

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра физики

ТЕПЛОТЕХНИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело»

Составители В. В. Дырдин
А. А. Мальшин
С. А. Шепелева

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 6 от 29.01.2020
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
специальности 21.05.04
Протокол № 01 от 12.02.2020
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	2
1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА	
Определение коэффициента теплопроводности воздуха методом нагретой нити.....	4
2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА	
Определение коэффициента Пуассона для воздуха и расчет изменения энтропии при его изохорном нагревании	11
3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА	
Определение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении	16
4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА	
Определение температуры плавления и теплоты кристаллизации олова	22
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ	28
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	28
ПРИЛОЖЕНИЕ	28

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторный практикум представляет собой необходимый перечень лабораторных работ, предусмотренных рабочей программой курса теплотехники для специальности 21.05.04 «Горное дело». Основными целями изучения дисциплины «Теплотехника» студентами, обучающимися по специальности «Горное дело», являются: изучение законов термодинамики и преобразования энергии, основных законов и методов расчета тепло- и массопереноса в различных устройствах, применяющихся при добыче полезных ископаемых, а также знакомство с энергетическими и экологическими проблемами использования и производства теплоты в горном деле.

В результате освоения дисциплины «Теплотехника» студент должен:

– **знать:**

- основные свойства и параметры состояния термодинамических систем и законы преобразования энергии; законы термодинамики; термодинамические процессы и основы их анализа; термодинамику потока; элементы химической термодинамики; основные закономерности теплообмена и массообмена при стационарном и нестационарном режимах; способы управления параметрами теплообмена;

- современные энергоресурсы и перспективы их использования;

- основные способы энергосбережения;

- основные способы теплоснабжения, охлаждения и термостатирования оборудования;

– **уметь:**

- оценивать параметры состояния термодинамических систем и эффективность термодинамических процессов; рассчитывать показатели, параметры теплообмена; анализировать термодинамические процессы в теплотехнических устройствах, применяющихся в горном деле;

- выбирать рациональные системы теплоснабжения, охлаждения и термостатирования оборудования;

– **владеть:**

- методами анализа эффективности термодинамических процессов горного производства и управления интенсивностью обмена энергией в них;

- навыками выбора рациональных систем теплоснабжения, охлаждения и термостатирования оборудования.

Описания лабораторных работ изложены так, чтобы студент мог самостоятельно разобраться в теоретических основах предлагаемых работ даже тогда, когда выполнение их опережает лекционный курс.

При подготовке к лабораторным работам необходимо внимательно прочесть описание работы, изучить теоретические основы данной работы, используя указанную литературу, составить конспект отчета, содержащий титульный лист определенного образца, рабочие формулы, схему экспериментальной установки и таблицы для записи результатов.

По окончании эксперимента нужно подписать у преподавателя полученные результаты, занесенные в таблицы, обработать полученные результаты, построить соответствующие графики (где это требуется), проанализировать результаты проведенного эксперимента и сделать вывод, в котором указать метод, использованный в работе. Полученные результаты необходимо сравнить со справочными значениями, оценить приборные, статистические и методические погрешности измерений.

Студент должен оформить отчет в соответствии с требованиями, предъявляемыми к технической документации.

Защита лабораторной работы будет заключаться в опросе обучающихся по контрольным вопросам, которые изложены в данных методических указаниях.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕТОЙ НИТИ

1.1. Цель работы: освоение метода определения коэффициента теплопроводности воздуха.

1.2. Подготовка к работе: изучить в учебных пособиях и учебниках: [1] §§ 6.1–6.3, 13.1–13.2; [2] §§ 7.3–7.7 и методические указания к данной лабораторной работе. Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) виды теплообмена; б) явление теплопроводности в газах, жидкостях и твердых телах, понятия теплового потока и вектора плотности теплового потока; г) применение явления теплопроводности в теплообменных аппаратах.

1.3. Выполнение работы

1.3.1. Описание лабораторной установки

Нагреваемая вольфрамовая нить 5 находится в цилиндрическом баллоне 1 (рис. 1.1) с двойными стенками, между которыми залита вода 2. Баллон с нитью укреплен в модуле III (рис. 1.2) лабораторного стенда. На панели этого модуля расположены электрические клеммы: 1 – для соединения его с клеммами 3 источника питания (см. модули I и III рис. 1.2) и 2 – с клеммами 9 мультиметра 4, который используется для измерения напряжения на нити и образцовом сопротивлении (модуль I). Если двухполюсный переключатель 6

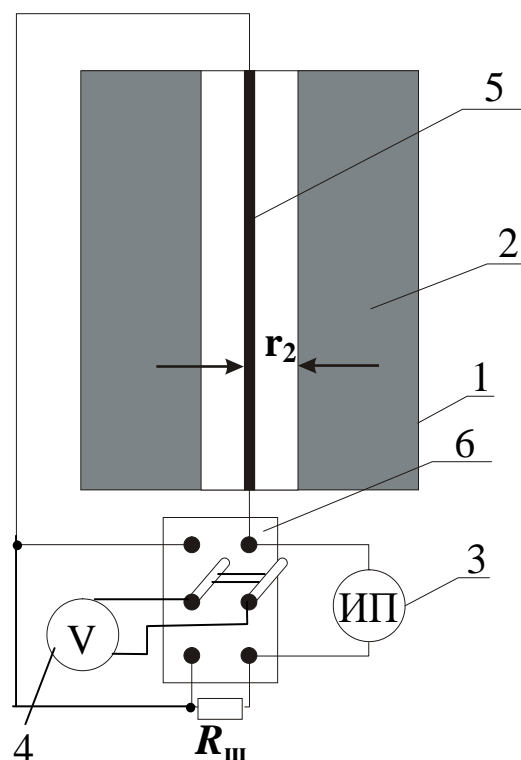


Рис. 1.1. Схема экспериментальной установки: 1 – цилиндрический баллон с двойными стенками; 2 – вода в баллоне; 3 – источник питания; 4 – мультиметр; 5 – вольфрамовая нить; 6 – двухполюсный переключатель

(модуль III) находится в положении R_{III} , то измеряется напряжение на образцовом сопротивлении R_0 (для этого на мультиметре должна быть нажата кнопка «200 мВ» переключателя пределов 10 мультиметра 4), а в положении R_H измеряется напряжение на нити накала R_H (кнопка «20 В» переключателя пределов 10 мультиметра 4). Напряжение на блоке питания задается регулятором 7, а контролируется вольтметром 8 (модуль I).

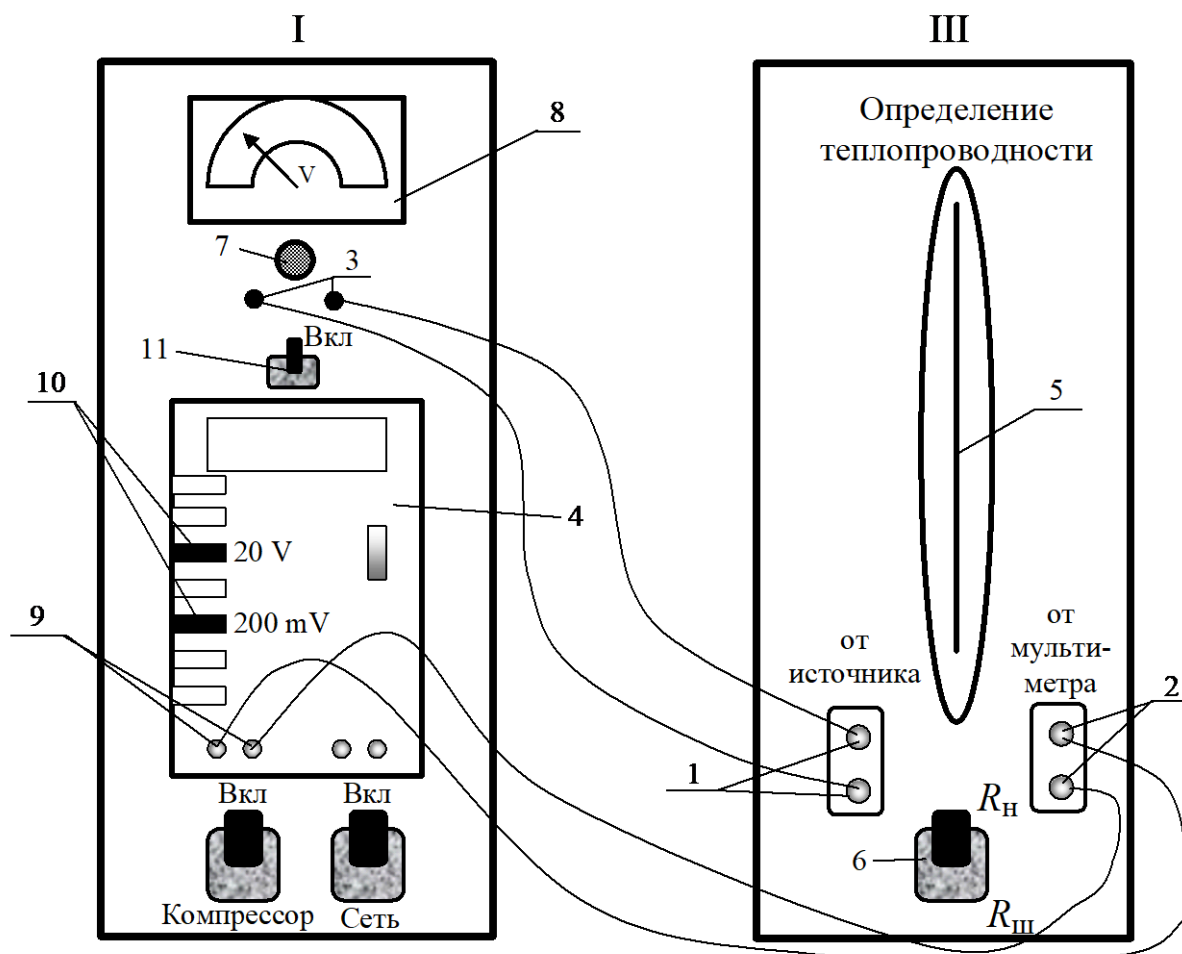


Рис. 1.2. Модули установки:

- 1 – клеммы для подключения источника питания;
- 2 – клеммы для подключения мультиметра;
- 3 – клеммы источника питания; 4 – мультиметр;
- 5 – вольфрамовая нить; 6 – двухполюсный переключатель;
- 7 – регулятор выходного напряжения; 8 – вольтметр для измерения выходного напряжения источника питания;
- 9 – клеммы мультиметра для подсоединения его к клеммам 2 модуля III; 10 – переключатель пределов мультиметра;
- 11 – тумблер для включения источника питания

1.3.2. Теория эксперимента

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

Количество теплоты δQ , проходящее вследствие теплопроводности за время dt через площадку dS_{\perp} , перпендикулярную тепловому потоку, определяется по формуле

$$\delta Q = q_c dS_{\perp} dt. \quad (1.1)$$

где q_c – плотность теплового потока.

Если относительное изменение температуры на расстоянии средней длины свободного пробега λ мало, то вектор плотности теплового потока определяется следующим соотношением:

$$\vec{q}_c = -\chi \text{grad } T, \quad (1.2)$$

где χ – коэффициент теплопроводности среды.

Знак «минус» показывает, что векторы \vec{q}_c и $\text{grad } T$ направлены в противоположные стороны, при этом вектор \vec{q}_c направлен от точки с большей температурой к точке с меньшей температурой.

Если совместить ось Z с нитью, то температура среды зависит только от расстояния r точки наблюдения до нити (рис. 1.3):

$$T = T(r),$$

и не зависит от полярного угла и координаты Z . Для такого осесимметричного поля температур вектор плотности теплового тока равен

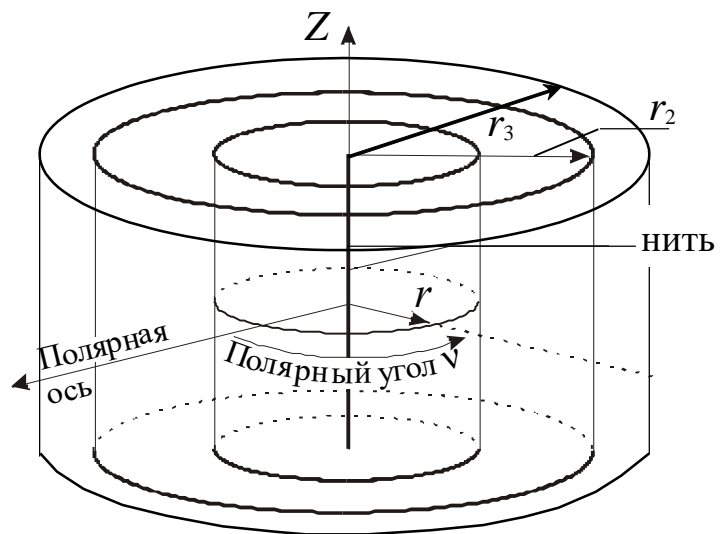


Рис. 1.3. Расчетная схема

$$\vec{q}_c = -\chi \frac{dT}{dr} \vec{e}_r, \quad (1.3)$$

где \vec{e}_r – единичный вектор, направленный по радиусу от нити.

Вся энергия δQ , подводимая к нити за время dt при неизменной температуре нити T_H , будет переноситься через боковую поверхность воображаемого цилиндра радиуса r , коаксиального с нагретой нитью, площадь поверхности которой

$$S_1 = 2\pi rL,$$

где $r_1 \leq r \leq r_2$, r – радиус воображаемого цилиндра; r_1 – радиус нити; r_2 – внутренний радиус баллона с водой; r_3 – внешний радиус баллона с водой; L – длина нити (рис. 1.3).

С учетом этого из равенств (1.1) и (1.2) следует, что

$$-\chi \frac{dT}{dr} = \frac{\delta Q}{2\pi rLdt}, \quad (1.4)$$

где $\frac{\delta Q}{dt} = P_H$ – количество теплоты, проходящей за единицу времени (мощность теплового потока) через поверхность рассматриваемого цилиндра. Мощность P_H , которая подводится к нити, определяется напряжением на нити U_H и током I_H , текущим через нить, следовательно, для выбранного значения напряжения на нити мощность рассчитывается по формуле

$$P_H = I_H U_H. \quad (1.5)$$

Из формулы (1.5), с учетом выражения (1.4), следует:

$$P_H \frac{dr}{r} = -2\pi L\chi dT. \quad (1.6)$$

Интегрируя выражение (1.6) при постоянной мощности P_H и граничных условиях:

$$\begin{cases} \text{при } r = r_1 & T = T_H; \\ \text{при } r = r_2 & T = T_c, \end{cases}$$

где T_H – температура нити; T_c – температура цилиндрического баллона с водой (в условиях опыта считается постоянной, равной температуре в лаборатории), получим

$$P_H \ln \frac{r_2}{r_1} = 2\pi L\chi(T_H - T_c). \quad (1.7)$$

Отсюда

$$\chi = \frac{P_{\text{H}} \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi L(T_{\text{H}} - T_{\text{C}})}. \quad (1.8)$$

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

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

и выражение (1.8) принимает следующий вид:

$$\chi(T_{\text{H}}) = c \frac{P_{\text{H}}}{T_{\text{H}} - T_{\text{C}}}. \quad (1.9)$$

Температуру нити найдем, используя формулу связи сопротивления нити R_{H} с температурой:

$$R_{\text{H}} = R_{0\text{H}}(1 + \alpha t_{\text{H}}),$$

где $R_{0\text{H}}$ – сопротивление нити при $t = 0^\circ\text{C}$; α – температурный коэффициент сопротивления.

Температура нити отсюда будет равна:

$$t_{\text{H}} = \frac{R_{\text{H}} - R_{0\text{H}}}{\alpha R_{0\text{H}}}. \quad (1.10)$$

Очевидно, $\Delta T = \Delta t$, т. е. разность температур по шкалам Кельвина и Цельсия равны:

$$T_{\text{H}} - T_{\text{C}} = t_{\text{H}} - t_{\text{C}} = \frac{R_{\text{H}} - R_{0\text{H}}}{\alpha R_{0\text{H}}} - t_{\text{C}}, \quad (1.11)$$

где t_{H} , t_{C} – температура нити и цилиндрического сосуда по шкале Цельсия соответственно.

1.3.3. Подготовка установки к работе

1. Убедитесь, что все приборы выключены, поверните регулятор 7 напряжения блока питания (модуль I) против часовой стрелки до упора.

2. Соедините проводами источник питания с нитью и мультиметр через клеммы 3 и 9 (см. модуль I) с клеммами 1 и 2 соответственно (см. модуль III), как показано на рис. 1.2.

3. На мультиметре включите кнопку переключателя пределов измерений «20 В».

4. Включите в сеть стенд и цифровой мультиметр на модуле I.

5. Переключатель 6 поставьте в положение R_H .

1.3.4. *Определение коэффициента теплопроводности воздуха*

1. Регулятором 7 задайте напряжение на нити $U_H \approx 2$ В, запишите значение U_H (по мультиметру 4) в табл. 1.1.

Таблица 1.1

*Результаты измерений и расчета
коэффициента теплопроводности воздуха*

	U_H	U_0	I_H	R_H	P_H	t_H	T_H	$T_H - T_c$	χ	ρ	η	D
№	В	мВ	А	Ом	Вт	°С	К	К	$10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Па·с	$\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$
1												
2												
3												
4												
5												

2. Переведите переключатель 6 в положение $R_{ш}$, включите кнопку переключателя пределов измерений «200 мВ». Запишите напряжение U_0 на образцовом сопротивлении (по мультиметру 4) в табл. 1.1. Затем *переключатель пределов измерений верните в положение «20 В»*.

3. Повторите измерения согласно пп. 1, 2 для напряжений на нити $U_H = 3; 4; 5; 6$ В.

4. Уменьшите напряжение на нити до нуля и выключите стенд.

5. По формулам $I_{\text{н}} = \frac{U_0}{R_0}$ и $R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}}$ рассчитайте силу тока и сопротивление нити накала. По формуле (1.5) рассчитайте мощность теплового потока $P_{\text{н}}$.

6. Температуру нити $t_{\text{н}}$ рассчитайте по формуле (1.10).

$$c = \frac{\ln r_2 / r_1}{2\pi L} = 1,55 \text{ м}^{-1}; \quad R_0 = 0,1 \text{ Ом}; \quad R_{0\text{н}} = 5,2 \text{ Ом};$$

$$\alpha = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}; \quad \alpha \cdot R_{0\text{н}} = 0,01872 \text{ Ом} \cdot \text{К}^{-1}.$$

Здесь $R_{0\text{н}}$ – сопротивление нити при 0°С .

7. Для каждого из измеренных $U_{\text{н}}$ и U_0 рассчитайте ток $I_{\text{н}}$, сопротивление нити $R_{\text{н}}$, соответствующую температуру $T_{\text{н}}$ по формуле $T_{\text{н}} = t_{\text{н}} + 273^\circ$ и по формуле (1.9) коэффициент теплопроводности воздуха χ .

6. Постройте график зависимости $\chi = \chi(T_{\text{н}})$.

7. Зная связь между коэффициентами теплопроводности χ и динамической вязкости η ($\chi = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle c_{\text{вуд}}$, где $\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$, следовательно, $\chi = \eta c_{\text{вуд}}$), для каждого значения χ рассчитайте динамический коэффициент внутреннего трения η воздуха, считая воздух двухатомным идеальным газом, для которого справедливо выражение $c_{\text{вуд}} = \frac{i R}{2 M}$, где $M = 0,029$ кг/моль, $i = 5$.

8. Найдите плотность воздуха ρ из уравнения Менделеева – Клапейрона при условиях эксперимента $P = P_{\text{атм}}$ и $T = T_{\text{н}}$ и коэффициент диффузии D из формулы $\eta = \rho D$, поскольку $\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle \lambda \rangle$.

1.4. Сделайте вывод

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПУАССОНА ДЛЯ ВОЗДУХА И РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ ЕГО ИЗОХОРНОМ НАГРЕВАНИИ

2.1. Цель работы: экспериментальное определение коэффициента Пуассона для воздуха и расчет изменения энтропии при изохорном процессе.

2.2. Подготовка к работе: изучить в учебных пособиях и учебниках [1] §§ 1.5, 2.1; [2] §§ 2.4–2.9; [3] тема 2 и методические указания к данной лабораторной работе. Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) первое и второе начала термодинамики и иметь понятие о вечном двигателе второго рода; б) определение теплоемкости при различных процессах в газах; в) уравнение адиабаты в различных координатах (P – V , V – T , T – S); г) коэффициент Пуассона для идеального и реального газа; д) расчет изменения энтропии при изохорном процессе.

2.3. Выполнение работы

2.3.1. Описание лабораторной установки

Установка для определения коэффициента Пуассона γ для воздуха изображена на рис. 2.1, а на рис. 2.2 изображена ее схема. В модуле I (см. рис. 2.1) находится компрессор, соединенный трубкой 3 с баллоном, находящимся в модуле II.

Для накачивания воздуха в баллон нужно включить тумблер «СЕТЬ» и, включив тумблер «КОМПРЕССОР», нажать на клапан 1 «НАПУСК». Клапан 2 (рис. 2.2) позволяет соединить баллон A с атмосферой и U -образным манометром 4. По манометру 4, расположенному в модуле II, определяют избыточное давление Δp в баллоне по разности уровней жидкости в коленах манометра: $\Delta p = \rho gh$, где h – разность уровней жидкости в коленах манометра; $\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды.

2.3.2. Методика измерений и расчета

В основе методики лежит метод Клемана – Дезорма, который состоит в следующем.

В баллон A (рис. 2.2) с помощью компрессора накачивается воздух в количестве, соответствующем разности уровней в манометре.

метре, примерно, в 200–300 мм. Температура воздуха в сосуде в результате сжатия несколько повышается (T_1). После прекращения накачивания она будет понижаться до комнатной температуры T_0 . Процесс понижения температуры происходит при постоянном объеме, сопровождаясь понижением давления и, следовательно, понижением разности уровней жидкости в манометре.

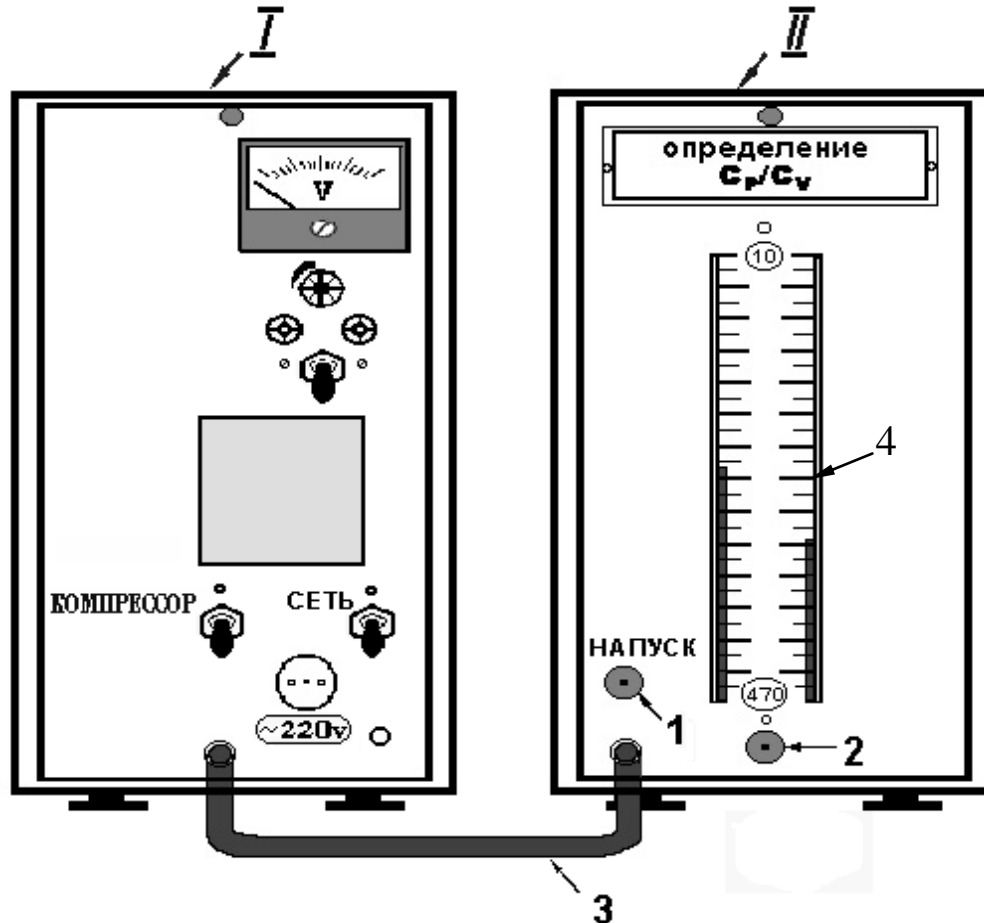


Рис. 2.1. Внешний вид экспериментальной установки для определения коэффициента Пуассона:

1 – клапан, соединяющий компрессор с баллоном; 2 – клапан, соединяющий баллон с атмосферой; 3 – шланг, соединяющий компрессор с баллоном; 4 – U-образный манометр

После установления температурного равновесия воздух в баллоне будет характеризоваться параметрами p_1 и T_0 , причем $p_1 = p_0 + \rho g h_1$, где p_0 – атмосферное давление; h_1 – установившаяся разность уровней жидкости в манометре; $\rho g h_1$ – гидростатическое давление столба жидкости в манометре высотой h_1 ,

которое уравнивает добавочное давление в баллоне; T_0 – комнатная температура. Затем, резко открыв клапан 2, соединяют баллон с атмосферой, после чего закрывают клапан 2. В результате этой операции происходит адиабатическое расширение газа и температура воздуха в баллоне понижается до некоторого значения T , а давление становится равным атмосферному p_0 .

Поскольку температура $T < T_0$, то воздух в баллоне после закрытия клапана начнет изохорически нагреваться за счет получения тепла от окружающей среды, следовательно, повысится и разность уровней в манометре. Когда температура станет равной комнатной T_0 , изменение уровней в манометре прекратится, и состояние газа будет характеризоваться параметрами $p_2 = p_0 + \rho g h_2$ и T_0 , где h_2 – новая установившаяся разность уровней в манометре.

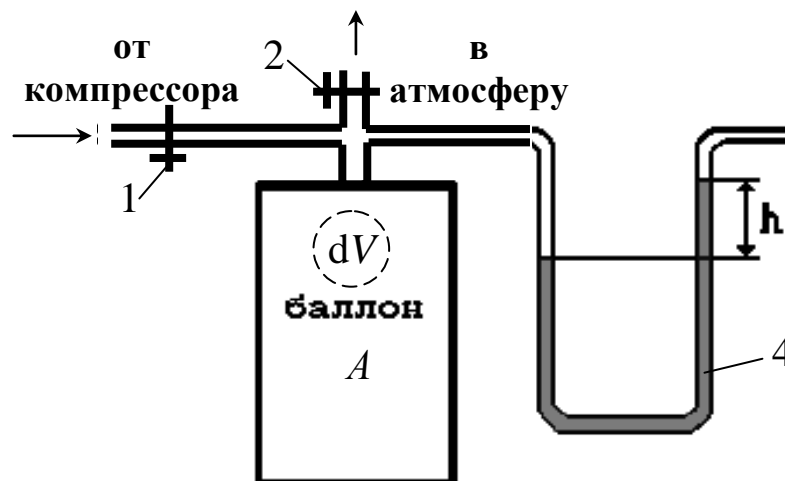


Рис. 2.2. Схема экспериментальной установки:
 A – баллон; 1 – клапан напуска воздуха в баллон
 2 – клапан, позволяющий соединить баллон
 с атмосферой и манометром; 4 – манометр

График зависимости давления от объема при выпуске воздуха из баллона представлен на рис. 2.3.

Переход газа из состояния 1 в состояние 2 совершается адиабатно ($\delta Q = 0$). Уравнение адиабаты

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

где γ – коэффициент Пуассона.

Полный дифференциал этого уравнения равен

$$V dp + \gamma p dV = 0. \quad (2.1)$$

С учетом того, что V_2 и V_1 достаточно близкие значения, можно расписать в уравнении (2.1) $dV = V_2 - V_1$, а также $dp = p_0 - p_1$. Тогда

$$\gamma p (V_2 - V_1) + V(p_0 - p_1) = 0. \quad (2.2)$$

В состояниях 1 и 3 температура газа одинакова, поэтому в этих состояниях будет одинаковым произведение $pV = \text{const}$ и $d(pV) = 0$. Откуда $pdV + Vdp = 0$, или

$$p (V_2 - V_1) + V(p_2 - p_1) = 0. \quad (2.3)$$

Решая совместно (2.2) и (2.3), найдем $\gamma = (p_1 - p_0)/(p_1 - p_2)$.

Замена $p_1 = p_0 + \rho g h_1$, $p_2 = p_0 + \rho g h_2$ приводит к выражению

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}, \quad (2.4)$$

где h_1 – первоначальная установившаяся разность уровней жидкости в манометре; h_2 – новая установившаяся разность уровней жидкости в манометре.

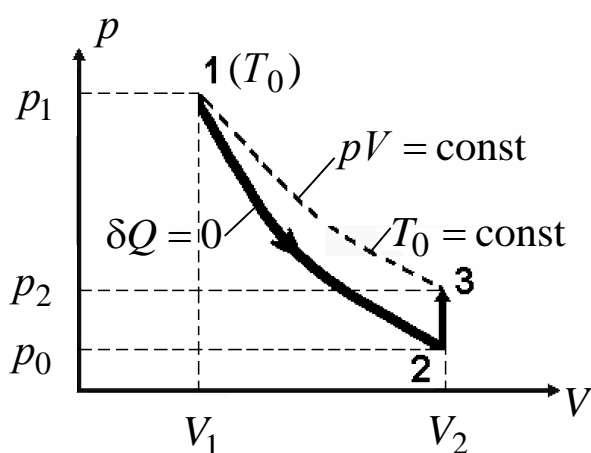


Рис. 2.3. Зависимость давления от объема при адиабатном расширении и последующем изохорном нагревании воздуха

2.3.3. Проведение экспериментальных измерений

1. Включите на модуле I тумблеры «СЕТЬ», а затем «КОМПРЕССОР». На модуле II нажмите клапан «НАПУСК», соединяющий компрессор с баллоном, добейтесь, чтобы разность уровней в U-образном манометре составила 250–300 мм.

2. Закройте клапан «НАПУСК». Через 3–5 минут температура воздуха в баллоне станет равной температуре воздуха в комнате (уровни в манометре перестанут перемещаться). По нижним уровням менисков определите положение уровней жидкости в коленах манометра и их разность h_1 .

3. Резко нажмите клапан 2 на модуле II и отпустите его сразу, как только в первый раз выровняются уровни жидкости в коленах манометра (возможны колебания).

4. Через 3–5 минут температура воздуха в баллоне поднимется до комнатной (уровни жидкости в коленах манометра перестанут перемещаться). Определите разность уровней в коленах манометра h_2 .

Вычислите $\gamma_{\text{э}} = h_1 / (h_1 - h_2)$.

5. Повторите опыт 5 раз, результаты занесите в таблицу 2.1.

6. Вычислите значение коэффициента Пуассона для идеального газа по формуле

$$\gamma_{\text{т}} = \frac{i + 2}{i},$$

где i – число степеней свободы (воздух можно считать двухатомным идеальным газом).

7. Найдите расхождение экспериментального и расчетного значений коэффициента Пуассона $\xi = \frac{|\gamma_{\text{т}} - \gamma_{\text{э}}|}{\gamma_{\text{т}}} \cdot 100\%$.

Таблица 2.1

*Результаты экспериментального определения
коэффициента Пуассона*

№ п/п	h_1	h_2	$\gamma_{\text{э}} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$	$\langle \gamma_{\text{э}} \rangle$	$\gamma_{\text{т}}$	ξ_{γ}
	мм	мм				%
1						
2						
3						
4						
5						

8. Рассчитайте изменение энтропии ΔS_V при изохорном нагревании воздуха, для чего определите:

– атмосферное давление $p_0 =$ Па;

– комнатную температуру $T_0 =$ К;

– запишите значение плотности $\rho = 10^3$ кг/м³ жидкости в манометре;

– объем баллона $V = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$;

– среднюю разность уровней в коленях манометра $\langle h_2 \rangle = \text{ м}$,

и по формуле

$$\Delta S_V = \frac{i}{2} \frac{(p_0 + \rho g \langle h_2 \rangle)}{T_0} \ln \frac{(p_0 + \rho g \langle h_2 \rangle)}{p_0}, \text{ Дж/К},$$

вычислите изменение энтропии при изохорном нагревании ΔS_V .

2.4. Сделайте вывод

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

3.1. Цель работы: определить удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении.

3.2. Подготовка к работе: изучить в учебных пособиях и учебниках [1] § 1.3; [2] §§ 7.1–7.2 и методические указания к данной лабораторной работе. Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) понятие внутренней энергии, теплоты и работы; б) понятие удельной и молярной теплоемкостей; в) расчет теплоемкости идеального и реального газа при различных термодинамических процессах; г) расчет скорости и массового расхода газа в сопле и диффузоре.

3.3. Выполнение работы

3.3.1. Описание лабораторной установки

Блок-схема установки для определения удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении изображена на рис. 3.1, а на рис. 3.2 изображена ее принципиальная электрическая схема.

Воздух прокачивается компрессором через трубку 1 (рис. 3.2), размещенную в теплоизолирующей емкости 2.

Измерение массового расхода воздуха производится по перепаду давлений на капилляре, который вместе с трубкой образует единую проточную магистраль.

Проходя через трубку, воздух нагревается электрической спиралью 3. Разность температур на входе и выходе трубки измеряется дифференциальной термопарой 4. ЭДС термопары измеряется вольтметром 7. Электрический нагреватель 3 питается по-

стоянным током от блока питания БП, подключенным к нагревателю через разъем.

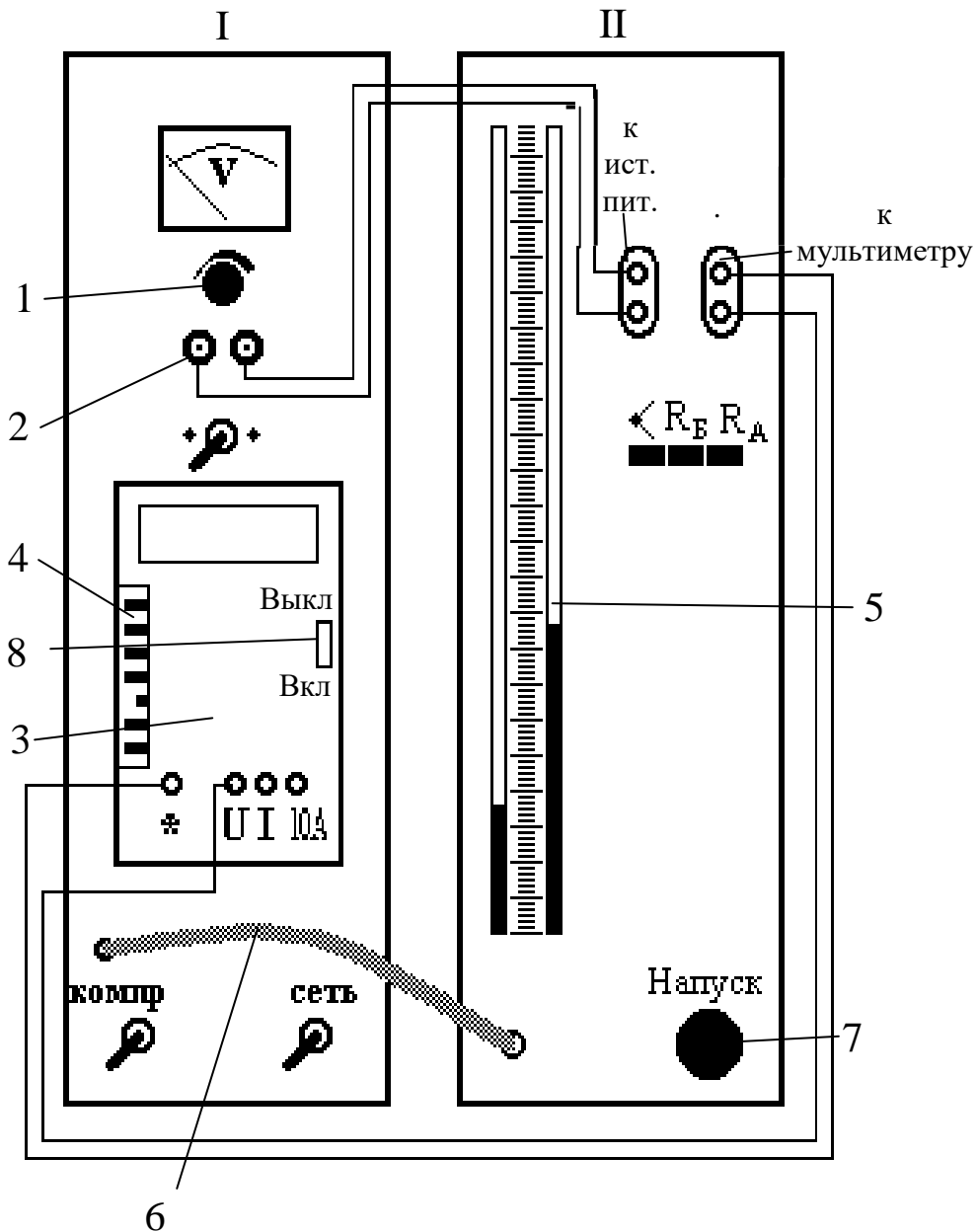


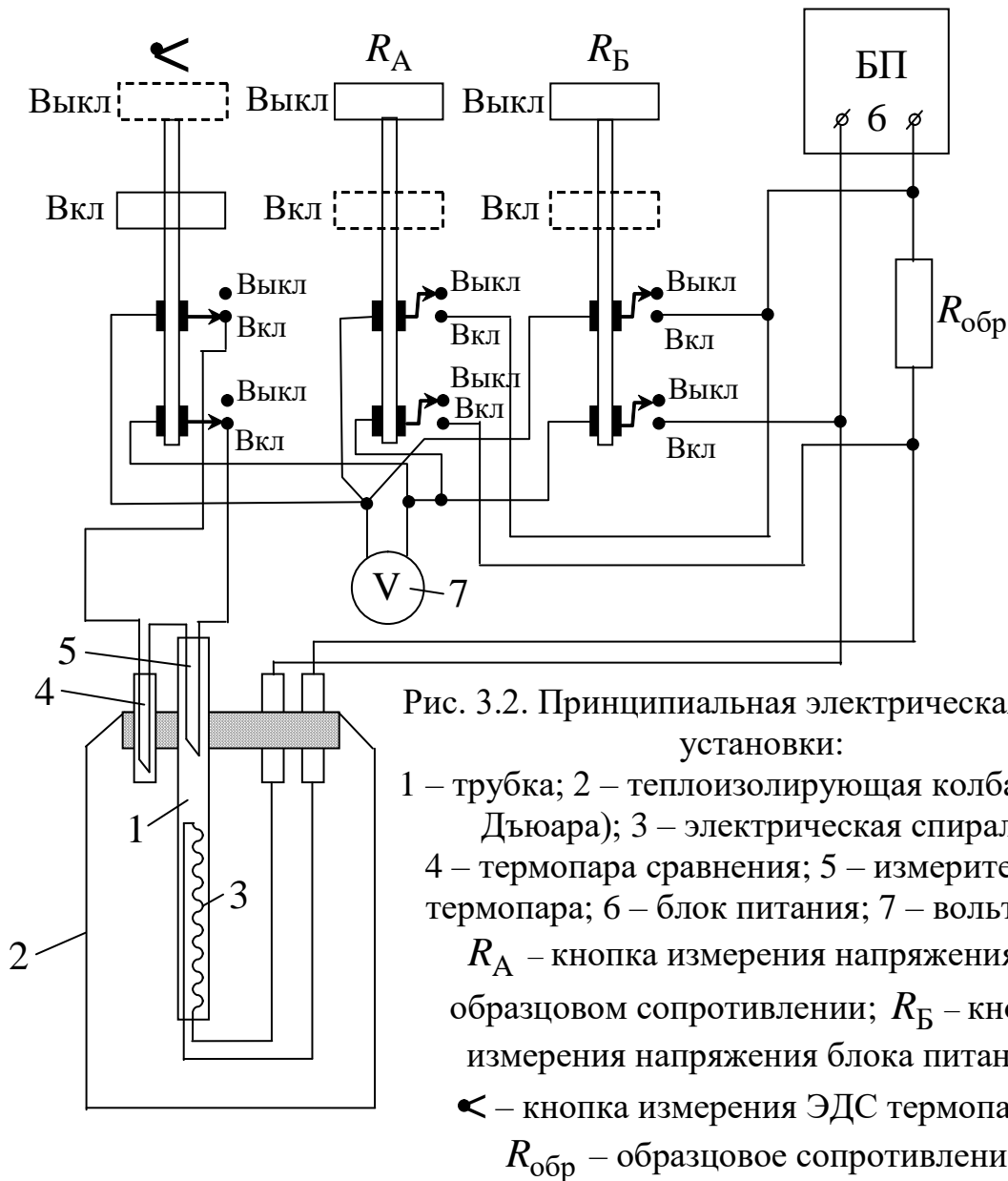
Рис. 3.1. Блок-схема установки:

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

Ток в нагревателе I_H определяется по закону Ома для участка цепи:

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

где U_R – напряжение на образцовом сопротивлении; $R_{обр}$ – образцовое сопротивление, равное 0,1 Ом.



3.3.2. Методика измерений и расчета

Определение теплоемкости тел обычно производят в калориметрах. Необходимо, чтобы количество теплоты, затрачиваемой на нагревание исследуемого тела, было существенно больше теплоты, расходуемой на нагревание калориметра и на потери, связанные с утечкой теплоты из установки. При определении

теплоемкости воздуха эти требования выполнить очень трудно, так как масса воздуха, заключенного в калориметре, и, следовательно, количество теплоты, идущей на его нагревание, очень малы.

Чтобы увеличить количество воздуха при неизменных размерах установки, в данной работе воздух продувается сквозь капилляр, внутри которого установлен нагреватель. Определяются количество теплоты Q , отдаваемое нагревателем, масса m протекающего через капилляр воздуха и изменение его температуры на ΔT .

Удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении определяется по формуле

$$c_{mp} = \frac{Q}{m \Delta T}. \quad (3.2)$$

Количество теплоты, отдаваемое нагревателем протекающему по трубке воздуху за время t , рассчитывается по закону Джоуля – Ленца:

$$Q = I_H U_H t, \quad (3.3)$$

где I_H , U_H – сила тока и напряжение на спирали нагревателя.

Массовый расход z воздуха через трубку определяется как масса воздуха, протекающего через поперечное сечение трубки в единицу времени:

$$z = \frac{m}{t}, \quad (3.4)$$

который можно определить по формуле Пуазейля:

$$z = \frac{\pi r_0^4 \rho_{\text{возд}} \Delta p}{8 \ell \eta}, \quad (3.5)$$

где r_0 – радиус капилляра; $\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха; ℓ – длина капиллярной трубки; η – коэффициент внутреннего трения воздуха (см. табл. 3.1).

При протекании воздуха через капилляр на концах трубки создается разность давлений $\Delta p = \rho_{\text{ж}} g h$, где h – разность уровней жидкости в U -образном манометре, м; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³.

Разность температур ΔT на концах трубки определяется по измеренной термоЭДС ε по формуле

$$\Delta T = \frac{\varepsilon}{\alpha}, \quad (3.6)$$

где α – постоянный коэффициент для данной термопары.

Подставляя (3.1), (3.3)–(3.6) в уравнение (3.2), получим формулу для расчета удельной теплоемкости при постоянном давлении:

$$c_{тр} = B \frac{U_H U_R}{h \varepsilon}, \quad (3.7)$$

где $B = \frac{8 \ell \alpha \eta}{\pi g R_{обр} \rho_{ж} \rho_{возд} r_0^4}$ – постоянная для данной установки.

Таблица 3.1

Постоянные величины для расчета удельной теплоемкости при постоянном давлении

ℓ	м	0,16	$\rho_{возд}$	кг/м ³	1,29
α	В/К	$5,43 \cdot 10^{-5}$	$\rho_{ж}$	кг/м ³	10^3
η	Па·с	$1,8 \cdot 10^{-4}$	r_0	м	$3 \cdot 10^{-3}$
$R_{обр}$	Ом	0,1	g	м/с ²	9,81

4.3.3. Подготовка установки к работе

На рис. 3.1 представлена блок-схема установки. Подготовка установки к работе осуществляется следующим образом.

1. Соедините проводами клеммы источника питания 2 на измерительном модуле I и клеммы «к ист. пит.» на модуле II стенда.

2. Соедините проводами клеммы «к мультиметру» модуля II стенда и клеммы «*» и «U» мультиметра 3 измерительного стенда (модуль I).

3. Вращая ручку 1 против часовой стрелки, выведите регулятор напряжения источника питания на измерительном стенде в крайнее положение. На переключателе 4 пределов мультиметра (левый вертикальный ряд кнопок на мультиметре 3) установите

предел напряжения 20 В, для этого нажмите кнопку «20 V». Все остальные кнопки переключателя пределов должны быть отжаты.


4. На измерительном стенде включите тумблеры «Сеть», «Источник питания», «Компрессор», а также движок 8 выключателя мультиметра (он находится справа на панели мультиметра).

3.3.4. Определение удельной теплоемкости воздуха

1. Нажмите клапан 7 «Напуск» на модуле стенда и добейтесь, чтобы разность уровней жидкости h в U -образном манометре 5 составила 50–100 мм.

2. Нажмите кнопку R_B на модуле II стенда и с индикатора мультиметра 3 произведите отсчет напряжения U_H на нагревателе, при этом величина этого напряжения устанавливается поворотом ручки 1 регулятора напряжения источника питания по часовой стрелке.

3. Нажмите кнопку R_A на модуле стенда II и с индикатора мультиметра 3 произведите отсчет напряжения U_R на образцовом сопротивлении, для этого переключите предел измерения мультиметра 3 на 200 мВ (нажмите кнопку «200 mV» на переключателе 4 пределов мультиметра).

4. Нажмите кнопку  на модуле стенда II и снимите отсчет напряжения на термопаре по индикатору мультиметра в момент, когда показания мультиметра перестанут изменяться (примерно через 5 мин при постоянной разности уровней h).

5. Пункты 2–4 повторите для следующих четырех значений напряжения U_H на нагревателе (6 В, 8 В, 10 В, 12 В). Результаты измерений занесите в табл. 3.2. Рассчитайте c_{mp} по формуле (3.7). Данные расчетов занесите в табл. 3.2.

6. Рассчитайте удельную теплоемкость для воздуха по формуле $c_{mp} = \left(\frac{i}{2} + 2 \right) \frac{R}{M}$, возьмите $i = 5$, $M = 0,029$ кг/моль.

7. Сравните полученное из эксперимента значение удельной теплоемкости при постоянном давлении для воздуха с расчетным значением c_{mp} для двухатомного идеального газа.

Таблица 3.2

Измеряемые параметры и рассчитанная удельная теплоемкость при постоянном давлении

№	U_H	h	ε	U_R	$C_{tr}^{ЭКСП}$	$C_{tr}^{расч}$
п/п	В	м	В	В	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$	$\frac{Дж}{кг \cdot К}$
1	6					
2	8					
3	10					
4	12					

3.4. Сделайте вывод

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАВЛЕНИЯ И ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОЛОВА

4.1. Цель работы: определение температуры плавления и теплоты кристаллизации олова.

4.2. Подготовка к работе: изучить в учебных пособиях и учебниках [1] § 9.4; [2] § 5.1 – 5.6; [3] тема 5 и методические указания к данной лабораторной работе. Для выполнения лабораторной работы студент должен знать: а) понятие энтропии, расчет ее изменения при фазовом переходе; б) фазовые переходы 1-го рода; в) понятие удельной теплоты плавления и ее физический смысл; г) расчет погрешностей измерений; д) справочное значение температуры плавления олова.

4.3. Выполнение работы

4.3.1. Описание лабораторной установки

Конструктивно установка состоит (рис. 4.1) из модуля I стенда и измерительного модуля II, размещенных в унифицированных корпусах.

Принципиальная электрическая схема установки показана на рис. 4.2.

Спай 2 дифференциальной термопары (рис. 4.2) находится в окружающей среде с постоянной температурой T_0 , а спай 1 – в ампуле с оловом при температуре T . Так как термопары включены навстречу друг другу, то мультиметр показывает термоЭДС, пропорциональную разности температур $T - T_0$. Ампула с оловом находится в модуле I, нагревается с помощью электрической печи, питающейся переменным током.

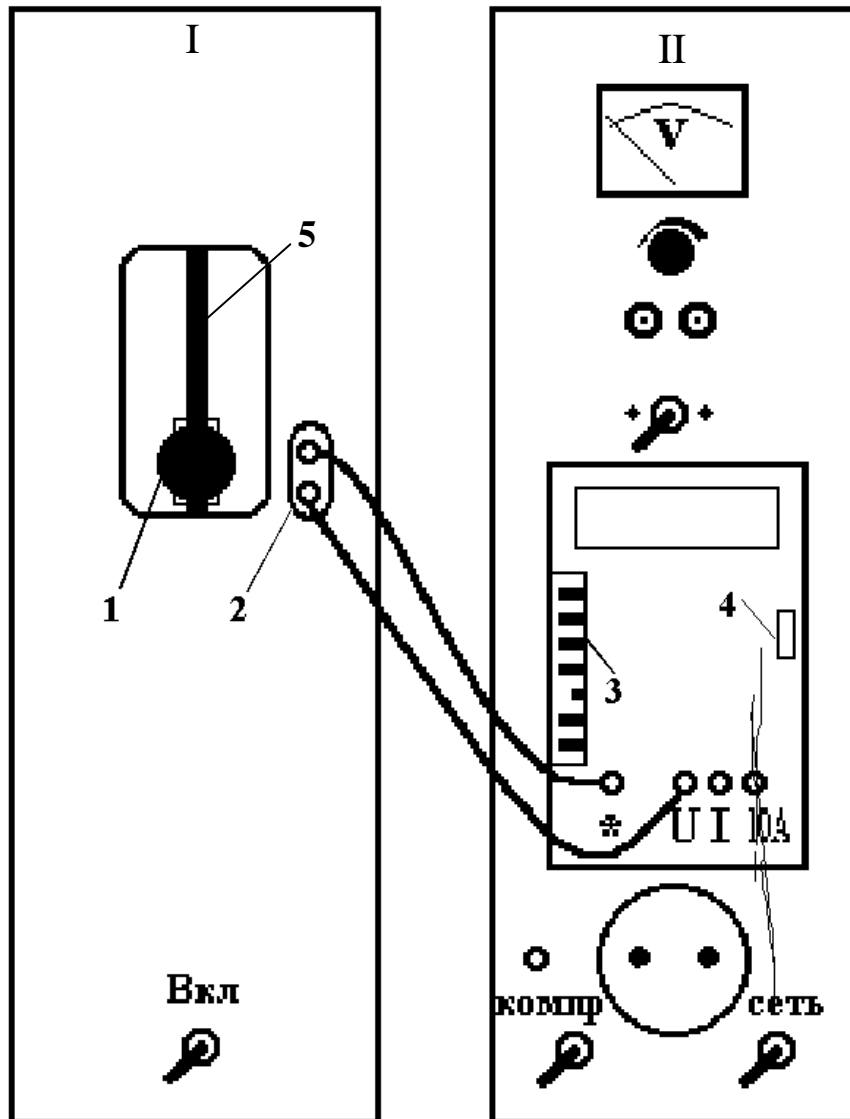


Рис. 4.1. Схема установки:

I – модуль стенда; II – измерительный модуль;
 1 – винт фиксирования ползуна; 2 – гнезда, к которым подключается мультиметр; 3 – переключатель пределов мультиметра; 4 – движок выключателя мультиметра; 5 – щель для перемещения ползуна

Внутри ампулы находится металлическая трубка-чехол с дифференциальной хромель-копелевой термопарой, горячий спай которой находится в ампуле, а холодный – на воздухе. Выводы термопар a и b соединены внутри модуля I, а c и d подключены к гнездам 2 (рис. 4.1). Здесь также расположено окно, в котором на вертикальной штанге установлен ползун, жестко соединенный с ампулой. Ползун фиксируется на штанге с помощью винта 1. Если отвернуть винт и опустить ползун вниз до упора, то ампула с оловом опустится в печь. Если же поднять ползун вверх до упора и зафиксировать винтом, то ампула с оловом будет находиться вне печи.

На лицевой панели модуля измерительного стенда II расположен мультиметр, который необходимо подключить к выходным гнездам модуля I для измерения термоЭДС.

4.3.2. Теория эксперимента

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

При атмосферном давлении прямое и обратное фазовые превращения кристаллического вещества происходят при строго определенной температуре, поэтому изобарный фазовый переход одновременно является изотермическим. Одним из возможных способов измерения температуры плавления и кристаллизации является получение диаграммы плавления или отвердевания, т. е.

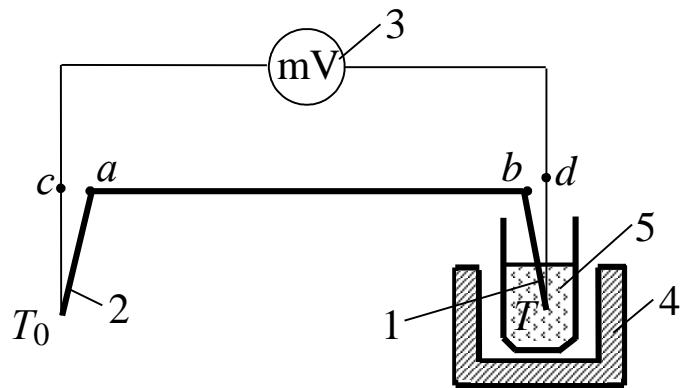


Рис. 4.2. Принципиальная электрическая схема установки:

- 1 – спай 1 дифференциальной термопары;
- 2 – спай 2 дифференциальной термопары;
- 3 – мультиметр; 4 – электрическая печь;
- 5 – ампула с оловом

кривой зависимости температуры T исследуемого вещества от времени t при неизменном внешнем давлении. Эта кривая качественно показана на рис. 4.3. Левая возрастающая часть диаграммы на рис. 4.3 показывает нагревание твердого образца и ампулы, а справа – нагревание расплава и ампулы. Тепловая мощность на любом из этих участков равна изменению внутренней энергии системы в единицу времени:

$$P = (m c_m + m_1 c_{m1}) \frac{dT}{dt}, \quad (4.1)$$

где P – энергия, подводимая к образцу в единицу времени, Дж/с; m – масса олова; m_1 – масса ампулы; c_m – удельная теплоемкость олова; c_{m1} – удельная теплоемкость ампулы; $\frac{dT}{dt}$ – скорость изменения температуры системы.

Горизонтальный участок на рис. 4.3 соответствует процессу плавления металла. Ордината его – температура плавления, а приращение абсциссы – время фазового перехода $t_{ф.п.}$. Для этого случая закон сохранения энергии может быть записан следующим образом:

$$P t_{ф.п.} = \lambda m, \quad (4.2)$$

где λ – удельная теплота плавления олова, т. е. подводимая энергия идет на разрушение кристаллической решетки.

Подводимая мощность P в процессах нагревания и плавления не изменяется, поэтому из формул (4.1) и (4.2) найдем

$$\lambda = \frac{m c_m + m_1 c_{m1}}{m} t_{ф.п.} \frac{dT}{dt}. \quad (4.3)$$

Изменение энтропии ΔS при фазовом переходе согласно второму закону термодинамики определяется по формуле

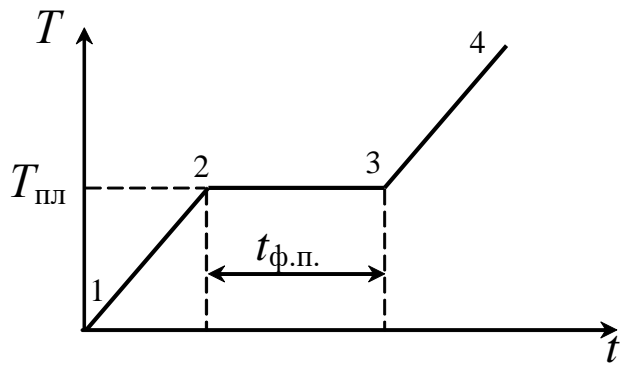
$$\Delta S = \frac{Q}{T},$$

где $Q = \lambda m$ – теплота, подводимая к веществу в процессе фазового перехода, а $T = T_{пл.}$. С учетом этого изменение энтропии в процессе плавления (кристаллизации):

$$\Delta S = \frac{\lambda m}{T_{пл.}}, \quad (4.4)$$

где $T_{пл.}$ – температура плавления (кристаллизации) вещества.

Следовательно, для определения теплоты кристаллизации λ и изменения энтропии ΔS в рассматриваемом процессе необходимо измерить $T_{\text{пл}}$ и $t_{\text{ф.п.}}$, вычислить производную $\frac{dT}{dt}$ функ-



ции $T = f(t)$ в произвольной точке, соответствующей температуре твердого олова в процессе его нагревания (охлаждения).

Производная $\frac{dT}{dt}$ находится из графика, построенного по экспериментальным данным (кривая охлаждения), а скорость охлаждения образца приблизительно равна

$$\frac{dT}{dt} \approx \frac{\Delta T}{\Delta t}. \quad (4.5)$$

4.3.3. Подготовка установки к работе

1. Опустите ампулу с оловом в печь, для чего отверните на пол-оборота винт 1 (рис. 4.1) и опустите ползун вниз по штанге до упора.

2. Соедините проводами гнезда 2 (рис. 4.1) модуля I и гнезда «*» и «U» мультиметра измерительного стенда, затем нажмите кнопку 200 mV (третью снизу кнопку левого вертикального ряда кнопок 3 мультиметра), все остальные кнопки должны быть отжаты.

3. Подсоедините к питающей сети 220 В вилки обоих стендов и включите оба стенда с помощью тумблеров «Вкл», «Сеть» на лицевых панелях, а мультиметр – с помощью движка 4 (сдвинуть вниз), находящегося с правой стороны его панели. Процесс нагревания и плавления олова занимает несколько минут (5–8 мин).

4. Проследите по показаниям мультиметра в течение нескольких минут за процессом плавления олова. Так как он происходит при постоянной температуре, то при этом показания мультиметра практически не изменяются. Окончание процесса плавления можно определить как момент времени, после которого показания мультиметра начинают возрастать.

Рис. 4.3. Диаграмма плавления

5. Через 1,5 минуты после окончания процесса плавления отключите электрическую печь и поднимите ампулу с оловом из печи, для чего отверните на пол-оборота винт 1 и поднимите ползун по штанге вверх до упора, после этого винт закрутите.

4.3.4. Определение удельной теплоты плавления

1. Включите секундомер и через каждые 15 секунд снимайте показания мультиметра U , пропорциональные разности температур олова и окружающей среды $T - T_0$:

$$U = k(T - T_0), \quad (4.6)$$

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

2. Измерения продолжайте до тех пор, пока не будут пройдены три области процесса охлаждения: область полного расплава; область кристаллизации; область охлаждения твердого олова. Время опыта – около 10 минут.

3. Результаты измерений занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты экспериментальных измерений и расчета изменения энтропии

№ опыта	U	$(T - T_0)$	T	t	$T_{\text{пл}}$	λ	ΔS
	мВ	К	К	с	К	Дж/кг	Дж/К
1							
2							
3							
...							
40							

4. По данным таблицы постройте диаграмму затвердевания олова $T = f(t)$, экспериментальные точки должны быть обязательно показаны на графике. Из диаграммы определите температуру плавления олова $T_{\text{пл}}$, время фазового перехода $t_{\text{ф.п}}$ и скорость изменения температуры системы $\frac{dT}{dt}$ с учетом соотношения (4.5). Затем по формуле (4.3) вычислите удельную теплоту плавления олова λ и изменение энтропии ΔS в процессе кристаллизации по формуле (4.4).

Параметры установки:

$$m = 78 \text{ г}; \quad m_1 = 50 \text{ г}; \quad c_m = 230 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \quad c_{m1} = 1503 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

4.4. Сделайте вывод

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПОДГОТОВКИ

1. Какой физический смысл имеет коэффициент теплопроводности?
2. Каким образом определяется мощность нагревательного элемента (нити)?
3. Как определяется величина тока, протекающего по спирали?
4. Назовите методы теплопередачи.
5. Запишите уравнение адиабаты через параметры P , V ; V , T ; P , T .
6. Каким методом экспериментально определяется показатель адиабаты?
7. В чем состоит статистический смысл энтропии? Как изменяется энтропия в открытых и адиабатно замкнутых системах при равновесных и неравновесных процессах?
8. Чем объясняется расхождение полученных экспериментально значений удельной теплоемкости при $p = \text{const}$ для воздуха с расчетной величиной для двухатомного идеального газа?
9. Что такое термопара и термоЭДС в термопаре?
10. Отличаются ли понятия: фазовый переход и агрегатное состояние вещества?
11. Что такое фаза вещества? Сформулируйте условие равновесия фаз химически однородных веществ.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теплотехника : учебное пособие для студентов, обучающихся по специальности 21.05.04 «Горное дело» / В. В. Дырдин [и др.] ; ФГБОУ ВО «Кузбас. гос. техн. ун-т им. Т. Ф. Горбачева», Каф. физики. – Кемерово : Издательство КузГТУ, 2017. – 172 с. –

URL:

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=91591&type=utchposob:common>.

– Текст : непосредственный + электронный.

2. Термодинамика : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Горное дело» / В. В. Дырдин [и др.]; ГОУ ВПО «Кузбас. гос. техн. ун-т». – 2-е изд, перераб. и доп. – Кемерово : Издательство КузГТУ, 2009. – 176 с. –

URL:

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90911&type=utchposob:common>.

– Текст : непосредственный + электронный.

3. Теплотехника : учебник для инж.-техн. специальностей вузов / под ред. А. П. Баскакова. – 3-е изд., перераб. – Москва : БАСТЕТ, 2010. – 328 с. – Текст : непосредственный.

**Вывод формулы для расчета изменения энтропии
при изохорном нагревании воздуха
(см. лабораторную работу № 2)**

Изменение энтропии

$$\Delta S_V = \nu_1 \frac{i}{2} R \int_T^{T_0} \frac{dT}{T} = \nu_1 \frac{i}{2} R \ln \frac{T_0}{T}. \quad (1)$$

Учитывая уравнение изохорного процесса

$$\frac{p_0}{T} = \frac{p_2}{T_0} \rightarrow T = \frac{p_0 T_0}{p_2},$$

и подставив T в формулу (1), получим

$$\Delta S_V = \nu_1 \frac{i}{2} R \ln \frac{T_0}{T} = \nu_1 \frac{i}{2} R \ln \frac{p_2}{p_0} = \frac{i}{2} \nu_1 R \ln \frac{p_0 + \rho g h_2}{p_0}. \quad (2)$$

Оставшееся в баллоне число молей воздуха ν_1 найдем из уравнения состояния Клапейрона – Менделеева:

$$p_0 V_1 = \nu_1 R T.$$

Тогда

$$\nu_1 = \frac{p_0 V_1}{R T} = \frac{V_1 p_2}{R T_0}. \quad (3)$$

Выражение (3) подставим в формулу (2) и получим

$$\Delta S_V = \frac{i}{2} \frac{p_0 + \rho g h_2}{T_0} \ln \frac{p_0 + \rho g h_2}{p_0}.$$

Составители

Дырдин Валерий Васильевич
Мальшин Анатолий Александрович
Шепелева Софья Алексеевна

ТЕПЛОТЕХНИКА

Лабораторный практикум
для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело»

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 25.05.2020. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л. 1,5.

Тираж 24 экз. Заказ _____.

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП Кузбасского государственного технического
университета имени Т. Ф. Горбачева, 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 а.