измерений внести в табл. 1.1.

13. Определить разность уровней жидкости по шкале U -образного манометра и рассчитать значение перепада давлений воздуха на концах капилляра (Δp) по формуле

$$\Delta p = \rho gh, \quad (1.13)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; h – разность уровней жидкости в коленах манометра, м.

Результаты расчетов внести в табл. 1.1.

14. Рассчитать массовый расход по формуле (1.11) и удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении (c_p) по формуле (1.12). Результаты расчетов внести в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты измерений и расчетов

№ опыта	U_H , В	$U_{ш}$, В	I_H , А	Q , Дж/с	Δp , Па	θ , К	m , кг/с	c_p , Дж/(кг·К)
1								
2								
3								
...								

15. Повторить пп. 9–14 для остальных указанных преподавателем значений напряжения (U_H).

ВНИМАНИЕ! Запрещается подавать на электронагреватель напряжение более 10 В!

16. Регуляторами УБП «Грубо» и «Точно» уменьшить напряжение на нагревателе до 0, закрыть кран подачи воздуха (K_1) и выключить питание измерительного модуля. Выключить компрессор УБП, мультиметр и выключатель «Сеть» базового модуля. Отключить базовый модуль от сети.

Графическая обработка результатов измерений

Графическая обработка результатов измерений выполняется в следующем порядке:

1. По данным табл. 1.1. построить график зависимости $\theta = f(Q)$.

График должен иметь вид, показанный на рис. 1.3.

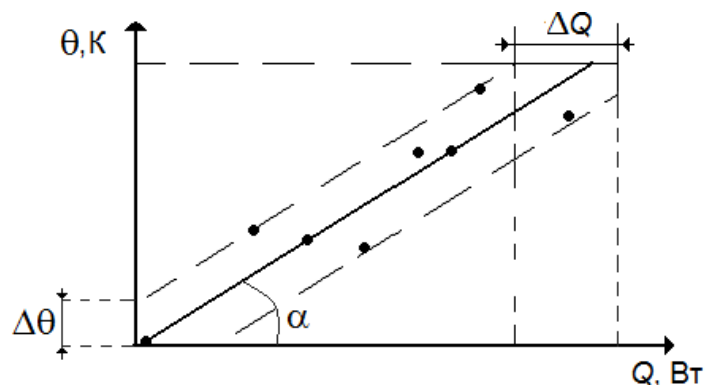


Рис 1.3. Зависимость разности температур на входе и выходе электронагревателя от подводимой мощности

2. Провести оптимальную прямую через набор экспериментальных точек (близко к этой прямой должно лежать большинство экспериментальных точек). Ограничить полосу, в которой находятся экспериментальные точки, прямыми, параллельными оптимальной линии и проходящими через наиболее удаленные от оптимальной прямой экспериментальные точки (на рис 1.3 это пунктирные линии).

3. Определить тангенс угла наклона оптимальной прямой по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{c_p m} = \frac{\theta}{Q} = \frac{\theta}{I_H U_H}. \quad (1.14)$$

Значения Q и θ берутся близкими к значениям для последнего опыта.

4. Рассчитать удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении (c_p) по формуле (1.12).

5. Рассчитать погрешность (Δc_p) по формуле

$$\Delta c_p = c_p \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \theta}{\theta}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2}. \quad (1.15)$$

Абсолютные погрешности ΔQ и $\Delta \theta$ определяются из графика на рис. 1.3.

6. Записать результат с учетом погрешности.

7. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Почему молярная и удельная теплоемкости идеального газа зависят от условий процесса, протекающего в газе?

2. При высоких температурах наблюдается расхождение между экспериментальными данными и теоретическими значениями молярной (и удельной) теплоемкости. Объясните этот факт.

3. Почему в этой работе можно считать давление воздуха постоянным?

4. Каковы недостатки использованной в работе методики определения удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении?

5. Можно ли усовершенствовать установку? Что для этого нужно сделать?

6. Как определяется разность температур на выходе и входе калориметра?

7. В каком диапазоне температур и давлений воздух можно считать идеальным газом?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ДЛЯ ВОЗДУХА

Цели – изучение основных процессов, протекающих в идеальном газе; экс-

периментальное определение показателя адиабаты $\gamma = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu v}}$ для воздуха.

Теоретические основы работы

Тепловые процессы в газах протекают в соответствии с первым законом термодинамики, представляющим собой **закон сохранения энергии для произвольного термодинамического процесса**:

$$\delta Q = \delta A + dU, \quad (2.1)$$

где δQ – бесконечно малое количество теплоты, подводимое к термодинамической системе; δA – бесконечно малая работа, совершаемая термодинамической системой; dU – бесконечно малое изменение внутренней энергии системы.

Внутренняя энергия является функцией состояния системы, поэтому ее малое изменение описывается полным дифференциалом (d). Количество теплоты и совершаемая работа зависят от вида термодинамического процесса, т. е. являются функциями процесса. Поэтому и бесконечно малое количество теплоты, и бесконечно малая величина совершаемой работы обозначаются как неполные дифференциалы (δ).

Согласно первому началу термодинамики количество теплоты, переданное системе, затрачивается на приращение ее внутренней энергии и работу, совершаемую системой против внешних сил.

Разделив обе части соотношения (2.1) на dT , получим выражение для теплоемкости газа:

$$C_{\mu} = c_{\mu} = \frac{dQ}{dT} = \left(\frac{dU}{dT} \right) + \left(\frac{pdV}{dT} \right), \quad (2.2)$$

где c – удельная теплоемкость; μ – молярная масса газа.

Молярной теплоемкостью (C_{μ}) называется количество теплоты, необходимое для нагревания 1 моля газа на 1 К.

Рассмотрим основные процессы, протекающие в идеальном газе, при условии, что его масса остается неизменной.

Изохорический процесс. Изохорическим называется процесс, протекающий при постоянном объеме: $V = \text{const}$.

В этом случае $dV = 0$, $\delta A = pdV = 0$. Вся подводимая к газу теплота идет на увеличение его внутренней энергии. Тогда из уравнения (2.2) следует

$$C_{\mu V} = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R, \quad (2.3)$$

где i – число степеней свободы молекулы газа.

Число степеней свободы тела называется наименьшее число независимых переменных, которые необходимо задать для того, чтобы полностью определить положение тела в пространстве.

Изобарический процесс. Изобарическим называется процесс, протекающий при постоянном давлении: $p = \text{const}$. Тогда согласно уравнению (2.2) молярная теплоемкость газа ($C_{\mu p}$) равна

$$C_{\mu p} = \left(\frac{dU}{dT} \right) + p \left(\frac{dV}{dT} \right). \quad (2.4)$$

Взяв уравнение Менделеева – Клапейрона в дифференциальной форме

$$PdV = \nu R dT \quad (2.5)$$

и первое начало термодинамики в виде

$$\nu C_{\mu} dT = \frac{\nu i}{2} R dT + p dV ,$$

получаем

$$C_{\mu p} = \frac{i+2}{2} R. \quad (2.6)$$

Формула, связывающая молярные теплоемкости идеального газа при постоянном объеме и постоянном давлении, называется **формулой Майера**:

$$C_{\mu p} = C_{\mu V} + R. \quad (2.7)$$

Теплоемкость газа при постоянном давлении больше теплоемкости того же газа при постоянном объеме, т. к. при изобарическом процессе теплота расходуется не только на увеличение внутренней энергии газа, но и на совершение работы против внешних сил.

Изотермический процесс. Изотермическим называется процесс, протекающий при постоянной температуре: $T = \text{const}$. В соответствии с определением молярной теплоемкости при $T = \text{const}$ $C_{\mu T} = \pm\infty$.

Адиабатический процесс. Адиабатическим (адиабатным) называется процесс, происходящий в термодинамической системе без подвода теплоты, т. е.

$$dU + \delta A = 0.$$

В отсутствии теплообмена с окружающей средой ($\delta Q = 0$) молярная теплоемкость $C_{\mu S} = 0$, т. е. как теплоемкость при постоянной энтропии.

Уравнение

$$PV^\gamma = \text{const} \quad (2.8)$$

называется **уравнением адиабаты**, или **уравнением Пуассона**.

Поделив (2.6) на (2.3), найдем так называемый **показатель адиабаты** (γ), входящий в уравнение адиабатического процесса:

$$\gamma = \frac{C_{\mu P}}{C_{\mu V}} = \frac{i+2}{i}. \quad (2.9)$$

С учетом соотношения (2.7) имеем для одноатомного газа $C_{\mu S} = \frac{5R}{2}$, для двухатомного газа – $C_{\mu P} = \frac{7R}{2}$, для трех- и многоатомного газа – $C_{\mu P} = 4R$ (при условии, что колебательные степени свободы «заморожены»).

Поэтому

$$\gamma = \frac{C_{\mu V} + R}{C_{\mu V}} = \frac{i+2}{i},$$

откуда для одноатомного газа $\gamma = \frac{(3+2)}{3} = 1,67$; для двухатомного $\gamma = \frac{(5+2)}{5} = 1,40$;

для трех- и многоатомного газа $\gamma = \frac{(6+2)}{6} = 1,33$.

Как установлено теоретически и подтверждается опытом, отношение $\frac{C_{\mu P}}{C_{\mu V}}$ тем меньше, чем сложнее молекула.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из базового модуля (см. рис. 1.1) и измерительного модуля (рис. 2.1). Измерительный модуль соединен с базовым модулем пневмопроводом.

Измерительный модуль предназначен для получения экспериментальных данных исследуемого процесса и представляет собой стандартный корпус 1, в котором смонтирована экспериментальная установка.

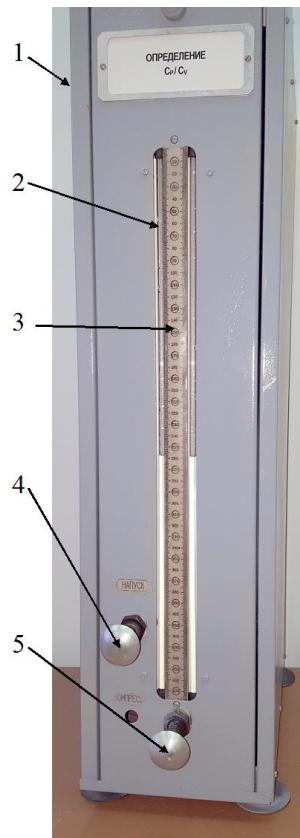


Рис. 2.1. Внешний вид и органы управления измерительного модуля:

1 – корпус; 2 – *U*-образный манометр; 3 – шкала *U*-образного манометра; 4 – клапан «Напуск»; 5 – клапан «Выпуск»

Экспериментальная установка состоит из стального баллона, заполненного воздухом. Баллон соединен с *U*-образным водяным манометром 2. С помощью клапана «Напуск» 4 в баллон может быть подан сжатый воздух от компрессора базового модуля. С помощью клапана «Выпуск» 5 баллон может быть соединен с атмосферой. Поперечное сечение клапана 5 достаточно большое, и поэтому при его открывании установление атмосферного давления в баллоне происходит достаточно быстро. Быстрое изменение давления в баллоне происходит практически без теплообмена с окружающей средой, поэтому процесс можно с достаточной точностью считать адиабатным. При открытии клапана «Напуск» в баллон подается сжатый воздух, затем клапан закрывают. Через несколько минут температура воздуха в баллоне становится равной температуре окружающей среды. Обозначим ее T_1 . Давление воздуха в баллоне (p_1) при этом равно

$$p_1 = p_0 + p', \quad (2.10)$$

где p_0 – атмосферное давление; p' – избыточное давление воздуха, которое можно определить по показаниям манометра.

Выберем мысленно в сосуде объем V вдали от клапана. Будем считать, что число молекул в этом объеме неизменно. Начальное состояние воздуха в объеме характеризуется параметрами p_1, T_1, V_1 .

Если открыть на короткое время клапан «Выпуск», то часть воздуха выйдет из сосуда, давление в сосуде станет равным $p_2 = p_0$, выбранный нами «объем» увеличится до значения V_2 . Температура воздуха понизится, так как при вытекании из сосуда воздух совершает работу против давления окружающего баллон воздуха. Таким образом, $T_2 < T_1$. Когда клапан закрывают [2], состояние «объема» характеризуется параметрами p_2, T_2, V_2 . Считая переход из состояния 1 в состояние 2 адиабатным процессом, из (2.10) получим

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (2.11)$$

После того, как клапан 5 закрыли, происходит изохорный процесс теплообмена с окружающей средой; температура воздуха приближается к температуре в лаборатории (T_1), давление воздуха по окончании этого процесса равно

$$p_3 = p_0 + p'', \quad (2.12)$$

где p'' – давление, измеряемое по манометру. Параметры воздуха после окончания изохорного процесса: p_3, T_1, V_3 , причем $V_2 = V_3$.

Так как температура воздуха в первом и третьем состояниях одинакова, а число молекул в выбранном нами «объеме» постоянно (объем V выбран вдали от клапана), то для состояний 1 и 3 можно применить закон Бойля – Мариотта:

$$p_1 V_1 = p_3 V_3 = p_3 V_2. \quad (2.13)$$

Решая систему уравнений (2.11), (2.13), получаем

$$\left(\frac{p_3}{p_1}\right)^\gamma = \left(\frac{p_2}{p_1}\right).$$

Прологарифмировав это соотношение, находим показатель адиабаты:

$$\gamma = \frac{\ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right)}{\ln\left(\frac{p_1}{p_3}\right)}.$$

Используя соотношения (2.10), (2.12), получаем

$$\gamma = \frac{\ln\left(1 + \frac{p'}{p_0}\right)}{\ln\left[1 + \frac{(p' - p'')}{(p_0 + p'')}\right]}. \quad (2.14)$$

Так как избыточные давления p' , p'' весьма малы по сравнению с атмосферным давлением (p_0), можно использовать разложение функции типа $\ln(1 + x)$ в ряд, ограничившись первым членом разложения (при $x \ll 1$):

$$\ln(1 + x) \sim x.$$

В этом приближении из выражения (2.14) получаем

$$\gamma = \frac{p'}{p' - p''}. \quad (2.15)$$

Избыточное давление, определяемое по манометру, можно выразить соотношением

$$p = ah; \quad (2.16)$$

$$h = L_1 - L_2, \quad (2.17)$$

где a – постоянный для данного манометра коэффициент, зависящий от плотности жидкости; h – разность уровней жидкости в манометре; L_1 , L_2 – уровни жидкости в разных коленах манометра.

Из соотношений (2.15) и (2.16) получаем

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}, \quad (2.18)$$

где h_1 и h_2 – разность уровней жидкости в манометре в первом и третьем состояниях.

Процессы, происходящие в объеме V , можно условно изобразить графически (рис. 2.2).

Примечание. Процессы, происходящие в сосуде, не являются квазиравновесными, поэтому графики, строго говоря, строить нельзя (в случае неравновесного процесса нельзя говорить о давлении и температуре газа, так как в разных частях баллона эти величины могут иметь различные значения).

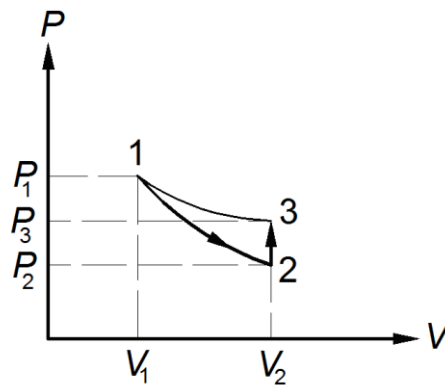


Рис. 2.2. Процессы, происходящие при проведении опыта:
1–2 – адиабатный процесс, 2–3 – изохорный процесс

2.3. Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Выписать данные установки и условия опыта:
 - $a = 1$;
 - $p_0 = \dots$; $\Delta p_0 = \dots$;
 - $T_0 = \dots$; $\Delta T_0 = \dots$;
 - $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 2$ мм;
 - доверительная вероятность: $P = \dots$ (задается преподавателем).
2. Убедиться в том, что все органы управления базового модуля находятся в исходном состоянии, а выключатели «Сеть», «Компрессор» – в положении «Включено» (см. рис. 1.1).
3. Включить базовый модуль в сеть.
4. Включить выключатели «Сеть» и «Компрессор» базового модуля.
5. Нажать на клапан «Напуск» измерительного модуля и подать сжатый воздух в баллон так, чтобы разность уровней жидкости в коленах манометра стала равной 25–30 см. Закрыть (отпустить) клапан «Напуск».
6. Когда температура воздуха в баллоне станет равной температуре окружающей среды и изменение разности уровней в коленах манометра прекратится, по нижнему уровню мениска определить разницу уровней жидкости (h_1). Результаты измерений внести в табл. 2.1 (см. формулу (2.17)).
7. Резко нажать на клапан «Выпуск», соединив баллон с атмосферой. Выдержать открытым клапан в течение 1 с или меньше и закрыть его (отпустить). После того, как уровни в коленах манометра перестанут изменяться, по нижнему

уровню мениска определить разницу уровней жидкости (h_2) в разных коленах манометра. Результаты измерений внести в табл. 2.1 (см. формулу (2.17)).

8. Повторить опыты (пп. 5–7) не менее пяти раз.

ВНИМАНИЕ! Накачивая воздух в баллон, важно не допускать, чтобы нижний уровень жидкости достиг колена манометра (нижней отметки его шкалы).

9. Выключить выключатели «Компрессор» и «Сеть» базового модуля.

10. Выпустить воздух из баллона, открыв клапан «Выпуск» на 10–15 с.

11. По формуле (2.18) определить экспериментальные значения γ и внести их в табл. 2.2.

12. Вычислить погрешности измерения методом Стюдента. Результаты вычислений внести в табл. 2.2.

13. Сравнить экспериментальное значение γ с теоретическим (воздух считать идеальным двухатомным газом). Сделать выводы по работе.

Таблица 2.1

Результаты измерений

№ п/п	h_1 , см	h_2 , см
1		
2		
...		

Таблица 2.2

Результаты вычислений

№ п/п	γ	$\Delta\gamma$	S_γ	$t_{p,n}$	δ_γ	ε_γ , %	$\gamma \pm \delta_\gamma$
1							
2							
...							
6							
Ср.							

Контрольные вопросы и задания

1. Запишите первое начало термодинамики в применении к изопротессам.
2. Дайте определения понятиям «адиабатный протесс», «изохорный протесс», «изобарный протесс», «изотермический протесс».
3. Выведите формулу Майера.

4. Выведите уравнение Пуассона.
5. Какую величину называют показателем адиабаты (показателем Пуассона)? От каких факторов зависит значение показателя адиабаты для идеального газа?
6. Рассчитайте теоретическое значение показателя адиабаты для одноатомного, двухатомного и трехатомного идеальных газов.
7. Дайте определение понятию «квазистатический термодинамический процесс».
8. Какие процессы осуществляются в данной лабораторной работе?
9. Изобразите на графиках адиабатный, изохорный, изобарный и строго изотермический квазистатические процессы. Объясните, почему нельзя графически изобразить быстро протекающие процессы.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА

Цель – экспериментальное определение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой электрическим током металлической нити, электрической мощности, выделяемой в нити, и ее температуры.

Теоретические основы работы

Теплопроводность – способность материальных тел к переносу энергии (теплообмену) от более нагретых частей тела к менее нагретым частям тела, осуществляемому хаотически движущимися частицами тела. Такой теплообмен может происходить в любых телах с неоднородным распределением температур. Теплопроводность является одним из трех видов передачи тепла, наряду с конвекцией и тепловым излучением. Обычно процесс теплопроводности приводит к выравниванию температуры. Если поддерживать разность температур неизменной, происходит так называемый **стационарный процесс**. Для стационарного процесса явление теплопроводности подчиняется **закону Фурье**:

$$\vec{j}_E = -\lambda \text{grad}(T), \quad (3.1)$$

где \vec{j}_E – вектор плотности теплового потока, по модулю равный количеству энергии, проходящей в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной

каждой оси; λ – коэффициент теплопроводности (удельная теплопроводность), называемый также просто теплопроводностью; $\text{grad}(T)$ – градиент температуры.

Градиент температуры ($\text{grad}(T)$) определяется по формуле

$$\text{grad}(T) = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k}, \quad (3.2)$$

где $\frac{\partial T}{\partial x}$, $\frac{\partial T}{\partial y}$, $\frac{\partial T}{\partial z}$ – частные производные от температуры по координатам; \vec{i} , \vec{j} ,

\vec{k} – единичные базисные векторы в декартовой прямоугольной системе координат.

При теплопроводности энергия переносится в направлении убывания температуры, поэтому векторы \vec{j}_E и $\text{grad}(T)$ направлены в противоположные стороны, именно этим обусловлен знак « $-$ » в формуле (3.1). Для стационарного одномерного процесса (температура тела меняется лишь по оси Ox) уравнение (3.1) можно переписать в скалярном виде:

$$\delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} \cdot dS dt, \quad (3.3)$$

где δQ – количество теплоты, переносимое за время dt через элементарную площадку dS , нормальную к оси Ox , в направлении убывания температуры;

$\frac{dT}{dx}$ – модуль градиента температуры на оси Ox .

При теплопроводности перенос энергии осуществляется в результате непосредственной передачи энергии от молекул, обладающих большей энергией, к молекулам, обладающим меньшей энергией. При малых значениях градиента температуры (если температура мало меняется на расстоянии порядка длины свободного пробега молекулы) коэффициент теплопроводности не зависит от градиента температуры, а зависит лишь от агрегатного состояния вещества, его атомно-молекулярного строения, температуры, давления.

Если процесс нестационарный, т. е. если температура зависит не только от координат, но и от времени [3], то уравнение (3.1) можно переписать для одномерного случая:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (3.4)$$

$$D = -\frac{\lambda}{c_V \rho},$$

где ρ – плотность вещества; c_V – удельная теплоемкость при постоянном объеме; t – время.

Уравнение (3.4) называется **уравнением Фурье**, является дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных и хорошо известно как одно из уравнений математической физики.

Из молекулярно-кинетической теории идеального газа следует, что теоретическое значение коэффициента теплопроводности (λ) может быть рассчитано по формуле

$$\lambda = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle c_V, \quad (3.5)$$

где ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость беспорядочного теплового движения молекул; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул; c_V – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Для идеального газа имеют место соотношения

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \cdot m_0}}; \quad \langle l \rangle = (\sqrt{2} \cdot n\sigma)^{-1},$$

где k – постоянная Больцмана; m_0 – масса молекулы; n – число молекул в единице объема; σ – эффективное сечение столкновений молекул.

Отсюда из формулы (3.4) получим

$$\lambda = \text{const} \cdot \frac{c_V}{\sigma} \sqrt{T}. \quad (3.6)$$

Отметим, что для реальных газов коэффициент теплопроводности с увеличением температуры растет быстрее, чем следует из соотношения (3.5). Из опытов следует, что для многих газов (в частности для воздуха) [1]

$$\lambda = \text{const} \cdot T^\beta, \quad (3.7)$$

где $\beta = 0,7-1$.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из базового и измерительного модулей. Измерительный модуль подключен к базовому модулю кабелем с разъемом.

Базовый модуль (рис. 3.1) предназначен для питания измерительных модулей постоянным электрическим током с регулировкой величины выходного напряжения, измерения напряжений и токов на элементах измерительных модулей и питания измерительных модулей сжатым воздухом. Базовый модуль состоит из универсального блока питания 7 с органами управления и контроля, компрессора 15, мультиметра 4 с органами управления. Все устройства смонтированы в настольном металлическом корпусе башенного типа. Питающие напряжения УБП, а также входные разъемы мультиметра подключены к штекерному разъему, установленному на задней стенке корпуса. Там же установлен штуцер подачи сжатого воздуха. Блок подключается к сети переменного тока 220 В, 50 Гц с помощью шнура с вилкой.

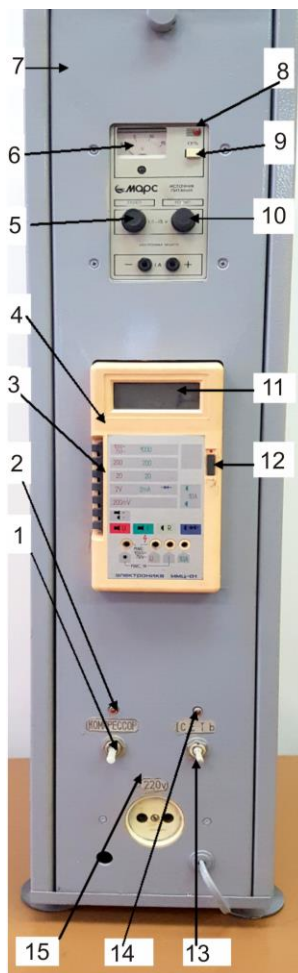


Рис. 3.1. Внешний вид и органы управления базового модуля:

1 – включатель питания компрессора; 2 – индикатор включения компрессора; 3 – переключатели пределов измерения и рода работы мультиметра; 4 – мультиметр; 5 – регулятор напряжения «Грубо» УБП; 6 – вольтметр УБП; 7 – УБП; 8 – индикатор включения УБП; 9 – включатель питания УБП; 10 – регулятор напряжения «Точно» УБП; 11 – дисплей мультиметра; 12 – включатель питания мультиметра; 13 – включатель питания базового модуля; 14 – индикатор включения питания базового модуля; 15 – компрессор

Измерительный модуль (рис. 3.2) предназначен для измерения параметров исследуемого процесса и представляет собой металлический корпус башенного типа 1. В корпусе установлен цилиндрический стеклянный баллон 2 с двойными стенками, между которыми залита вода 3. Внутри трубки, образованной поверхностью внутренней стенки баллона, по оси ее симметрии натянута вольфрамовая нить 4, нагреваемая электрическим током, подаваемым от УБП по соединительному кабелю.

В зависимости от положения переключателя 5 измерительного модуля мультиметр базового модуля измеряет напряжение на нити (U_H) или падение напряжения на образцовом сопротивлении ($U_{ш}$) (напряжение на шунте). Ток в нити определяется по падению напряжения ($U_{ш}$) на образцовом сопротивлении ($R_{ш}$) (сопротивлению шунта).

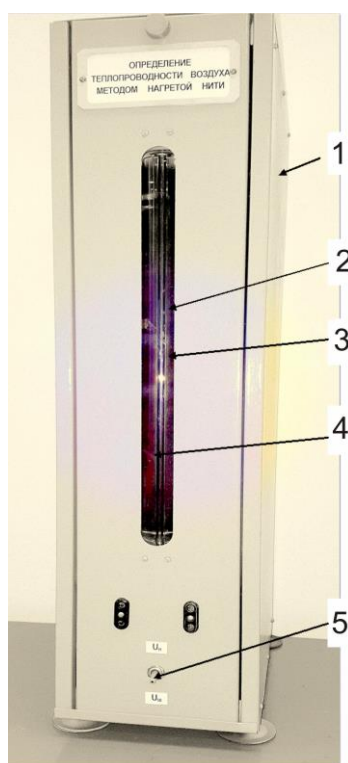


Рис. 3.2. Внешний вид и органы управления измерительного модуля:

1 – корпус; 2 – стеклянный баллон; 3 – вода; 4 – вольфрамовая нить; 5 – переключатель $\frac{U_H}{U_{ш}}$

При нагревании нити электрическим током вдоль радиуса трубки создается градиент температуры ($\frac{dT}{dr}$). Найдем количество тепла, которое пройдет за

время dt через любую коаксиальную с нитью поверхность радиусом r . Для этого проинтегрируем уравнение (3.3), заменив в нем $\frac{dT}{dx}$ на $\frac{dT}{dr}$:

$$\int \delta Q = -\lambda \frac{dT}{dr} \cdot dt \int dS. \quad (3.8)$$

Коаксиальные с нитью поверхности радиуса r представляют собой круглые цилиндры, и поскольку длина нагретой нити равна L , то такой же будет и высота цилиндров. Следовательно,

$$\int dS = 2\pi rL.$$

Тогда из уравнения (3.8) получаем

$$dQ = -\lambda \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi rL dt, \quad (3.9)$$

где $dQ = \int \delta Q$ – количество теплоты, проходящее через всю коаксиальную поверхность радиуса r за время dt .

Поделим левую и правую части уравнения (3.9) на dt , получим

$$P = -\lambda \frac{dT}{dr} \cdot 2\pi rL, \quad (3.10)$$

где $P = \frac{dQ}{dt}$ – тепловой поток (мощность).

Для дальнейших рассуждений следует заметить, что температура внутри трубки меняется от нити к стенке, и при этом изменяется и коэффициент теплопроводности. Поэтому для точного нахождения теплового потока необходимо решить дифференциальное уравнение. Умножим левую и правую части уравнения (3.10) на $\frac{dr}{r}$ и учтем зависимость $\lambda = \lambda(T)$:

$$P \frac{dr}{r} = -2\pi L \lambda(T) dT. \quad (3.11)$$

Проинтегрируем полученное дифференциальное уравнение в пределах, соответствующих поверхности нити и внутренней стенке трубки:

$$P \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi L \cdot \int_{T_n}^{T_c} \lambda(T) dT, \quad (3.12)$$

где r_1 – радиус нити; r_2 – внутренний радиус трубки; T_n – температура нити; T_c – температура стенки трубки.

В выражении (3.12) также учтено, что мощность (P) остается постоянной величиной, это возможно в том случае, если падение напряжения на нити (U_n) и сила тока на нити (I_n) не изменяются. Если $P = \text{const}$, то и $T_n = \text{const}$ при стационарном процессе. Вычисляем интеграл в левой части выражения (3.12), преобразуем и получаем

$$P = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot \int_{T_c}^{T_n} \lambda(T) dT. \quad (3.13)$$

Опыт проводится при постоянной температуре трубки (T_c). Поэтому в выражении (3.13) в правой и левой частях получаются константы.

Рассмотрим теперь случай, когда мощность меняется вследствие изменения напряжения на нити. Увеличение электрической мощности, выделяемой в нити, на величину dP приводит к возрастанию ее температуры на dT_n . Возьмем дифференциал от левой и правой частей выражения (3.13):

$$dP = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot d\left(\int_{T_c}^{T_n} \lambda(T) dT\right). \quad (3.14)$$

Используя формулу производной от интеграла с переменным верхним пределом и преобразуя ее в дифференциал, получаем

$$dP = \frac{2\pi L}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \cdot \lambda(T_n) dT_n. \quad (3.15)$$

Величина $\lambda(T_n)$ в соотношении (3.15) соответствует температуре T_n , т. к. вблизи нити теплопроводность воздуха определяется температурой нити. При возрастании температуры на dT_n дополнительный перенос тепловой мощности (dP) от нити к стенке трубки определяется только теплопроводностью слоя воздуха вблизи нити. Из соотношения (3.15) получаем

$$\lambda(T_n) = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L} \cdot \frac{dP}{dT_n}. \quad (3.16)$$

Таким образом, чтобы определить коэффициент теплопроводности, необходимо знать значение производной $\frac{dP}{dT_{\text{н}}}$ для конкретной температуры нити ($T_{\text{н}}$),

размеры нити и трубки. Последние определяются непосредственными измерениями и в условиях настоящей работы являются заданными. Для определения производной нужно иметь зависимость $P = f(T_{\text{н}})$, которая находится по экспериментальным данным, получаемым следующим образом. Мощность (P) определяется по напряжению ($U_{\text{н}}$), измеренному на нити, и току ($I_{\text{н}}$), протекающему через включенное последовательно с нитью образцовое сопротивление ($R_{\text{ш}}$) (сопротивление шунта):

$$P = I_{\text{н}} U_{\text{н}}; \quad (3.17)$$

$$I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}}. \quad (3.18)$$

Температуру нити ($T_{\text{н}}$) можно определить, измерив изменение ее электрического сопротивления при нагревании. Действительно, в области применяемых температур сопротивление проволоки растет с температурой по линейному закону:

$$R_{\text{н}} = R_0(1 + \alpha t), \quad (3.19)$$

где $R_{\text{н}}$ – сопротивление нити при температуре t °С; R_0 – сопротивление нити при $t = 0$ °С; α – температурный коэффициент сопротивления материала нити.

Измерив сопротивление нити до ее нагревания при температуре 0 °С, а затем определив ее сопротивление ($R_{\text{н}}$) после ее нагрева до температуры $t_{\text{н}}$ и зная величину α , из формулы (3.19) получим

$$t_{\text{н}} = \frac{R_{\text{н}} - R_0}{\alpha R_0}. \quad (3.20)$$

Сопротивление нити ($R_{\text{н}}$) определяется косвенным путем по величине напряжения на нити ($U_{\text{н}}$) и току через нее ($I_{\text{н}}$) по формуле

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}, \quad (3.21)$$

так как прямое измерение этой величины невозможно вследствие практически мгновенного остывания нити при прерывании тока в цепи в случае измерения ее сопротивления с помощью обычного омметра.

Температура нити (T_n) по шкале Кельвина находится из равенства

$$T_n = 273,15 + t_n. \quad (3.22)$$

Формула (3.16) позволяет по найденной экспериментальной зависимости $P = f(T_n)$ определить $\lambda(T_n)$.

Следует отметить, что использованная методика измерения коэффициента теплопроводности не учитывает ряд физических явлений, сопровождающих процесс теплопередачи:

- тепловые потери через концы нити и подведенные к ней электрические провода;
- конвективный перенос тепла от нити к стенке трубки;
- передача тепла за счет излучения.

Эти процессы приводят к математической погрешности определения коэффициента теплопроводности воздуха, которая, однако, не превышает нескольких процентов.

Порядок выполнения работы

Лабораторная работы выполняется в следующем порядке:

1. Выписать данные установки и условия опыта:
 - радиус нити: $r_1 = 0,41$ мм;
 - внутренний радиус трубки: $r_2 = 3$ мм;
 - длина нити: $L = 0,395$ мм;
 - сопротивление нити при температуре 0 °С: $R_n = 3,77$ Ом;
 - температурный коэффициент сопротивления вольфрама: $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$;
 - величина образцового сопротивления: $R_{ш} = 0,1$ Ом;
 - доверительная вероятность: $P = \dots$ (задается преподавателем).
2. Убедиться в том, что все приборы базового и измерительного модулей выключены. Повернуть регуляторы напряжения «Грубо» и «Точно» на универсальном блоке питания базового модуля против часовой стрелки до упора (см. рис. 3.1).
3. Убедиться в том, что переключатели рода работы и пределов измерения мультиметра базового модуля находятся в отжатом положении, кроме переключателя пределов измерения, который установлен в положении «200 мВ».
4. Включить базовый модуль в сеть.
5. Включить тумблер «Сеть» базового модуля.

6. Включить мультиметр и убедиться в том, что на дисплее отображаются цифры «000,0» или «000,1».

7. Установить переключатель измерительного модуля в положение « U_n » (см. рис. 3.2).

8. Включить универсальный блок питания базового модуля.

9. Рукоятками «Грубо» и «Точно» блока питания установить первое значение напряжения на нити по показаниям мультиметра. Определить напряжение на нити в вольтах, поделив показания мультиметра на 10 (мультиметр считывает показания не с нити, а с делителя напряжения на пределе 200 мВ). При умножении на 100 получаем падение напряжения именно на нити в милливольтах. Полученное значение нужно поделить на 1000, чтобы перевести в вольты. Поэтому показания мультиметра сразу можно делить на 10, чтобы записать значение падения напряжения в таблицу в вольтах. Величина первого значения U_n задается преподавателем. Внести показания мультиметра в табл. 3.1.

ВНИМАНИЕ! Запрещается подавать на нить напряжение более 8 В!

10. Установить переключатель измерительного модуля в положение « $U_{ш}$ » и не менее чем через 3 мин определить величину падения напряжения ($U_{ш}$) на образцовом сопротивлении ($R_{ш}$) (поделив на 1000 показания мультиметра, получить значение напряжения в вольтах). Результаты измерений внести в табл. 3.1.

11. Используя закон Ома для участка цепи, определить силу тока, протекающего по нити, и сопротивление нити по формулам (3.18) и (3.21) соответственно. Зная напряжение на нити (U_n), вычислить выделяющуюся на нити мощность по формуле (3.17). Результаты вычислений внести в табл. 3.1.

12. Используя экспериментальные данные и параметры установки, определить температуру нити по шкале Цельсия (t_n) и Кельвина (T_n) по формулам (3.20) и (3.22) соответственно. Результаты вычислений внести в табл. 3.1.

13. Повторить пп. 9–12 для рекомендованных преподавателем значений напряжения на нити, подаваемых с блока питания, выдерживая каждый раз одно и то же время перед записью $U_{ш}$ (не менее 3 мин). Рекомендуется провести 8–10 измерений.

14. Снять напряжение на блоке питания поворотом ручек «Грубо» и «Точно» против часовой стрелки до упора. Выключить блок питания, мультиметр, измерительный и базовый модули.

15. Используя данные табл. 3.1, построить на миллиметровой бумаге график зависимости $P = f(T_n)$, для чего провести аппроксимирующую кривую через совокупность экспериментальных точек.

16. Для каждого значения T_n графически определить производную $\frac{dP}{dT_n}$, для чего провести в соответствующих точках касательные к кривой и определить тангенс угла наклона каждой из них.

17. Рассчитать по формуле (3.16) коэффициент теплопроводности для каждого значения T_n и внести полученные результаты в табл. 3.1.

18. Сделать выводы по работе.

Таблица 3.1

Результаты измерений и вычислений

№	U_n , В	$U_{ш}$, В	I_n , А	R_n , Ом	T_n , К	P , Вт	$\frac{dP}{dT_n}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{К}}$	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
1								
2								
3								
...								

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое термодинамически неравновесные системы? Что такое необратимые процессы? Что такое явления переноса? Перечислите явления переноса.

2. Какие виды теплообмена существуют в природе? Охарактеризуйте их. Приведите примеры явления теплопроводности, реализуемые в природе и в быту.

2. Сформулируйте закон Фурье. Дайте определение понятию «градиент температуры».

3. От каких макроскопических параметров среды зависит ее коэффициент теплопроводности?

4. Объяснить физический смысл коэффициента теплопроводности.

5. Какая методика определения коэффициента теплопроводности используется в настоящей работе?

6. Выведите формулу (3.16).

7. Охарактеризуйте температурную зависимость $\lambda(T)$. Как она соотносится с теоретическими сведениями о температурной зависимости достаточно разреженных газов?

8. Какие физические явления вносят погрешность в методику определения коэффициента теплопроводности, использованную в данной работе?

9. Используя законы молекулярно-кинетической теории газов, выведите формулу коэффициента теплопроводности (3.5).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель – экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса.

Теоретические основы работы

Внутреннее трение (вязкость) – свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление при перемещении одной их части относительно другой. Рассмотрим схему вязкого ламинарного (слоистого) течения слоя жидкости, заключенного между параллельными пластинами (рис. 4.1). Пусть нижняя пластина неподвижна, а верхняя – движется горизонтально вправо со скоростью \vec{v}_0 . Тогда в жидкости возникает течение со скоростью $v = v(z)$.

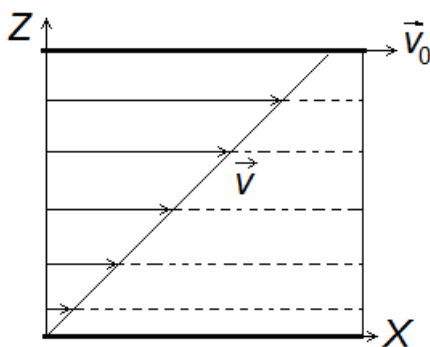


Рис. 4.1. Профиль скорости движения жидкости между двумя параллельными пластинами

Закон вязкого трения, установленный И. Ньютоном, имеет вид

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S, \quad (4.1)$$

где F – касательная сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости друг относительно друга; η – коэффициент внутреннего трения жидкости, Па·с; $\frac{dv}{dz}$ – градиент скорости течения; S – площадь слоя, по которому происходит сдвиг.

В результате внутреннего трения происходит ускорение медленно движущихся соседних слоев жидкости.

Коэффициент внутреннего трения жидкости (η) иногда называют вязкостью жидкости, или динамической вязкостью. В СИ единицей измерения динамической вязкости является паскаль-секунда (Па·с), в СГС – пуаз (П). Также применяется понятие «кинематическая вязкость» (ν):

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

где ρ – плотность вещества.

В СИ кинематическая вязкость измеряется в квадратных метрах в секунду ($\text{м}^2/\text{с}$), в СГС – в стоксах (Ст).

В условиях установившегося ламинарного течения при постоянной температуре коэффициент внутреннего трения жидкости практически не зависит от градиента скорости.

Вязкость жидкостей (в отличие от вязкости газов) обусловлена в основном межмолекулярным взаимодействием, ограничивающим подвижность молекул. В настоящее время еще не существует адекватной теории вязкости жидкости, поэтому коэффициенты внутреннего трения определяются экспериментально.

Одним из методов экспериментального определения коэффициента внутреннего трения (вязкости) жидкости является **метод Стокса**.

При движении тела в жидкости на тело действует сила сопротивления. Английский математик Дж. Стокс (1819–1903) вывел формулу для определения силы сопротивления, действующей на шар, движущийся в жидкости поступательно и с постоянной скоростью. **Формула Стокса** имеет вид [4]

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (4.2)$$

где F – сила сопротивления жидкости при движении шара; η – коэффициент внутреннего трения; r – радиус шара; v – скорость поступательного движения шара.

Отметим, что формула Стокса справедлива лишь при условии, что при движении шара не возникает турбулентности (завихрения) жидкости. Движение прилегающих к шару слоев жидкости должно быть ламинарным.

Это условие выполняется при

$$\text{Re} = \frac{\rho v r}{\eta} \ll 1, \quad (4.3)$$

где Re – число Рейнольдса (один из так называемых критериев подобия); ρ – плотность жидкости.

Отметим, что критерии подобия дают возможность подбирать оптимальные условия эксперимента; они широко используются в гидродинамике, явлениях переноса, теории теплопередачи и др. Критерии подобия дают правила пересчета с модели на натурную конструкцию для явлений, в которых необходимо учитывать большое число факторов.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 4.2) представляет собой измерительный модуль, смонтированный в стандартном корпусе I .

Снаружи корпуса I установлены два цилиндрических стеклянных сосуда 4 с исследуемыми жидкостями. Сверху на каждый сосуд надеты обтюраторы 2 , которые служат для направления движения шарика по оси симметрии сосудов.

Между сосудами расположена шкала, по которой могут перемещаться верхний и нижний указатели, закрепленные с помощью фиксаторов 3 . Расстояние между указателями определяется с помощью шкалы и равно L . Для удобства работы жидкость в сосудах может быть освещена с помощью системы подсветки, включаемой выключателем $б$.

В сосуд опускают небольшой шарик, плотность (ρ_1) которого больше плотности жидкости (ρ_2).

Диаметр шарика предварительно измеряют с помощью штангенциркуля или микрометра. Расстояние между поверхностью жидкости и верхним указателем подбирается так, чтобы на этом участке скорость шарика стабилизировалась; при этом на участке от верхнего до нижнего указателей движение шарика будет происходить с постоянной скоростью v .

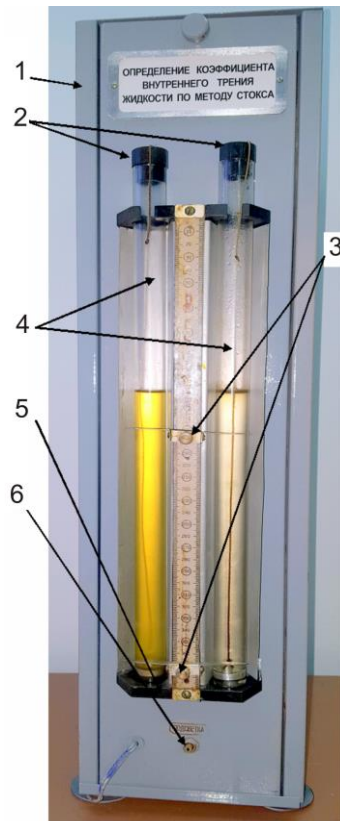


Рис. 4.2. Внешний вид и органы управления измерительного модуля:

1 – корпус; 2 – обтураторы; 3 – фиксаторы верхнего и нижнего указателей; 4 – стеклянные цилиндры с исследуемыми жидкостями; 5 – держатель цилиндров; 6 – выключатель подсветки жидкости

Рассмотрим силы, действующие на шарик, движущийся с постоянной скоростью (v) в вязкой жидкости:

– сила тяжести, направленная вниз:

$$F_1 = \rho_1 g V_0,$$

где V_0 – объем шарика,

– сила Архимеда, направленная вверх:

$$F_2 = \rho_2 g V_0;$$

– сила Стокса F , направленная вверх.

Условие постоянства скорости шарика v (в проекции на вертикальную ось):

$$F_1 - F_2 - F = 0. \quad (4.4)$$

Подставляя в соотношение (4.4) выражения для сил F_1 , F_2 и F из формулы (4.2), а также учитывая, что объем шара (V_0) равен

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{1}{6} \pi d^3, \quad (4.5)$$

где d – диаметр шара, получим выражение для коэффициента внутреннего трения жидкости (η):

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot (\rho_1 - \rho_2) \cdot \frac{gd^2}{v}. \quad (4.6)$$

Установившуюся скорость движения шарика (v) на участке от верхнего до нижнего указателей (см. рис. 4.2) найдем по формуле

$$v = \frac{L}{\tau}, \quad (4.7)$$

где τ – время движения шарика между верхним и нижним указателями.

Из формул (4.6) и (4.7) получим формулу для определения коэффициента внутреннего трения жидкости:

$$\eta = \frac{1}{18} (\rho_1 - \rho_2) \cdot gd^2 \cdot \frac{\tau}{L}. \quad (4.8)$$

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Записать данные установки и условия опыта:

– плотность материала шариков: $\rho_1 = \dots$; $\Delta\rho_1 = \dots$;

– плотность жидкости 1: $\rho_2 = \dots$; $\Delta\rho_2 = \dots$;

– плотность жидкости 2: $\rho_2 = \dots$; $\Delta\rho_2 = \dots$;

– ускорение силы тяжести: $g = \dots$; $\Delta g = \dots$;

Данные берутся из таблиц приложения;

– расстояние между верхним и нижним указателями (см. рис. 4.2): $L = \dots$;
 $\Delta L = \dots$;

– температура жидкости: $T = \dots$; $\Delta T = \dots$;

– доверительная вероятность: $P = \dots$ (задается преподавателем).

2. Определить температуру (T_k) воздуха в лаборатории (жидкость имеет температуру, равную температуре T_k).

3. Измерить диаметр шарика (d) с помощью микрометра. Измерения следует проводить не менее трех раз; шарик при этом необходимо поворачивать, т. к. его форма может отличаться от сферической. Если отличия значительны, такой шарик следует забраковать. Результаты измерений внести в табл. 4.1.

Рассчитать среднее значение диаметра данного шарика (d_{cp}). Результаты вычислений внести в табл. 4.1.

4. Аккуратно отпустить шарик в сосуд через отверстие в obtюраторе как можно ближе к оси симметрии.

5. Секундомером измерить время (τ) прохождения шариком расстояния между верхним и нижним указателями. Важно следить, чтобы в моменты включения и выключения секундомера глаз наблюдателя располагался на уровне соответствующего (верхнего или нижнего) указателя. Результаты измерений внести в табл. 4.1.

6. Повторить пп. 3–5 для пяти шариков.

7. По формуле (4.8) рассчитать коэффициент внутреннего трения жидкости для каждого опыта. Результаты расчетов внести в табл. 4.2.

8. Сопоставить численное значение полученного коэффициента вязкости с табличным значением.

9. Методом Стьюдента рассчитать погрешности определения коэффициента внутреннего трения. Результаты вычислений внести в табл. 4.2.

10. Сделать выводы по работе.

Таблица 4.1

Результаты измерений

№	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$	$d_3, \text{мм}$	$d_4, \text{мм}$	$d_5, \text{мм}$	$\tau_1, \text{с}$	$\tau_2, \text{с}$	$\tau_3, \text{с}$	$\tau_4, \text{с}$	$\tau_5, \text{с}$
1										
2										
3										
Ср										

Таблица 4.2

Результаты вычислений

№	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\Delta\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	$S_\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	t_{PN}	$\delta\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\varepsilon_\eta, \%$	$\eta \pm \delta\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
1							
2							
3							
4							
5							
Ср							

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое идеальная жидкость?
2. Дайте определение понятию «внутреннее трение».
3. Запишите закон Ньютона для внутреннего трения.
4. Объясните понятие градиента упорядоченной скорости жидкости.
5. Какие силы действуют на шарик при его движении в жидкости?
6. Выведите формулу коэффициента внутреннего трения жидкости (4.8).
7. Как зависит скорость равномерного движения шарика в жидкости от:
а) плотности жидкости; б) плотности шарика; в) динамической вязкости;
г) диаметра шарика? Запишите зависимости скорости от этих величин.
8. Почему метод Стокса не применяется для определения коэффициента внутреннего трения воздуха?
9. Зависит ли коэффициент внутреннего трения жидкости от температуры? Проанализируйте данные Вашего повседневного опыта. Объясните эту зависимость с молекулярно-кинетической точки зрения.
10. Дайте определения понятиям «ламинарное течение» и «турбулентное течение». В чем состоит их разница?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Цели – экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воздуха методом Пуазейля; определение средней длины свободного пробега молекул воздуха.

Теоретические основы работы

В потоке газа молекулы участвуют одновременно в двух движениях: хаотическом тепловом, средняя скорость которого равна $\langle v \rangle$, и упорядоченном движении со скоростью потока U . Скорость U намного меньше, чем $\langle v \rangle$. Предположим, что имеются два соприкасающихся слоя газа, движущихся параллельно друг другу со скоростями U_1 и U_2 , имеющими одинаковое направление. Пусть в некоторый момент времени слои обладают импульсами p_1 и p_2 . Если никакого

внешнего воздействия на слои не оказывается, их импульсы не могут оставаться неизменными, так как вследствие теплового движения происходит непрерывный переход молекул из одного слоя в другой. Попав в другой слой, молекула сталкивается с молекулами этого слоя, в результате чего она либо отдает избыток своего импульса другим молекулам (если она прилетела из слоя, движущегося быстрее), либо увеличивает свой импульс за счет других молекул (если она прилетела из слоя, движущегося медленнее). В итоге импульс слоя, движущегося быстрее, убывает, а импульс слоя, движущегося медленнее, возрастает. Следовательно, слои ведут себя так, как если бы к слою, скорость которого больше, была приложена сила, тормозящая его движение, а к слою, скорость которого меньше, – такая же по модулю сила, ускоряющая его движение. Таков механизм возникновения сил внутреннего трения. Сила трения (F), действующая на участок поверхности плоского слоя площадью S , выражается **законом Ньютона для внутреннего трения**:

$$F = \eta \left| \frac{dU}{dx} \right| S, \quad (5.1)$$

где η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость, или вязкость); $\frac{dU}{dx}$ – градиент скорости упорядоченного движения, т. е. величина, показывающая, как быстро изменяется скорость течения газа в направлении оси Ox , перпендикулярной к направлению движения слоев; S – площадь, на которую действует сила F .

Из молекулярно-кинетической теории идеального газа вытекает следующее выражение для коэффициента внутреннего трения:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle, \quad (5.2)$$

где ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул идеального газа; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул.

Средняя арифметическая скорость теплового движения молекул идеального газа ($\langle v \rangle$) определяется по формуле

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}},$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – температура газа; μ – молярная масса.

Средняя длина свободного пробега молекул ($\langle l \rangle$) определяется по формуле

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\sigma_{\text{эфф}}n}, \quad (5.3)$$

где $\sigma_{\text{эфф}}$ – эффективное сечение соударения; n – концентрация молекул.

Рассмотрим ламинарное течение газа в капилляре радиусом r_0 (рис. 5.1). Наличие сил внутреннего трения приводит к возникновению градиента скорости упорядоченного движения $\frac{dU}{dr}$.

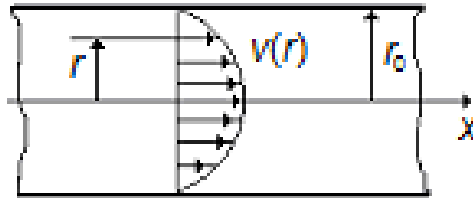


Рис. 5.1. Профиль скорости газа, движущегося в круговой цилиндрической трубе

Принимая ось капилляра за ось Ox , направленную в сторону течения, выделим в капилляре произвольную бесконечную короткую цилиндрическую часть длиной dx и радиусом r (рис. 5.2). На ее боковую поверхность в направлении движения действует касательная сила вязкости:

$$dF = 2\pi r \cdot \eta \frac{dU}{dr} \cdot dx. \quad (5.4)$$

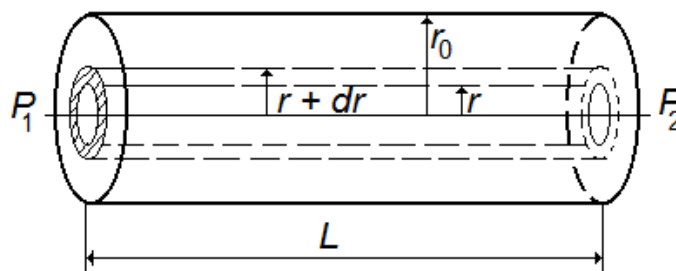


Рис. 5.2. К расчету коэффициента внутреннего трения

Кроме того, на основания цилиндра в том же направлении действует сила разности давлений:

$$dF_1 = \pi r^2 [P(x) - P(x + dx)] = -\pi r^2 \frac{dP}{dx} dx. \quad (5.5)$$

При стационарном течении сумма этих двух сил должна обращаться в нуль. Тогда

$$2\eta \frac{dU}{dr} = r \frac{dP}{dx}. \quad (5.6)$$

Скорость $U(r)$, а с ней и производная $\frac{dU}{dr}$ не меняются с изменением x . Поэтому должна быть постоянной и производная $\frac{dP}{dx}$, причем эта производная должна быть равна

$$\frac{(P_2 - P_1)}{L},$$

где P_1 – давление на входе капилляра; P_2 – давление на выходе капилляра; L – длина капилляра.

В результате приходим к уравнению

$$\frac{dU}{dr} = \frac{(P_2 - P_1) \cdot r}{2\eta L}. \quad (5.7)$$

Интегрируя уравнение (5.7), получаем

$$U = \frac{(P_2 - P_1)r^2}{4\eta L} + C. \quad (5.8)$$

Постоянная интегрированная (C) определяется из условия, что на стенке капилляра, т. е. при $r = r_0$ скорость (U) должна обращаться в нуль. Тогда

$$U = \frac{(P_1 - P_2)(r_0^2 - r^2)}{4\eta L}. \quad (5.9)$$

Найдем теперь объем воздуха, протекающего через капилляр за время Δt . Через кольцевую площадку с внутренним радиусом r и внешним радиусом $(r + dr)$ за время Δt вытечет объем газа, равный

$$dV = U\Delta t 2\pi r dr.$$

Подставляя сюда выражение (5.9) и интегрируя по всей площади поперечного сечения капилляра (от $r = 0$ до $r = r_0$), получаем

$$V = \frac{\pi(P_1 - P_2)}{2\eta L} \Delta t \int_0^{r_0} (r_0^2 - r^2) \cdot r dr = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r_0^4 \Delta t \pi}{8\eta L}. \quad (5.10)$$

Формула (5.10) называется **формулой Пуазейля**. Из нее можно выразить коэффициент внутреннего трения (вязкость) воздуха:

$$\eta = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r_0^4 \Delta t \pi}{8VL}. \quad (5.11)$$

Из выражения (5.2) получаем выражение для средней длины свободного пробега молекулы

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle}. \quad (5.12)$$

Учитывая выражение для средней скорости теплового движения молекул $\langle v \rangle$ и выражая плотность газа из уравнения Менделеева – Клапейрона, получаем

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle} = \frac{3\eta RT}{p_0 \mu} \sqrt{\frac{\pi \mu}{8RT}} = 3 \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{\eta}{p_0} \sqrt{\frac{RT}{\mu}} = 1,88 \frac{\eta}{p_0} \sqrt{\frac{RT}{\mu}}, \quad (5.13)$$

где μ – молярная масса воздуха; T – температура воздуха; p_0 – атмосферное давление.

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из базового и измерительного модулей. Измерительный модуль соединен с базовым модулем пневмопроводом.

Базовый модуль (рис. 5.3) предназначен для питания измерительных модулей постоянным электрическим током с регулировкой величины выходного напряжения, измерения напряжений и токов на элементах измерительных модулей и питания измерительных модулей сжатым воздухом. Базовый модуль состоит из универсального блока питания 7 с органами управления и контроля, компрессора 15, мультиметра 4 с органами управления. Все устройства смонтированы в настольном металлическом корпусе башенного типа. Питающие напряжения УБП, а также входные разъемы мультиметра подключены к штекерному разъему, установленному на задней стенке корпуса. Там же установлен штуцер подачи сжатого воздуха. Блок подключается к сети переменного тока 220 В, 50 Гц с помощью шнура с вилкой.

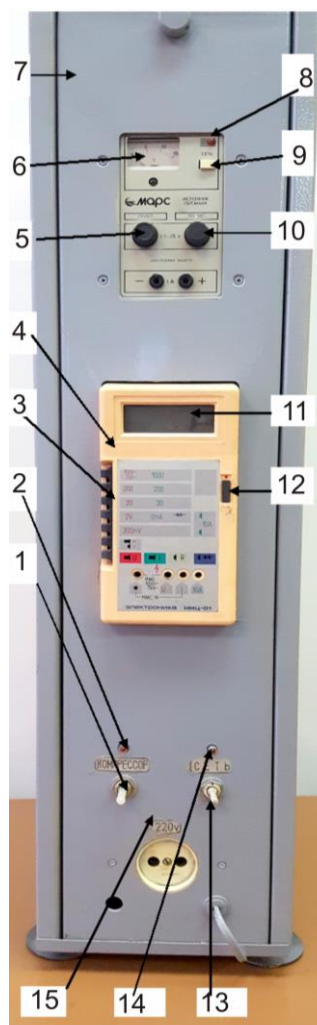


Рис. 5.3. Внешний вид и органы управления базового модуля:

1 – включатель питания компрессора; 2 – индикатор включения компрессора; 3 – переключатели пределов измерения и рода работы мультиметра; 4 – мультиметр; 5 – регулятор напряжения «Грубо»; 6 – вольтметр УБП; 7 – УБП; 8 – индикатор включения УБП; 9 – включатель питания УБП; 10 – регулятор напряжения «Точно»; 11 – дисплей мультиметра; 12 – включатель питания мультиметра; 13 – включатель питания базового модуля; 14 – индикатор включения питания базового модуля; 15 – компрессор

Измерительный модуль (рис. 5.4) предназначен для получения экспериментальных данных исследуемого процесса и представляет собой стандартный корпус *I*, в котором смонтирована экспериментальная установка.

При проведении измерений открывают клапан *K1* 4, и вода, находящаяся во вспомогательной емкости, перетекает по соединительному трубопроводу в мерную емкость, вытесняя из нее воздух. Вытесненный воздух по выпускному трубопроводу, клапану *K1* и тройнику подается в капилляр и через него выходит в атмосферу. Давление воздуха на входе в капилляр измеряется с помощью *U*-образного водяного манометра 2 со шкалой 3. Объем перетекшей из вспомогательной емкости в мерную емкость воды и, соответственно, объем вытеснен-

ного через капилляр воздуха измеряется с помощью уровнемера 5 по шкале 6. Время, за которое был вытеснен данный объем воздуха, фиксируется с помощью секундомера. Для повторения опыта закрывают клапан К1 и открывают впускной клапан К2 7. Воздух, подаваемый от компрессора базового модуля, вытесняет воду из мерной емкости обратно во вспомогательную емкость. Уровень воды в мерной емкости также контролируется с помощью уровнемера 5.

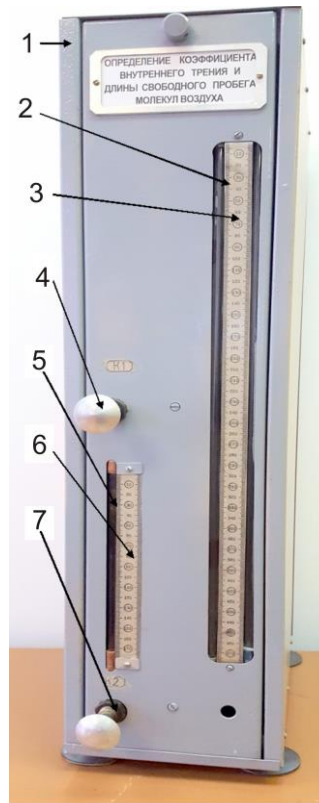


Рис. 5.4. Внешний вид и органы управления измерительного модуля:

1 – корпус; 2 – U-образный манометр; 3 – шкала U-образного манометра; 4 – выпускной клапан К1; 5 – уровнемер; 6 – шкала уровнемера; 7 – впускной клапан К2

Порядок выполнения работы

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке [1]:

1. Определить параметры элементов экспериментальной установки и условия опытов:

- длина капилляра: $L = 61$ мм; $\Delta L = \dots$;
- радиус капилляра: $r_0 = 0,475$ мм; $\Delta r_0 = \dots$;
- площадь основания мерной емкости: $S = 70$ см²; $\Delta S = \dots$;
- атмосферное давление: $P_0 = \dots$ кПа; $\Delta P_0 = \dots$;
- температура воздуха: $T = \dots$ К; $\Delta T = \dots$;

– доверительная вероятность: $P = \dots$ (задается преподавателем).

2. Убедиться в том, что все органы управления базового модуля находятся в исходном состоянии и все приборы выключены.

3. Включить в сеть базовый модуль. Включить выключатель питания базового модуля (см. рис. 5.3).

4. Включить компрессор базового модуля выключателем «Компрессор».

5. Нажать на впускной клапан К2 измерительного модуля (см. рис. 5.4) и вытеснить воду из мерной емкости во вспомогательную емкость, контролируя ее уровень по уровнемеру. Воду перекачивать до тех пор, пока ее уровень не достигнет нижней отметки шкалы уровнемера.

6. Закрыть клапан К2 и выключить компрессор.

7. Открыть выпускной клапан К1 (см. рис. 5.4). Через равные промежутки времени Δt , указанные преподавателем, отмечать разность уровней в коленах манометра и в мерной емкости в начальный (t_1) и конечный (t_2) моменты времени. Измерения проводить до тех пор, пока уровень воды в мерной емкости не достигнет верхней отметки шкалы уровнемера. Закрыть клапан К1.

8. Для каждого интервала времени Δt определить разность давлений на концах капилляра по U-образному манометру. Поскольку разность давлений в момент включения и выключения секундомера различна, то в расчетах необходимо использовать среднюю разность давлений за время (Δt) проведения опыта:

$$\Delta h_{\text{cp}} = \frac{\Delta h(t_1) + \Delta h(t_2)}{2}; \quad (5.14)$$

$$(P_1 - P_2)_{\text{cp}} = \Delta h_{\text{cp}} \rho_0 g, \quad (5.15)$$

где Δh – разность уровней воды в коленах U-образного манометра; ρ_0 – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

Примечание. Для уменьшения методической погрешности эксперимента рекомендуется проводить измерения, указанные в п. 7, спустя некоторое время после нажатия на клапан К1, когда разность давлений на концах капилляра и, соответственно, разность уровней воды (Δh) в коленах манометра за время Δt будут изменяться незначительно.

9. Определить объем воздуха (V), вытесненного через капилляр за каждый промежуток времени Δt , по формуле

$$V = \Delta l S, \quad (5.16)$$

где Δl – разность уровней воды в уровнемере в моменты времени t_1 и t_2 ; S – площадь основания мерной емкости.

10. Для каждого интервала Δt определить вязкость (η) и среднюю длину свободного пробега молекул воздуха ($\langle l \rangle$) по формулам (5.11) и (5.13) соответственно.

11. Показания приборов и рассчитанные значения физических величин внести в табл. 5.1 и 5.2 .

12. Записать результаты с учетом погрешности измерений, определенной по методу Стьюдента.

13. Сравнить полученные результаты с табличными и сделать выводы по работе.

Таблица 5.1

Результаты измерений коэффициента внутреннего трения воздуха

№ п/п	Δl , м	$\Delta h_{\text{ср}}$, м	$(\rho_1 - \rho_2)$, Па	Δt , с	V , м ³	η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с	S_{η} , Па·с	$t_{\text{рп}}$	δ_{η} , Па·с	ε_{η} , %	$\eta \pm \delta_{\eta}$, Па·с
1												
2												
...												
Ср												

Таблица 5.2

Результаты измерений длины свободного пробега молекул воздуха

№ п/п	$\langle l \rangle$, м	$\Delta \langle l \rangle$, м	$S_{\langle l \rangle}$, м	$t_{\text{рп}}$	$\delta_{\langle l \rangle}$, м	$\varepsilon_{\langle l \rangle}$, %	$\lambda \pm \delta_{\langle l \rangle}$, м
1							
2							
...							
Ср							

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните явление внутреннего трения с точки зрения молекулярно-кинетической теории идеального газа.
2. Запишите закон Ньютона для внутреннего трения.
3. Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения?
4. От каких макроскопических параметров и свойств газа зависит коэффициент внутреннего трения?

5. Выведите уравнение коэффициента внутреннего трения (5.2), пользуясь законами молекулярно-кинетической теории идеального газа.

6. Как определяется средняя длина свободного пробега молекул идеального газа? Дайте определение понятию «эффективное сечение соударения молекул». Выведите формулу средней длины свободного пробега молекул воздуха (5.13).

7. Оцените теоретическое значение длины свободного пробега молекул воздуха в условиях эксперимента, если эффективное значение соударений для воздуха $\sigma_{\text{эфф}} = 7 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$.

8. Выведите формулу Пуазейля. Какие при этом накладываются условия на характер течения газов в капилляре?

9. Чем обусловлена погрешность измерений в заданном эксперименте?

10. Почему коэффициент внутреннего трения у жидкостей убывает с температурой, а у газов возрастает?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ОЛОВА

Цели – определение изменения энтропии при фазовом переходе первого рода на примере кристаллизации олова из расплава при его охлаждении; определение удельной теплоты кристаллизации олова из закона сохранения энергии.

Теоретические основы работы

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 плавления.

В процессе кристаллизации упорядочивается движение частиц жидкости, постепенно прекращается перемещение молекул, возникают связанные тепловые колебания относительно узлов кристаллической решетки.

Для начала кристаллизации необходимо, чтобы в жидкости имелись **центры кристаллизации** – неоднородности, вокруг которых начинается процесс образования твердой фазы. Если в жидкости отсутствуют центры кристаллизации, то

она может быть охлаждена до температуры, более низкой, чем температура кристаллизации. В обычных условиях этого, как правило, не происходит.

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

$$\lambda_{\text{кр}} = (U_{\text{тв}} - U_{\text{ж}}) + p(V_{\text{тв}} - V_{\text{ж}}), \quad (6.1)$$

где $U_{\text{тв}}$, $U_{\text{ж}}$ – внутренняя энергия единицы массы в твердом и жидком состояниях; p – давление в процессе кристаллизации; $V_{\text{тв}}$, $V_{\text{ж}}$ – удельный объем твердой и жидкой фазы соответственно.

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

$$\lambda_{\text{кр}} \approx U_{\text{тв}} - U_{\text{ж}}. \quad (6.2)$$

Хотя количество тепла является функцией процесса, при равновесных процессах его можно выразить через изменение функции состояния, называемой **энтропией**. Понятие энтропии впервые было введено немецким физиком Р. Клаузиусом (1822–1880) в 1862 г. Оказалось, что при равновесной теплопередаче малое количество тепла равно

$$\delta Q = TdS, \quad (6.3)$$

где dS – малое изменение энтропии тела.

Из выражения (6.3) следует, что энтропия измеряется в единицах теплоемкости.

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

$$dS = \frac{\delta Q}{T}. \quad (6.4)$$

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

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}, \quad (6.5)$$

где δQ – элементарное количество теплоты, полученное или отданное при бесконечно малом изменении параметров термодинамической системы; T – температура.

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

$$Q = \lambda_{\text{кр}} m_o, Q < 0, \quad (6.6)$$

где m_o – масса олова.

Из выражений (6.5) и (6.6) следует, что

$$(S_2 - S_1) = \frac{\lambda_{\text{кр}} m_o}{T_{\text{кр}}}$$

или

$$(S_2 - S_1) = \frac{(U_{\text{тв}} - U_{\text{ж}}) \cdot m_o}{T_{\text{кр}}}. \quad (6.7)$$

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

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из базового модуля (см. рис. 5.3) и измерительного модуля (рис. 6.1). Измерительный модуль подключен к базовому модулю с помощью соединительного кабеля.

Измерительный модуль предназначен для получения экспериментальных данных исследуемого процесса и представляет собой стандартный корпус 1, в котором смонтирована экспериментальная установка.

Ампула с исследуемым веществом (в данном случае с оловом) установлена в держателе 3 и может по направляющей 2 опускаться в нагреватель ампулы либо подниматься из него в верхнее положение. Для фиксации ампулы в нагревателе или в верхнем положении служит фиксатор 4. Для определения температуры олова служит хромель-копелевая дифференциальная термопара, горячий спай которой находится в защитной трубке-чехле, находящейся в олове, а холодный спай находится в воздухе. Возникающая при нагреве горячего спая контактная термо-ЭДС измеряется с помощью милливольтметра базового модуля.

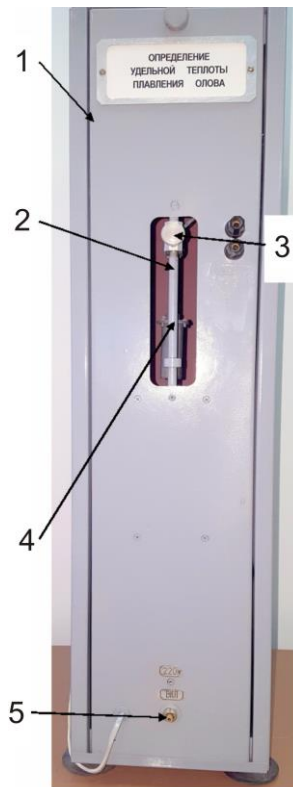


Рис. 6.1. Внешний вид и органы управления измерительного модуля:

1 – корпус, 2 – направляющая, 3 – держатель ампулы, 4 – фиксатор, 5 – выключатель нагрева ампулы

Простейшей моделью охлаждения тела является охлаждение в среде с постоянной температурой ($T_{\text{ср}}$) (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 [2]:

$$(c_o m_o + c_a m_a) \cdot dT + \alpha F (T - T_{\text{ср}}) \cdot dt = 0, \quad (6.8)$$

где $(c_o m_o + c_a m_a) \cdot dT < 0$ – количество теплоты, отданное телом среде при его охлаждении за время dt ; $\alpha F (T - T_{\text{ср}}) \cdot dt > 0$ – количество теплоты, полученное окружающей средой через поверхность ампулы площадью F за время dt ; c_o , c_a – удельные теплоемкости олова и материала ампулы; m_o , m_a – массы олова и ампулы; T – температура твердого олова; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи с поверхности ампулы в окружающую среду.

В дальнейшем будем считать, что значение α в течение всего опыта постоянно. Применяя закон сохранения энергии к процессу кристаллизации олова, можно получить уравнение

$$\lambda_{\text{кр}} m_o + \alpha F(T_{\text{кр}} - T_{\text{сп}}) \cdot \Delta\tau = 0, \quad (6.9)$$

где $Q = \lambda_{\text{кр}} m_o$ – количество теплоты, отданное оловом при его кристаллизации за время кристаллизации $\Delta\tau$; $\alpha F(T_{\text{кр}} - T_{\text{сп}}) \cdot \Delta\tau > 0$ – количество теплоты, полученное окружающей средой через поверхность ампулы за время кристаллизации.

Из соотношений (6.8) и (6.9) следует

$$\lambda_{\text{кр}} = (c_o m_o + c_a m_a) \cdot \frac{\Delta\tau}{m_o} \cdot \frac{(T_{\text{кр}} - T_{\text{сп}})}{(T - T_{\text{сп}})} \cdot \frac{dT}{dt}; \quad (6.10)$$

$$(S_2 - S_1) = \frac{\lambda_{\text{кр}} m_o}{T_{\text{кр}}}. \quad (6.11)$$

Следовательно, для определения $(S_2 - S_1)$ необходимо измерить температуру кристаллизации ($T_{\text{кр}}$), время кристаллизации ($\Delta\tau$), а также вычислить производную (dT/dt) функции $T = f(t)$ во время охлаждения твердого олова после полной кристаллизации. Эти величины можно найти, измеряя температуру олова в процессе охлаждения от полного расплава до температуры остывшего олова (T_o) в конце опыта.

Введем обозначения:

$$\Theta = T - T_{\text{сп}}; \quad (6.12)$$

$$\Theta_{\text{кр}} = T_{\text{кр}} - T_{\text{сп}}, \quad (6.13)$$

где Θ – разность между температурой олова и температурой окружающей среды, $\Theta_{\text{кр}}$ – разность между температурой кристаллизации и температурой окружающей среды.

Используя свойства дифференциалов, интегралов и применяя формулу (6.12), получаем

$$\frac{1}{(T - T_{\text{сп}})} \cdot \frac{dT}{dt} = \frac{d\ln(T - T_{\text{сп}})}{dt} = \frac{d\ln(\Theta)}{dt}. \quad (6.14)$$

Подставляя выражения (6.14) и (6.13) в формулу (6.10), получаем

$$\lambda_{\text{кр}} = (c_o m_o + c_a m_a) \cdot \frac{\Delta\tau}{m_o} \cdot \Theta_{\text{кр}} \cdot \frac{d\ln(\Theta)}{dt}. \quad (6.15)$$

После кристаллизации олова температура твердой фазы убывает по экспоненте, поэтому если на этом участке построить зависимость $\ln(\Theta) = f(t)$, то она будет линейной и график будет представлять собой прямую. Следовательно, тангенс угла наклона этой прямой будет равен производной $\frac{d\ln(\Theta)}{dt}$.

Реальный процесс охлаждения сопровождается явлениями, вносящими погрешность в определение $\lambda_{кр}$. Главными источниками погрешности являются:

- отклонение процесса от квазистатического;
- изменения температуры окружающей среды.

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

Порядок выполнения работ

Лабораторная работа выполняется в следующем порядке:

1. Выписать данные установки и условия проведения опыта:

- масса ампулы: $m_a = 49$ г ; $\Delta m_a = \dots$;
- материал ампулы: сталь
- удельная теплоемкость ампулы (сталь): $c_a = \dots$; $\Delta c_a = \dots$ (прил., табл. 5);
- масса олова: $m_o = 51$ г; $\Delta m_o = \dots$;
- удельная теплоемкость олова: $c_o = \dots$; $\Delta c_o = \dots$ (прил., табл. 5);
- материал термопары: хромель-копель;
- градуированная характеристика термопары (прил., табл. 12).

2. Убедиться в том, что все органы управления базового модуля находятся в исходном состоянии, а выключатели «Сеть», «Компрессор» универсального блока питания, выключатель мультиметра – в положении «Выключено» (см. рис. 5.3).

3. Включить базовый модуль в сеть.

4. Включить выключатель питания «Сеть» базового модуля.

5. Убедиться в том, что переключатели рода работы и пределов измерения мультиметра базового модуля находятся в отжатом положении, кроме переключателя пределов измерения, который должен находиться в положении «200 мВ».

6. Включить выключатель питания мультиметра.

7. Убедиться в том, что на дисплее мультиметра высвечиваются цифры «000,0» или «000,1».

8. Убедиться в том, что выключатель нагревателя ампулы измерительного модуля находится в положении «Выключен», а ампула с оловом установлена в верхнее положение (см. рис. 6.1).

9. Опустить ампулу с оловом в нижнее положение и зафиксировать ее с помощью фиксатора. Включить выключатель нагрева ампулы.

10. Нагреть ампулу до плавления олова, контролируя процесс нагрева по показаниям мультиметра. Процесс плавления олова происходит при постоянной температуре – температуре плавления ($T_{пл}$). При этом показания мультиметра практически не изменяются. Окончание процесса плавления можно определить как момент времени, после которого показания мультиметра начинают возрастать.

11. Через 2–3 мин после окончания процесса плавления олова (показания мультиметра при этом должны находиться в пределах 13,8–14,2 мВ) выключить нагреватель.

ВНИМАНИЕ! Запрещается нагревать ампулу до температуры более 210 °С, т. е. до $E > 15,4$ мВ.

12. Отвернуть фиксатор, поднять ампулу с оловом в крайнее верхнее положение и вновь зафиксировать ее с помощью фиксатора.

13. Включить секундомер и через каждые 10 с снимать показания мультиметра, фиксирующего термоЭДС, соответствующую разности температур олова и окружающей среды ($\Theta = T - T_{ср}$). Измерения продолжать до тех пор, пока не будут пройдены:

- область 1 – область полного расплава;
- область 2 – область кристаллизации;
- область 3 – область охлаждения твердого олова (рис. 6.2)

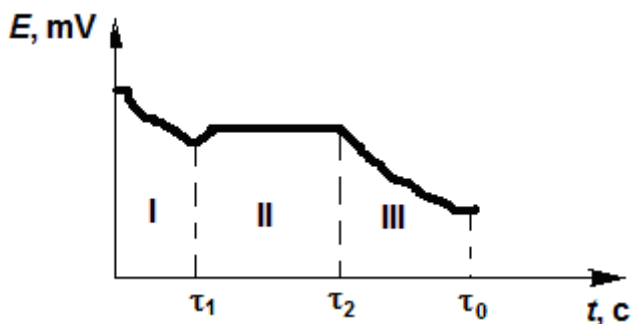


Рис. 6.2. Кривая охлаждения олова

14. Получив 40–50 экспериментальных точек, выключить мультиметр и стенд (показания мультиметра при этом будут находиться в пределах 4–5 мВ).

15. Результаты измерений внести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Результаты измерений и вычислений

№	E , мВ	$\Theta = T - T_{\text{ср}}$, К	t , с
1			
2			
...			
60			

Графическая обработка результатов измерений

Удельную теплоту кристаллизации ($\lambda_{\text{кр}}$) и измерение энтропии ($S_2 - S_1$) при кристаллизации олова можно определить графической обработкой экспериментальных данных в следующем порядке:

1. По данным измерений построить график (рис. 6.2) показаний мультиметра E как функцию от времени (t). Определить по графику время кристаллизации олова ($(\tau_2 - \tau_1) = \Delta\tau$).

2. Определить по лабораторному термометру температуру окружающей среды ($T_{\text{ср}}$), представив ее в градусах Кельвина.

3. Определить по прил., табл. 12 разность температур олова и окружающей среды в процессе охлаждения в соответствующие моменты времени (Θ). Результаты внести в табл. 6.1.

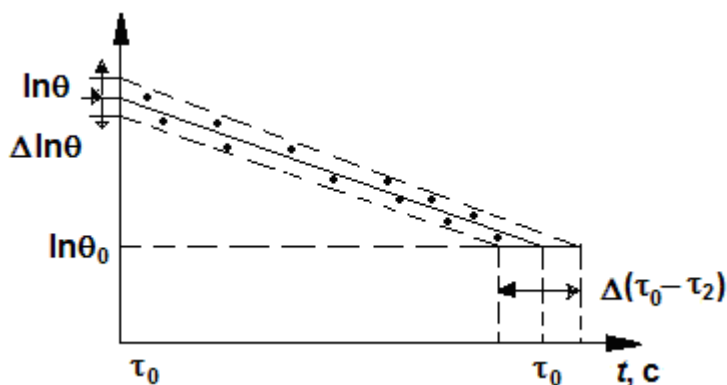


Рис. 6.3. Графическая обработка экспериментальных данных

4. Построить график зависимости $\ln\theta = f(t)$ для участка III (см. рис. 6.2), для участка II определить значение $\theta_{кр} = T_{кр} - T_{ср}$.

5. Провести аппроксимирующую прямую через экспериментальные точки на графике зависимости $\ln\theta = f(t)$ (см. рис. 6.3), определить тангенс угла наклона ($\operatorname{tg}\alpha$).

6. Тогда с учетом $\operatorname{tg}\alpha$ формула (6.15) примет вид

$$\lambda_{кр} = (c_0 m_0 + c_a m_a) \cdot \frac{\Delta\tau}{m_0} \cdot \theta_{кр} \operatorname{tg}\alpha. \quad (6.16)$$

Рассчитать удельную теплоту кристаллизации олова по формуле (6.16).

7. Рассчитать изменение энтропии при кристаллизации олова по формуле (6.11).

8. Считая, что относительные погрешности определения $\theta_{кр}$, m_0 , m_a , c_0 , c_a значительно меньше относительных погрешностей определения τ , $(\tau_0 - \tau_2)$, рассчитать абсолютную погрешность определения $\lambda_{кр}$ по формуле

$$\Delta\lambda_{кр} = \lambda_{кр} \cdot \sqrt{\left[\frac{\Delta(\tau_0 - \tau_2)}{(\tau_0 - \tau_2)} \right]^2 + \left[\frac{\Delta(\ln\theta)}{\ln(\theta)} \right]^2}. \quad (6.15)$$

Значения $\Delta(\tau_0 - \tau_2)$ и $\Delta(\ln\theta)$ определяются из графика на рис. 6.3, а значение $(\tau_0 - \tau_2)$ – из графика на рис. 6.2.

9. Сделать выводы по работе.

Контрольные вопросы и задания

1. Запишите первое начало термодинамики в применении к процессу кристаллизации.
2. Дайте определение понятию «энтропия».
3. Как изменяется энтропия в процессе кристаллизации?
4. Примените закон сохранения энергии к процессу кристаллизации олова.
5. Какой термодинамический процесс называется квазистатическим?
6. Что такое обратимый процесс?
7. Сформулируйте второй закон термодинамики.
8. Выведите формулу (6.16).
9. Как проводится графическая обработка результатов измерения?

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бондарев, Б. В. Курс общей физики : учебник : в 3 кн. Кн. 3. Термодинамика. Статистическая физика. Строение вещества / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин. – М. : Юрайт, 2016. – 369 с. – Режим доступа: <http://www.biblio-online.ru>. – Загл. с экрана.
2. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 18-е изд., стер. – М. : Академия, 2010. – 560 с.
3. Демидченко, В. И. Физика : учебник / В. И. Демидченко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ростов н/Д. : Феникс, 2012. – 573 с.
4. Савельев, И. В. Курс общей физики : учебник : в 3 т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. – СПб. : Лань, 2008. – 432 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Статистическая физика и термодинамика : лаб. практикум по физике / сост. Ю. Ф. Пугачев, Т. Н. Кодратова, В. В. Канонистов. – 2-е изд., стер. – Ульяновск : УВАУ ГА(И), 2009. – 58 с.
2. Механика и молекулярная физика. Лабораторный практикум : учеб. пособие по курсу «Физика» / С. В. Григорьев и др. – М. : МЭИ, 2017. – 144 с.
3. Матвеев, А. Н. Молекулярная физика : учеб. пособие для вузов / А. Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1981. – 400 с.
4. Ландау, Л. Д. Теоретическая физика : учеб. пособие для вузов : в 10 т. Т. VI. Гидродинамика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 5-е изд., стер. – М. : Физматлит, 2001. – 736 с.

Справочные таблицы

Таблица 1

Основные физические константы

Атомная единица массы	$1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная	$R = 8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Ускорение свободного падения на уровне моря и широте 0°	$g = 9,78030 \text{ м/с}^2$
Ускорение свободного падения на уровне моря и широте 45°	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Ускорение свободного падения на уровне моря и широте $54^\circ 19'$ (г. Ульяновск)	$g = 9,8145 \text{ м/с}^2$
Ускорение свободного падения на уровне моря и широте $55^\circ 45'$ (г. Москва)	$g = 9,81523 \text{ м/с}^2$
Ускорение свободного падения на уровне моря и широте 90°	$g = 9,83216 \text{ м/с}^2$
Нормальное атмосферное давление	$P_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$
Точка плавления льда	$273,15 \text{ К}$

Таблица 2

Греческий алфавит

Α α – альфа	Η η – эта	Ν ν – ню	Τ τ – тау
Β β – бета	Θ θ – тэта	Ξ ξ – кси	Υ υ – ипсилон
Γ γ – гамма	Ι ι – йота	Ο ο – омикрон	Φ φ – фи
Δ δ – дельта	Κ κ – каппа	Π π – пи	Χ χ – хи
Ε ε – эпсилон	Λ λ – ламбда	Ρ ρ – ро	Ψ ψ – пси
Ζ ζ – дзета	Μ μ – мю	Σ σ – сигма	Ω ω – омега

Таблица 3

Плотность некоторых твердых веществ при температуре 20 °С

Вещество	ρ , кг/м ³
Олово	7300
Сталь	7800
Свинец	10 300
Медь	8930

Таблица 4

Зависимость плотности стали ШХ15 (сталь для подшипников) от температуры

t , °С	ρ , кг/м ³
20	7812
100	7790
200	7750
300	7720
400	7680
500	7640

Таблица 5

Физические параметры чистых веществ при температуре 20 °С

Вещество	$T_{пл}$, К	$\lambda_{пл}$, Дж/кг	c , Дж/(кг·К)
Сталь	1812	227 000	492
Олово	504,9	59 600	220
Свинец	600	23 000	128

$T_{пл}$ – температура плавления;

$\lambda_{пл}$ – удельная теплота плавления и кристаллизации;

c – удельная теплоемкость.

Таблица 6

Физические параметры газов при температуре 20 °С

Вещество	c_p , Дж/(кг·К)	γ	η , 10 ⁻⁷ Па·с
Азот	1038	1,40	174
Воздух	999	1,40	181
Кислород	910	1,40	200

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении;

γ – показатель адиабаты;

η – коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость).

Таблица 7

Коэффициент внутреннего трения (динамическая вязкость) некоторых жидкостей [1]

$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	
	Касторовое масло	Глицерин
15	1,514	2,250
20	0,950	1,480
25	0,621	0,952
30	0,451	0,600

Таблица 8

Зависимость плотности и динамической вязкости касторового масла от температуры [2]

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
15	962,7	1,940
16	962,0	1,780
17	961,4	1,640
18	960,7	1,520
19	960,0	1,400
20	959,4	1,300
21	958,7	1,210
22	958,0	1,120
23	957,4	1,040
24	956,7	0,960
25	956,0	0,880

Таблица 9

Коэффициент теплопроводности воздуха (λ) при различных температурах

T, K	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{K}}$	T, K	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{K}}$
290	0,0248	330	0,0276
300	0,0255	340	0,0284
310	0,0262	360	0,0296
320	0,0269	370	0,0303

Таблица 10

Плотность воздуха (ρ) при различных температурах и давлениях, $\text{кг}/\text{м}^3$

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг}/\text{Па}$								
	96	97	98	99	100	101	101,3	102	103
16	1,157	1,169	1,181	1,193	1,205	1,217	1,221	1,229	1,241
18	1,149	1,161	1,173	1,185	1,200	1,209	1,212	1,221	1,232

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кПа}$								
	96	97	98	99	100	101	101,3	102	103
20	1,141	1,153	1,165	1,177	1,188	1,200	1,204	1,212	1,224
22	1,133	1,145	1,157	1,169	1,180	1,192	1,196	1,204	1,216
24	1,126	1,137	1,149	1,161	1,172	1,184	1,188	1,196	1,208
26	1,118	1,130	1,141	1,153	1,165	1,176	1,180	1,188	1,200
28	1,111	1,122	1,134	1,145	1,157	1,168	1,172	1,180	1,192
30	1,103	1,115	1,126	1,138	1,149	1,161	1,164	1,172	1,184
32	1,096	1,107	1,119	1,130	1,142	1,153	1,157	1,165	1,176
34	1,185	1,198	1,210	1,222	1,235	1,247	1,251	1,259	1,272

Соотношения между единицами давления

1 мм рт. ст. = 133,3 Па = 1 Тор = 13,33 мм вод. ст.

1 мм вод. ст. = 10 Па.

1 атм. = $1,013 \cdot 10^5$ Па = $1,013 \cdot 10^4$ мм вод. ст.

1 бар = 10^5 Па.

1 атм. = 760 мм рт. ст.

Таблица 11

Значение коэффициента $t_{P,n}$ для случайной величины, имеющей распределение Стьюдента

n	P		
	0,90	0,95	0,99
2	2,920	4,303	9,925
3	2,353	3,183	5,841
4	2,132	2,776	4,604
5	2,015	2,571	4,032
6	1,943	2,447	3,707
7	1,895	2,365	3,499
8	1,860	2,306	3,355
9	1,833	2,262	3,250
10	1,645	1,960	2,576

P – доверительная вероятность;

n – число экспериментов.

Градуировочная характеристика хромель-копелевой термопары
(по СТ СЭВ 1059-78)

t, °C	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,581
10	0,646	0,711	0,776	0,841	0,907	0,973	1,039	1,105	1,171	1,237
20	1,303	1,370	1,437	1,504	1,571	1,638	1,705	1,772	1,840	1,908
30	1,976	2,044	2,112	2,180	2,248	2,316	2,384	2,452	2,520	2,589
40	2,658	2,727	2,796	2,865	2,934	3,003	3,072	3,141	3,210	3,280
50	3,350	3,420	3,490	3,560	3,630	3,700	3,770	3,840	3,910	3,980
60	4,050	4,121	4,192	4,263	4,334	4,405	4,476	4,547	4,618	4,689
70	4,760	4,831	4,902	4,973	5,044	5,115	5,186	5,257	5,327	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	6,538	6,610	6,682	6,754	6,826
100	6,808	6,970	7,043	7,116	7,189	7,262	7,335	7,408	7,481	7,554
110	7,627	7,700	7,774	7,848	7,922	7,996	8,070	8,144	8,218	8,292
120	8,366	8,440	8,515	8,590	8,665	8,740	8,815	8,890	8,965	9,040
130	9,115	9,190	9,265	9,340	9,415	9,490	9,565	9,640	9,715	9,790
140	9,865	9,940	10,016	10,092	10,168	10,244	10,320	10,396	10,472	10,548
150	10,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,316
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,196	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777

ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

ФИЗИКА

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Составители:

КОДРАТОВА

ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА

ЛЕОНОВ

СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

СИНДЯЕВ

АНДРЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

Редактор Т.В. Никитина

Компьютерная верстка Н. П. Красильникова

Подписано в печать 20.12.2018. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.

Печать трафаретная. Усл. печ. л. 3,81.

Тираж 100 экз. Заказ № 502.

РИО и типография УИ ГА. 432071, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8

