

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

**ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ**

ББК В36я73-5  
УДК 539.19:536(075)  
М75

Рецензент

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры  
«Теоретическая и экспериментальная физика» ТГУ имени Г.Р. Державина  
*В.Е. Иванов*

Составители:

*Ю.М. Головин, В.Б. Вязовов,  
И.А. Осипова, В.Н. Холодилин,  
О.В. Исаева*

М75 Молекулярная физика и термодинамика: лаб. работы / сост. :  
Ю.М. Головин, В.Б. Вязовов, И.А. Осипова, В.Н. Холодилин,  
О.В. Исаева. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 28 с. – 250 экз.

Представлены лабораторные работы, выполнение которых предусмотрено учебной программой. Даны методические указания по их выполнению, описание установок и контрольные вопросы.

Предназначены для студентов 2 и 3 курсов дневного и заочного отделений инженерно-технических специальностей.

ББК В36я73-5

УДК 539.19:536(075)

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2008

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

Лабораторные работы  
для студентов 2 и 3 курсов дневного и заочного отделений  
инженерно-технических специальностей



---

Тамбов

◆ Издательство ТГТУ ◆  
2008

Учебное издание

## **МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

Лабораторные работы

Составители:

ГОЛОВИН Юрий Михайлович,  
ВЯЗОВОВ Виктор Борисович,  
ОСИПОВА Ирина Анатольевна,  
ХОЛОДИЛИН Валерий Николаевич,  
ИСАЕВА Ольга Вячеславовна

Редактор Ю.В. Ш и м а н о в а  
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 18.11.2008.  
Формат 60 × 84/16. 1,63 усл. печ. л. Тираж 250 экз. Заказ № 510.

Издательско-полиграфический центр  
Тамбовского государственного технического университета  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОЁМКОСТИ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР ОТ 350 К ДО 900 К

*Цель работы:* определить теплоёмкость металлов и коэффициент теплоотдачи методом охлаждения, провести проверку выполнимости закона Дюлонга и Пти.

*Приборы и принадлежности:* набор образцов, электропечь, ЛАТР, термopара, потенциометр КСП-4 или милливольтметр, градуированный по хромель-копелевой термopаре МПП-154М, секундомер.

### Общие сведения

Согласно классической теории теплоёмкости молярная теплоёмкость кристаллических тел при высоких температурах одинакова и равна  $25 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$  (закон Дюлонга и Пти). Этот закон может быть выведен теоретически. В классической теории теплоёмкости кристалл рассматривается как совокупность атомов (молекул), совершающих колебания с одной и той же частотой около положения равновесия, совпадающего с узлами кристаллической решётки. Каждый атом обладает тремя колебательными степенями свободы. Согласно закону равномерного распределения энергии по степеням свободы на каждую степень свободы приходится энергия  $U_0$ , равная  $\frac{1}{2}kT$ , где  $k$  – постоянная Больцмана. Полная энер-

гия колеблющейся частицы складывается из периодически меняющихся потенциальной  $E_{\text{п}}$  и кинетической энергий  $E_{\text{к}}$ , средние значения которых равны друг другу:  $\langle E_{\text{к}} \rangle = \langle E_{\text{п}} \rangle$ . Поскольку средняя энергия, приходящаяся на одну колебательную степень свободы колеблющейся частицы  $U_1 = 2 \cdot \frac{1}{2}kT = kT$ . На все три колебательные степени свободы приходится энергия  $U_3 = 3U_1 = 3kT$ . В одном моле содержится  $N_{\text{А}}$  атомов ( $N_{\text{А}}$  – число Авогадро), тогда внутренняя энергия моля кристалла  $U = 3kTN_{\text{А}} = 3RT$ , где  $kN_{\text{А}} = R$ ,  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$  – газовая постоянная.

Так как твёрдые тела обладают малым коэффициентом термического расширения и, следовательно, мало увеличиваются в объёме при нагревании, для них часто не различают теплоёмкость при постоянном объёме и теплоёмкость при постоянном давлении, а говорят просто о теплоёмкости твёрдого тела  $C$ , которая численно равна первой производной от внутренней энергии тела по температуре:

$$C = C_v = \frac{dU}{dT}. \quad (1.1)$$

Подставляя в выражение (1.1) для теплоёмкости значение внутренней энергии твёрдого тела, найдём

$$C = 3R. \quad (1.2)$$

Используя значение газовой постоянной  $R$ , получим  $C = 25 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ .

Таким образом, при достаточно высокой температуре атомная теплоёмкость всех твёрдых тел слабо зависит от температуры и равна  $3R$ .

Этот закон был открыт эмпирически ещё в XIX веке Дюлонгом (1785 – 1838) и Пти (1791 – 1820) и носит их имя (закон Дюлонга и Пти). Величины, приведённые в табл. 1.1, убеждают в том, что во многих случаях закон Дюлонга и Пти удовлетворительно выполняется и, следовательно, для указанных в таблице веществ колебания атомов уже при комнатной температуре можно считать независимыми. В то же время имеются такие вещества, как, например, алмаз или бор, для которых измеренное при комнатной температуре значение теплоёмкости существенно отличается от  $3R$ .

Для этих веществ, очевидно, комнатная температура, недостаточно высока для того, чтобы считать колебания атомов независимыми.

В случае твёрдых соединений, элементарная ячейка которых состоит из двух атомов, например  $\text{KCl}$ ,  $\text{PbO}$  и т.д., молекулярная теплоёмкость согласно этому правилу должна равняться  $6R$ , а для твёрдых соединений с ячейкой из трёх атомов, например  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{PbCl}_2$  и т.д., – соответственно  $9R$ . В таблице 1.2 приведены величины молекулярных теплоёмкостей некоторых соединений, подтверждающие сформулированное правило.

Как показывает опыт, постоянство теплоёмкости твёрдых тел нарушается при понижении температуры. Теплоёмкости твёрдых тел уменьшаются при понижении температуры, стремясь к нулю при приближении температуры к абсолютному нулю. Вблизи абсолютного нуля молярная теплоёмкость всех тел пропорциональна  $T^3$ .

### 1.1. Теплоёмкость твёрдых тел

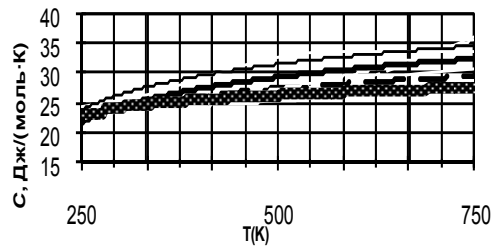
Вещество	Атомная теплоёмкость, $R$
Алюминий	3,07
Железо	3,18
Медь	2,95
Кремний	2,34

### 1.2. Молекулярная теплоёмкость химических соединений в твёрдом состоянии

Соединение	Молекулярная теплоёмкость, $R$
$\text{PbO}$	5,78
$\text{AgCl}$	6,29
$\text{BaCl}_2$	9,3

Теория теплоёмкости твёрдых тел была создана Эйнштейном и Дебаем. Она учитывает, что колебания частиц в кристаллической решётке не являются независимыми и энергия колебательного движения квантована.

На рисунке 1.1 изображено поведение теплоёмкостей некоторых веществ при изменении температуры. Как мы видим, при сравнительно высоких температурах теплоёмкости твёрдых тел слабо зависят от температуры. Это область применения закона Дюлонга и Пти. При температурах, прилегающих к абсолютному нулю, наблюдается пропорциональность теплоёмкости третьей степени температуры:  $C \sim T^3$  – это область, в которой выполняется закон Дебая. Между ними лежит промежуточная область, для которой количественную связь между теплоёмкостью и температурой пока установить не удалось.



**Рис. 1.1:**  
 — Ni; —•— Fe; - - - Al; ■■■■ Cu

### ТЕОРИЯ МЕТОДА И ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В настоящей работе для определения молярной теплоёмкости различных веществ использован закон охлаждения Ньютона: *всякое тело, имеющее температуру выше окружающей среды, будет охлаждаться, причём скорость охлаждения зависит от величины теплоёмкости тела и коэффициента теплоотдачи.*

Если взять два металлических стержня идентичной формы, то, сравнивая кривые охлаждения (температуры как функции времени) этих образцов, один из которых служит эталоном (его теплоёмкость и скорость охлаждения должны быть известны), можно определить теплоёмкость другого, определив скорость его охлаждения.

Количество теплоты  $dQ$ , теряемое телом с массой  $m$  объёмом  $V$  за время  $dt$  из определения удельной теплоёмкости:

$$dQ = -cmdT ;$$

$$dQ = -cmdT = -c\rho \frac{dT}{dt} Vdt , \tag{1.3}$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость металла;  $\rho$  – его плотность;  $dT$  – понижение температуры образца (можно считать температуру одинаковой во всех точках образца, так как линейные размеры тела малы, а теплопроводность металла велика). Величину количества теплоты  $dQ$  можно подсчитать, кроме того, из закона охлаждения Ньютона

$$dQ = \alpha(T - T_0)Sdt , \tag{1.4}$$

где  $S$  – площадь поверхности образца;  $T_0$  – температура окружающей среды;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Приравняв выражения (1.3) и (1.4), получим:

$$-c\rho \frac{dT}{dt} Vdt = \alpha(T - T_0)Sdt . \tag{1.5}$$

Полагая, что  $\frac{dT}{dt}$ ,  $c$ ,  $\rho$ ,  $\alpha$ ,  $T$  и  $T_0$  одинаковы для всего образца, напишем соотношение (1.5) для двух образцов – эталона (медь) и любого другого по выбору исследователя, у которых  $S_1 = S_2$ ,  $\alpha_1 = \alpha_2$  в малом интервале температур, нагретых до одинаковой температуры  $T_1 = T_2 = T_n$ . Делением одного выражения на другое получим:

$$c_1 = c_2 m_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_2 / m_1 \left( \frac{dT}{dt} \right)_1 , \tag{1.6}$$

где  $m_1$  – масса стального (алюминиевого) образца;  $m_2$  – масса медного образца.



Рис. 1.2

В данной работе определение теплоёмкости металлов производится на установке, представленной на рис. 1.2. Электродпечь *A* смонтирована на скамье, по которой она может перемещаться вправо и влево. Образец *B* (тоже может перемещаться) представляет собой цилиндр длиной 30 мм и диаметром 5 или 10 мм с высверленным каналом с одного конца, в который вставлена термопара. Концы термопары подведены к милливольтметру *C* или потенциометру *D*.

### Задание 1

#### Получение экспериментальных данных по температуре $T$ и времени $t$ охлаждения образца

1. Включите печь через лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), установите напряжение 100...110 В и выждите пока печь нагреется (10...15 мин).
2. **Внимание!!!** Все манипуляции проводите осторожно.  
Вдвиньте эталонный (медный) образец в печь и нагрейте до 500...600 °С, контролируя температуру по показаниям милливольтметра, проградуированного на показания температуры. Затем образец быстро выдвиньте из печи. С этого момента фиксируйте температуру (по показаниям милливольтметра она может быть 500...580 °С) и одновременно начните отсчёт времени остывания образца.
3. Записывайте в табл. 1.3 показания милливольтметра через каждые 10 с до достижения температуры 100 °С.
4. Повторите аналогичные измерения с неизвестным образцом. Полученные данные занесите в табл. 1.3.
5. Постройте графики зависимостей температуры охлаждения  $T$  образца от времени  $t$ :  $T = f(t)$ , откладывая по оси абсцисс время  $t$ , а по оси ординат температуру  $T$  для меди, а также алюминия (железа).

Примечание: пятый пункт не выполняется, если охлаждение образца фиксируется потенциометром, поскольку график охлаждения будет получен с его помощью (на ленте).

Таблица 1.3

№ опыта	Время (через каждые $\Delta t = 10$ с)	$T_{\text{Cu}}$ , °С	$T_{\text{Fe(Al)}}$ , °С

Для работы с потенциометром необходимо:

- включить его в сеть;
- включить механизм протяжки диаграммы ленты в момент выдвижения образца из печи;
- установить скорость протяжки ленты  $v$ .

После выдвижения образца из печи на диаграмме потенциометра отметьте момент начала записи охлаждения образца и значение начальной температуры. После охлаждения до 100 °С тоже сделайте отметку на диаграмме. Диаграмму охлаждения вклейте в свой отчёт.

Зная скорость протяжки ленты  $v$ , определите длину отрезка  $\Delta l$  диаграммы, соответствующему промежутку времени  $\Delta t = 10$  с;  $\Delta l = v\Delta t$ .

### Задание 2

#### Нахождение производных $\frac{dT}{dt}$ в окрестностях температур

Для того, чтобы найти отношение  $\frac{dT}{dt}$  выберите на кривой  $T = f(t)$  (для меди) точку, соответствующую температуре 500 °С, отложите от неё вправо и влево временные отрезки, равные  $\frac{\Delta t}{2} = 5$  с. Проведите через их крайние точки вер-

тикальные прямые до пересечения с кривой  $T = f(t)$ . Определите значения температур, соответствующих данным точкам пересечения по оси температур ( $T_1$  и  $T_2$ ). Повторите данную процедуру для температур 400 °С, 300 °С, 200 °С, 100 °С.

Сделайте аналогичные действия для кривой остывания железа (алюминия). Отношения  $\left(\frac{dT}{dt}\right)_1 = \frac{T_1 - T_2}{\Delta t_1} = \frac{\Delta T}{\Delta t}$  характеризуют скорость охлаждения, соответствующую некоторой температуре. Полученные результаты занесите в табл. 1.4.

Таблица 1.4

$T_{\text{н}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$\frac{\Delta T}{\Delta t}$		$c, \text{ Дж/кг }^\circ\text{C}$		$C_{\mu}, \text{ Дж/моль }^\circ\text{C}$	
	медь	железо (алюминий)	медь	железо (алюминий)	медь	железо (алюминий)
100			380			
200			390			
300			395			
400			397,5			
500			400			

**Примечание:** экспериментальные данные могут быть получены на ПК, сопряженным с цифровым вольтметром INSTЕК GDM 8246 по специальной программе, разработанной Быстрицким В.С. и представленной в виде файла-подсказки на рабочем столе.

### Задание 3

#### Определение удельной теплоёмкости железа (алюминия). Построение графика зависимости молярной теплоёмкости от температуры

Определите теплоёмкость  $c_2$  железа (алюминия) для температур 100, 200, 300, 400, 500 °С. Для этого в формулу (1.4) подставьте значения  $\frac{dT}{dt}$  для каждого образца при этих температурах. За эталонный образец принимают медный. Зависимость теплоёмкости меди от температуры приведена в табл. 1.4.

Молярная теплоёмкость  $C_{\mu}$  связана с удельной теплоёмкостью  $c$  известным соотношением:

$$C_{\mu} = c\mu, \quad (1.7)$$

где  $c$  – удельная теплоёмкость,  $\mu$  – молярная масса.

Используя формулу (1.7), переведите удельные теплоёмкости меди, железа (алюминия) в молярные теплоёмкости.

Молярная масса,  $\text{кг}\cdot\text{моль}^{-1}$ : меди –  $\mu_{\text{Cu}} = 64 \cdot 10^{-3}$ ; железа –  $\mu_{\text{Fe}} = 56 \cdot 10^{-3}$ ; алюминия –  $\mu_{\text{Al}} = 27 \cdot 10^{-3}$ .

Для вышеуказанных температур постройте графики зависимости молярной теплоёмкости от температуры, сравните их с кривой, представленной на рис. 1.1.

### Задание 4

#### Определение коэффициента теплоотдачи

Теплообмен происходит между поверхностью нагретого тела и окружающей средой. Этот процесс осуществляется путём конвекции и излучения и характеризуется коэффициентом теплоотдачи. Коэффициент теплоотдачи – количество теплоты, переданное в единицу времени через единицу поверхности при разности температур между поверхностью-теплоносителем и поверхностью-средой в 1 К, т.е.

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{\Delta S \Delta t (T_{\text{н}} - T_0)}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}. \quad (1.8)$$

**Примечание:** при больших температурах (более 300 °С) преобладает излучение, а при низких температурах конвективный теплообмен. Для определения коэффициента теплоотдачи следует:

1. По графику зависимости температуры охлаждения образца  $T = f(t)$  (определяет преподаватель) для начальных значений температур  $T_{\text{н}}$ , равных 500, 300 и 150 °С и соответствующих им начальных моментов времени  $t_{\text{н}}$  определить через промежуток времени  $\Delta t = 10$  с конечные температуры  $T_{1(2,3)}$  остывания.

2. По комнатному термометру определить температуру  $T_0$  окружающей среды. Площадь  $S$  рассчитать из геометрических размеров образца. Все данные внести в табл. 1.5.

3. Из закона охлаждения Ньютона

$$\alpha_{1(2,3)} = -\frac{mc}{S \Delta t_{1(2,3)}} \ln \frac{T_{1(2,3)} - T_0}{T_{\text{н}1(2,3)} - T_0}. \quad (1.9)$$

Вычислить коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  в разных температурных интервалах. Объяснить полученный результат.

Таблица 1.5

$T_{\text{н}1}$	$T_1$	$T_{\text{н}2}$	$T_2$	$T_{\text{н}3}$	$T_3$	$T_0$	$S, \text{ м}^2$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
°С								Вт/м <sup>2</sup> ·К		

**Примечание:** Вывод закона охлаждения Ньютона. Приравняем (1.4) и (1.5):

$$-cmdT = \alpha S(T - T_0)dt ; \quad (1.10)$$

разделим переменные и произведём интегрирование от  $T_H$  до какой-либо  $T_1$  – конечной температуры, получим:

$$\int_{t_1}^t dt = -\frac{cm}{\alpha S} \int_{T_H}^T \frac{dT}{T - T_0} ; \quad (1.11)$$

$$t - t_H = \Delta t = -\frac{cm}{\alpha S} \ln \frac{T_1 - T_0}{T_H - T_0} . \quad (1.12)$$

### Контрольные вопросы

1. Понятия: «теплоемкость», «молярная теплоемкость», «удельная теплоемкость», «коэффициент теплопередачи».
2. Классическая теория теплоёмкости твёрдых тел.
3. Закон Дюлонга-Пти.
4. Сущность метода, используемого в данной лабораторной работе для определения теплоёмкости и коэффициента теплопередачи металлов.

## Лабораторная работа 2

### ИЗМЕРЕНИЕ РАБОТЫ РАСШИРЕНИЯ ГАЗА

#### ПРИ ИЗОБАРНОМ ПРОЦЕССЕ В ИНТЕРВАЛЕ ТЕМПЕРАТУР $t_{\text{комн}} \dots (t_{\text{комн}} + 30)$ °С, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ $R$ И ПРОВЕРКА ПЕРВОГО НАЧАЛА ТЕРМОДИНАМИКИ

*Цель работы:* измерить работу расширения газа при изобарном процессе, определить газовую постоянную  $R$ , сделать проверку первого начала термодинамики.

*Приборы и принадлежности:* термостат с контактным термометром, колба, заполненная воздухом и совмещенная с водяным манометром для определения изменения объёма.

### Общие сведения

#### 1. Определение работы расширения газа при изобарном процессе

Расширяясь, газ совершает работу по перемещению поршня  $\delta A$ , равную  $p\delta V$ . Во время изобарного процесса работа газа при увеличении объёма от  $V_1$  до  $V_2$  равна:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p(V_2 - V_1) . \quad (2.1)$$

Нужно экспериментально определить работу  $A$  расширения воздуха при изобарном нагревании:

$$A = p\Delta V , \quad (2.2)$$

где  $p$  – атмосферное давление;  $\Delta V = S\Delta h$  – приращение объёма газа;  $S = \frac{\pi D^2}{4}$  – площадь сечения манометрической трубки, диаметр  $D$  которой равен 4 мм;  $\Delta h$  – понижение уровня мениска в левом колене манометрической трубки, соответствующее изменению температуры  $\Delta T$  при нагревании газа в колбе.

#### 2. Определение газовой постоянной $R$

Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT , \quad (2.3)$$

где  $R$  – газовая постоянная;  $V$  – объём газа;  $m$  – масса газа;  $M$  – молярная масса газа;  $T$  – термодинамическая температура газа.

Постоянная  $R$  одинакова для всех газов. Выразим её из (2.3):

$$R = pV \left/ \frac{m}{M} T \right. ,$$

где  $V$  – объём воздуха в колбе вместе с подводными трубками при комнатной температуре.

Объём легко вычислить, если рассмотреть уравнение Менделеева-Клапейрона для двух различных состояний газа:

- при комнатной температуре  $T_0$ :  $pV = \frac{m}{M} RT_0$ ; (2.4)

- при температуре  $T_0 + \Delta T$ :  $p(V + \Delta V) = \frac{m}{M} R(T_0 + \Delta T)$ . (2.5)

Поделив уравнение (2.5) на уравнение (2.4), получим:  $\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta T}{T_0}$ , откуда объём  $V$  газа равен:

$$V = \frac{T_0 \Delta V}{\Delta T} . \quad (2.6)$$



Учитывая, что масса газа может быть найдена как произведение плотности воздуха  $\rho$  на объём  $V$ , окончательно получим

$$m = \rho V = \rho \frac{T_0 \Delta V}{\Delta T} = \rho \frac{T_0 S \Delta h}{\Delta T}, \quad (2.7)$$

где  $\rho = 1,29 \text{ кг/м}^3$ ;  $\Delta T$  – приращение температуры, выбранное экспериментатором.

Так как нагрев воздуха происходит при постоянном давлении, то, продифференцировав уравнение Менделеева-Клапейрона по объёму, получим

$$pdV = \frac{m}{M} R dT, \text{ откуда } R = \frac{pdV}{\frac{m}{M} dT}. \quad (2.8)$$

Газовая постоянная  $R$  численно равна работе одного моля газа при изобарном нагревании его на один градус. Следовательно, зная работу расширения газа, можно найти постоянную  $R$  из соотношения (2.8). Однако в нашей работе, чтобы исключить ошибки при измерениях  $\Delta T$  и  $\Delta V$  рекомендуется определить газовую постоянную при исследовании зависимости изменения объёма газа от температуры:  $V = f(T)$ , которая представляет собой уравнение Менделеева-Клапейрона, записанное в виде:

$$V = \frac{mR}{Mp} T. \quad (2.9)$$

Величина, равная  $\frac{mR}{Mp}$ , является постоянной в данной лабораторной работе. Введём обозначение:

$$b = \frac{mR}{Mp}, \quad (2.10)$$

где  $m$  – масса газа, найденная ранее;  $p$  – атмосферное давление.

Выразим из (2.10) газовую постоянную  $R$ :

$$R = \frac{bMp}{m}. \quad (2.11)$$

Учитывая (2.10), выражение (2.9) можно представить в виде:

$$V = bT. \quad (2.12)$$

Выражение (2.12) представляет собой уравнение прямой, для которой  $b$  – угловой коэффициент.

Таким образом, построив по экспериментальным данным график зависимости объёма  $V$  от температуры  $T$ , можно определить значение углового коэффициента  $b$ , равного тангенсу угла наклона, а затем, используя выражение (2.11), рассчитать значение газовой постоянной  $R$ .

### 3. Проверка первого начала термодинамики

Согласно первому началу термодинамики, при изобарном нагревании газ поглощает некоторое количество тепла

$$\Delta Q = \Delta U + A, \quad (2.13)$$

где  $\Delta U$  – изменение внутренней энергии газа

$$\Delta U = \frac{im}{2M} R \Delta T, \quad (2.14)$$

где  $i$  – число степеней свободы молекулы газа,  $\Delta T$  – изменение температуры газа,  $A = p \Delta V$  – работа расширения газа.

При постоянном давлении

$$\Delta Q = \frac{i+2}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T \quad (2.15)$$

В данной работе по результатам измерений можно рассчитать величины работы  $A$ , изменения внутренней энергии  $\Delta U$ , количества теплоты  $\Delta Q$  и, подставив их в выражение (2.13), сравнить левую и правую части.

*Замечание:* для вычисления  $\Delta Q$  можно воспользоваться процентным соотношением между работой и количеством теплоты при изобарном процессе:

$$\Delta Q = \frac{A \cdot 100 \%}{28,5 \%}. \quad (2.16)$$

Выражение (2.16) легко получить, применив первое начало термодинамики к изобарному процессу для двухатомного газа.

Сравните полученное значение количеством теплоты  $\Delta Q$  с расчётным по формуле (2.15).

### Описание установки

На рисунке 2.3 показаны внешний вид установки (слева) и принципиальная схема (справа).

Работу расширения в данной установке совершает воздух, заключённый в сосуде В, который соединён с U-образной трубкой. В этой трубке находится вода, играющая роль поршня. Сосуд помещён в термостат с водой. При нагревании воды воздух в колбе расширяется. Уровень воды в U-образной трубке перемещается. При этом совершается работа про-

тив внешнего давления. Это давление складывается из атмосферного давления  $p$  и давления  $\Delta p$ , возникающего вследствие разности уровней воды в коленах U-образной трубки. Однако если разность уровней не превосходит 20 см, то  $\Delta p$  составляет не более 2 % от  $p$ . Поэтому можно считать, что во время опыта давление остаётся почти постоянным, и использовать для расчёта величину атмосферного давления. В верхней части капилляра имеется кран К, соединяющий рабочий объём с атмосферой. Он позволяет фиксировать начальное положение мениска в U-образной трубке независимо от начальной температуры и атмосферного давления. Объём сосуда В значительно больше объёма капилляра и U-образной трубки, находящейся вне термостата. Поэтому можно считать, что практически весь газ находится при температуре термостата.

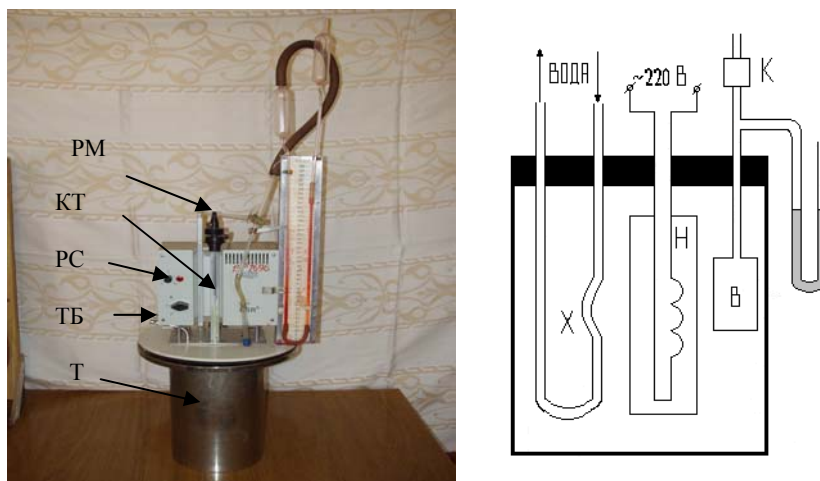


Рис. 2.1

Термостат Т имеет нагреватель Н, включаемый тумблером ТБ, и регулятор скорости РС нагрева, а также холодильник Х (змеевик), охлаждаемый проточной водой. Кроме того, термостат имеет специальную систему, позволяющую с помощью контактного термометра КТ автоматически поддерживать температуру вблизи заданной величины. Температура измеряется термометром с точностью 0,5 °С.

Контактный термометр КТ управляет работой электромагнитного реле, замыкающего и размыкающего цепь питания электронагревателя. Вращая головку регулировочного магнита РМ, изменяют положение проволоочки, опущенной в капилляр. Пользуясь шкалой, устанавливают остриё проволоочки против соответствующего деления. При включении нагревателя загорается неоновая лампочка. По мере нагревания воды, ртуть в капилляре поднимается и, достигнув заданной температуры, соприкасается с проволоочкой. При этом замыкается цепь электромагнитного реле, которое, срабатывая, размыкает цепь, питающую электронагреватель. Электронагреватель автоматически отключается, неоновая лампочка гаснет.

### Порядок выполнения работы

1. Перед началом опыта приведите установку в исходное состояние, т.е. температура в термостате должна быть 19–20 °С (за счёт нагрева или охлаждения водой). Запишите начальную температуру газа  $T_0$ .
2. Зафиксируйте положение менисков воды в U-образной трубке и закройте кран К.
3. Контактным термометром установите новую температуру на  $\Delta t = 3 - 5$  °С выше предыдущей и включите тумблер «нагрев».
4. По окончании нагрева произведите измерение понижения уровня мениска  $\Delta h_i$  в левом колене U-образной трубки и запишите в табл. 2.1.
5. Повторите измерения согласно п. 3, 4 до достижения температуры 40...45 °С, результаты занесите в табл. 2.1.
6. После окончания работы выключите нагреватель.

Таблица 2.1

№	$\Delta T_i, \text{K}$	$\Delta h_i, \text{м}$	$\Delta V_i, \text{м}^3$
1			
2			
...			

### Обработка результатов измерений

1. Вычислите массу газа по формуле (2.7).
2. Постройте график зависимости объёма  $V$  от температуры  $T$ . Для этого на оси абсцисс откладывайте интервал температур  $\Delta T_i$ , а на оси ординат – интервал изменения объёма  $\Delta V_i$ . По графику определите угловой коэффициент  $b$  полученной прямой, учитывая весь интервал изменения температуры  $\Delta T$  и объёма  $\Delta V$ .

- По формуле (2.11) рассчитайте значение газовой постоянной  $R$ . Сравните полученное значение с табличным.
- По формуле (2.2) рассчитайте значение работы  $A$ . За понижение уровня положения мениска в левом колене манометрической трубки примите разность  $\Delta h$ , соответствующую изменению температуры  $\Delta T$  за всё время эксперимента.
- Вычислите сообщённое воздуху количество теплоты  $\Delta Q$ , соответствующее изменению температуры  $\Delta T$  за всё время эксперимента, используя выражение (2.15).
- Вычислите изменение внутренней энергии  $\Delta U$ , соответствующее изменению температуры  $\Delta T$  за всё время эксперимента, используя выражение (2.14).
- Проверьте выполнение равенства (2.13). Сделайте вывод.

Необходимые постоянные:

$$S = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2; \mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; R = 8,32 \text{ Дж/(К·моль)}; p = 10^5 \text{ Па.}$$

### Контрольные вопросы

- Сформулируйте первое начало термодинамики и примените его к различным процессам в идеальном газе.
- Запишите в дифференциальной форме первое начало термодинамики для адиабатического процесса.
- Выведите уравнение Пуассона.
- Выведите уравнение Майера.
- Получите связь со степенями свободы теплоёмкостей  $C_p$  и  $C_V$ .

## Лабораторная работа 3

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ $C_p/C_V$ (для воздуха методом Клемана-Дезорма)

*Цель работы:* определить отношение  $C_p/C_V$  для воздуха методом Клемана-Дезорма, основанном на исследовании газа, последовательно переходящего в различные состояния.

*Приборы и принадлежности:* стеклянная колба, насос, манометр, секундомер.

#### Общие сведения

В настоящей работе определение отношения  $C_p/C_V$  производится одним из классических методов – методом Клемана-Дезорма. Большой сосуд при помощи крана (К1) сообщается с наружным воздухом (рис. 3.1), а с помощью крана (К2) – с водяным манометром и нагнетательным насосом.

В предстоящем опыте полная масса газа в сосуде будет изменяться. Поэтому будем оперировать удельным объёмом

$$v = \frac{V}{m}, \quad (3.1)$$

где  $m$  – масса газа;  $V$  – объём сосуда. Выделяя мысленно единичную массу газа, которая при всех изменениях остаётся внутри сосуда, для адиабатического процесса можно записать уравнение Пуассона:

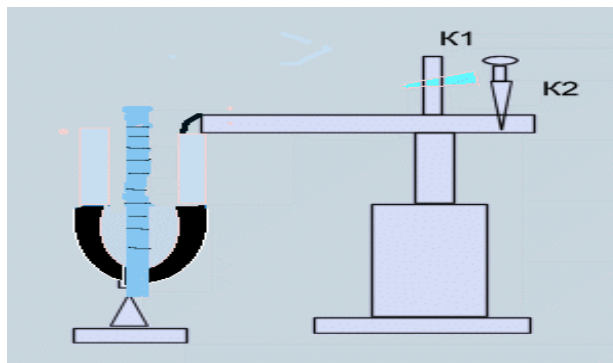


Рис. 3.1

$$pV^\gamma = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p^{\gamma-1}}{T^\gamma} = \text{const}. \quad (3.2)$$

Рассмотрим последовательно процессы, происходящие с газом (рис 3.2).

Закроем кран и быстро накачаем в сосуд воздух до тех пор, пока манометр не покажет разность давлений 115...120 мм вод.ст. Перекроем краном К2 трубку, соединяющую баллон с насосом. Процесс соответствует адиабате 0–1. Через 2–3 мин давление снизится от  $p_1$  до  $p_2$ , а температура снизится от  $T_1$  до  $T_2 = T_0$ , т.е. комнатной. Воздух изохорически перейдет из состояния  $(p_1, T_1, V_1)$  в состояние  $(p_2, T_0, V_2 = V_1)$  – процесс 1–2.



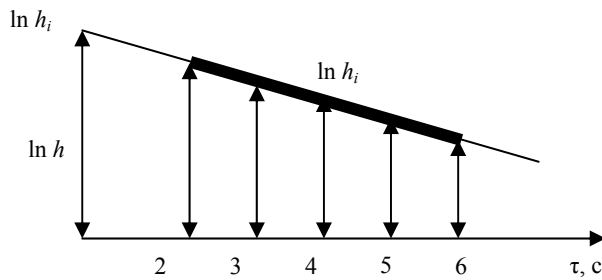


Рис. 3.3

### Порядок выполнения работы

1. Закройте кран  $K_1$  и накачайте воздух в баллон до тех пор, пока разность уровней не станет  $H = 115 \dots 120$  мм вод. ст.
2. Закройте кран  $K_2$ , выждите 1–2 минуты и добейтесь разности уровней  $H = 100$  мм медленным стравливанием воздуха краном  $K_1$ . Запишите данные в табл. 3.1.

Таблица 3.1

$\tau_i$	$\tau_1 = 2$	$\tau_2 = 3$	$\tau_3 = 4$	$\tau_4 = 5$	$\tau_5 = 6$
$H$					
$h_i$					
$\ln h_i$					

3. Быстро откройте кран  $K_1$ , одновременно включив секундомер, и через  $\tau = 2$  с его закройте.
4. Сделайте отсчёт разности уровней  $h_i$  через 2–3 мин. Для выбранного значения  $H$  повторить опыт для 4 различных значений времени запаздывания  $\tau$  с интервалом в 1 секунду согласно п. 1–4. При этом помните, что в каждом эксперименте  $H$  должна быть постоянной.
5. Повторите опыт 3 раза для различных начальных значений  $H$ .
6. Постройте три графика зависимости  $\ln h_i = f(\tau)$  для  $H_1, H_2, H_3$ .
7. Определите на графике три величины  $h$ .
8. По формуле (3.7) рассчитайте  $\gamma$ .
9. Считая воздух двухатомным газом, рассчитайте теоретическое значение  $\gamma$  и сравните с найденным экспериментально.

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение молярной и удельной теплоёмкостей. Покажите связь между ними.
2. Выведите уравнения Майера и объясните физический смысл газовой постоянной  $R$ .
3. Выведите расчётную формулу для постоянной адиабаты  $\gamma$ .
4. Выведите уравнение Пуассона.
5. Каковы источники погрешностей в данной работе?
6. Каковы основные недостатки классической теории теплоёмкости идеальных газов?
7. Что означает внутренняя энергия идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

## Лабораторная работа 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЁМКостей $C_p/C_V$ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ЗВУКА

*Цель работы:* определить отношения молярных теплоёмкостей  $C_p/C_V$  методом измерения скорости звука.  
*Приборы и принадлежности:* звуковой генератор ЗГ, электронный осциллограф, микрофон, телефон.

#### Общие сведения

Скорость распространения продольных волн в упругой среде вычисляется по формуле:

$$U = \sqrt{E/\rho}. \quad (4.1)$$

Модуль Юнга  $E$  определяется по деформации упругого стержня длиной  $l$ :

$$E = -\frac{P_n}{\varepsilon} = -P_n \left/ \frac{\Delta l}{l} \right.,$$

где  $p_n$  – упругое напряжение в стержне,  $\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon$  – относительное удлинение.

Для столба газа напряжение  $p_n$  заменим добавочным (избыточным) давлением  $\Delta p$ , вызывающим сжатие газа, а относительную линейную деформацию  $\frac{\Delta l}{l}$  – относительной объёмной деформацией  $\frac{\Delta V}{V}$ , так как столб газа сжимается только вдоль своей длины (вдоль направления распространения волны). Таким образом, для газа имеем

$$E = -p_n \frac{\Delta V}{V}. \quad (4.2)$$

По сравнению с твёрдыми телами газы обладают гораздо худшей теплопроводностью, и поэтому участки сжатия (где происходит нагрев) и участки разрежения (охлаждение) не успевают обменяться теплом, что приводит к увеличению упругости газа. Сжатие и разрежение происходит адиабатически, т.е. без обмена теплом. Найдем значение  $E$  по формуле (4.2) при адиабатическом сжатии газа. Запишем сначала (4.2) так:

$$E = -V \frac{\Delta p}{\Delta V}. \quad (4.3)$$

Заменим приращение дифференциалами, получим

$$E = -V \frac{dp}{dV}. \quad (4.4)$$

Производную  $\frac{dp}{dV}$  вычислим из уравнения Пуассона для адиабатического процесса

$$pV^\gamma = \text{const}, \quad (4.5)$$

где  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  – отношение теплоёмкости при постоянном давлении к теплоёмкости при постоянном объёме.

Дифференцируя уравнение Пуассона по  $V$ , получим

$$\frac{dp}{dV} V^\gamma + p\gamma V^{\gamma-1} = 0,$$

отсюда

$$\frac{dp}{dV} = -\frac{\gamma p}{V}. \quad (4.6)$$

Подставляя это выражение в (4.4), получим

$$E = \gamma p.$$

Теперь формула (4.1) для скорости звука примет вид:

$$U = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}. \quad (4.7)$$

Хотя в формуле присутствует давление  $p$ , тем не менее скорость звука не зависит от давления газа. Действительно, подставляя в (4.7) вместо  $p$  выражение, полученное из уравнения состояния идеального газа  $pV = RT$  (где  $V$  – объём одного моля газа,  $T$  – термодинамическая температура), и учитывая, что  $\rho V = M$  есть молярная масса, приходим к следующей формуле для скорости звука в газе:

$$U = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (4.8)$$

отсюда

$$\gamma = \frac{M}{RT} U^2. \quad (4.9)$$

Из соотношения (4.9) видно, что скорость звука не зависит от давления газа, но пропорциональна  $\sqrt{T}$  (величины  $\gamma$ ,  $R$ ,  $M$  – постоянные для данного газа).

При условии, что плотность воздуха не слишком велика, скорость (фазовая скорость  $U$ ) звуковых волн практически не зависит от частоты (отсутствие дисперсии). Если представить себе, что в некоторой точке пространства давление меняется во времени по закону

$$p = p_0 \sin \omega t, \quad (4.10)$$

то на расстоянии  $X$ , в направлении распространения волны, такие же колебания будут наблюдаться по истечении времени  $\tau = \frac{X}{U}$ , т.е.

$$p = p_0 \sin \omega \left( t - \frac{X}{U} \right). \quad (4.11)$$

Выражение (4.11) отражает характерное свойство волны, что фаза изменения давления линейно возрастает в направлении распространения волны

$$\varphi = \frac{\omega X}{U}. \quad (4.12)$$

Расстояние, на котором фаза изменяется на  $2\pi$ , называется длиной волны  $\lambda$ . Согласно этому

$$\lambda = \frac{2\pi U}{\omega} = \frac{U}{\nu}, \quad (4.13)$$

где  $\nu$  – частота, заданная звуковым генератором.

Метод измерения длины волны  $\lambda$  основывается на установлении минимального расстояния между точками пространства, в которых колебания давления происходит синфазно.

Вспользуемся установкой, состоящей из звукового генератора (ЗГ), динамика (Д), микрофона (М) и осциллографа (ЭО). Схема представлена на рис. 4.1.

Сигналы от звукового генератора и динамика подаются на вход пластин осциллографа, находящихся во взаимно перпендикулярном положении ( $X$ ,  $Y$ ). В результате суперпозиции взаимно перпендикулярных гармонических колебаний луч на экране осциллографа будет вычерчивать эллипс

$$\frac{X^2}{p_{0X}^2} + \frac{Y^2}{p_{0Y}^2} - \frac{2XY}{p_{0X}p_{0Y}} \cos \varphi = \sin^2 \varphi,$$

форма и ориентация которого зависит от фазы сигнала микрофона.

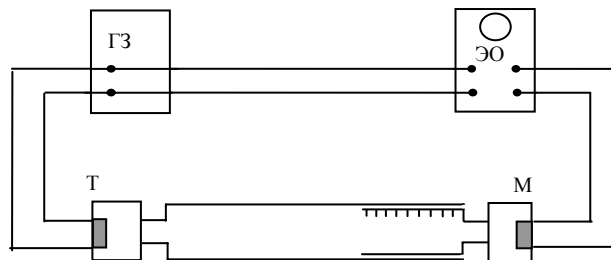


Рис. 4.1

Перемещая микрофон, фаза колебания звукового сигнала с микрофона будет изменяться согласно уравнению (4.13), в то время как фаза сигнала со звукового генератора не меняется.

Измерения производят в следующем порядке: устанавливают микрофон на скамью так, чтобы на экране осциллографа была прямая линия, затем перемещают его до получения такой же прямой. Очевидно, величина перемещения равна длине волны.

### Порядок выполнения работы

1. Начертите в рабочей тетради таблицу для внесения измеряемых величин.
2. Измерьте длину волны  $\lambda$ , зная частоту  $\nu$  звука, излучаемого генератором (ЗГ), вычислите скорость звука  $U = \lambda\nu$ . Измерения проделайте для различных частот в интервале от 900 до 1100 Гц с шагом 50 Гц. Полученные данные занесите в табл. 4.1. Интервал обусловлен чувствительностью телефона.
3. Определите из формулы (4.9) адиабатическую постоянную. Оцените погрешность измерения. Среднее значение молярной массы примите равным  $M = 29,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг}\cdot\text{моль}^{-1}$ .

Результаты вычислений представьте в виде:

$$\gamma = \gamma_{\text{ср}} \pm \Delta\gamma; \quad E = \dots\%$$

Таблица 4.1

№	$\lambda$ , м	$\nu$ , Гц	$U_i$	$\gamma_i$	$\Delta\gamma_i$	$\Delta\gamma_i^2$	$S_\gamma$	$\Delta\gamma$
1								
2								
3								
4								
5								
				$\gamma_{\text{ср}} =$				

### Контрольные вопросы

1. Дать определение молярной и удельной теплоёмкостей. Показать связь между ними.
2. Вывести соотношение между  $C_p$  и  $C_V$  через степени свободы.
3. Вывести уравнения Майера и объяснить физический смысл универсальной газовой постоянной. Вывести расчётную формулу для  $\gamma$ .
4. Вывести уравнение Пуассона.
5. Каковы источники ошибок в данной работе?
6. Каковы основные трудности классической теории теплоёмкости идеальных газов?
7. Что означает внутренняя энергия идеального газа с точки зрения молекулярно-кинетической теории?

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИРАЩЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ НАГРЕВАНИИ И ПЛАВЛЕНИИ ОЛОВА

*Цель работы:* получение диаграммы нагревания и охлаждения олова, определение температуры плавления и приращение энтропии олова.

*Приборы и принадлежности:* кварцевый тигель с оловом, термопара, вольтметр В7-32, стабилизированный источник тока ТЕС-13, градуировочная кривая термопары, секундомер.

### Общие сведения

Переход кристаллического твёрдого тела в жидкое (плавление) и обратно (кристаллизация) относится к фазовым превращениям первого рода, при которых скачком изменяется плотность, внутренняя энергия, энтропия тела. При этом поглощается (при плавлении) или выделяется (при кристаллизации) энергия, называемая теплотой плавления (кристаллизации). Если давление не меняется, то температура тела во время фазового перехода остаётся постоянной. *Энтропией* системы называется однозначная функция состояния, приращение которой равно количеству тепла, подводимому к системе обратимо, делённому на абсолютную температуру, при которой это тепло подводится  $dS = \frac{dQ}{T}$ . Энтропия характеризует степень беспорядочности теплового движения частиц в системе.

Олово, как известно, имеет кристаллическую структуру и характеризуется упорядоченным пространственным расположением частиц на большом расстоянии, т.е. в расположении атомов олова реализуется дальний порядок. Идеализированная кривая нагревания и плавления олова имеет вид, изображённый на рис. 5.1 слева.

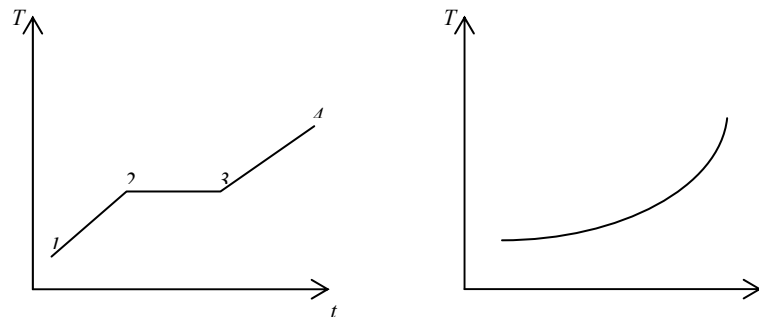


Рис. 5.1

Участок 1–2 графика соответствует нагреванию олова до температуры плавления  $T_{пл}$ . С повышением температуры увеличивается интенсивность теплового хаотического движения атомов и амплитуда их колебаний. При дальнейшем нагревании начинается процесс плавления, в течение которого температура олова остаётся неизменной (участок 2–3). При  $T = T_{пл}$  амплитуда колебаний атомов становится настолько большой, что начинается разрушение кристаллической решётки, на что расходуется вся подводимая извне теплота. Увеличивается хаотичность в расположении атомов, исчезает дальний порядок, энтропия системы резко возрастает. Изменение энтропии  $\Delta S$  при нагревании и плавлении олова складывается из изменения энтропии  $\Delta S_1$  при нагревании от начальной температуры  $T_n$  до температуры плавления  $T_{пл}$  и изменения энтропии  $\Delta S_2$  при плавлении олова:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2,$$

где

$$\Delta S_1 = \int_{T_n}^{T_{пл}} \frac{dQ}{T} = \int_{T_n}^{T_{пл}} \frac{cm dT}{T} = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_n}; \quad \Delta S_2 = \int_2^3 \frac{dQ}{T} = \frac{\lambda m}{T_{пл}}.$$

Окончательно получаем:

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{пл}}{T_n} + \frac{\lambda m}{T_{пл}},$$

где  $m$  – масса олова;  $c$  – удельная теплоёмкость олова;  $\lambda$  – удельная теплота плавления олова.

В аморфных телах, к которым относятся парафин, воск, полистирол и др., реализуется ближний порядок во взаимном расположении атомов. Это означает, что упорядоченное расположение частиц по отношению к любой выбранной частице наблюдается только в пределах малого объёма. Кривая нагревания, например полистирола (рис. 5.1 справа), отличается от кривой нагревания олова. Для аморфных тел нет определённой температуры перехода в жидкое состояние, можно указать лишь интервал температур, в пределах которого происходит размягчение тела.

Для измерения температуры олова в данной работе используется термопара (хромель-алюмель). Действие термопары основано на том, что в спае двух разнородных проводников возникает контактная термоэлектродвижущая сила, примерно пропорциональная температуре спае. Так называемый «горячий» спай приводят в контакт с испытуемым телом, а роль «холодных» спаев выполняют контакты термопары с клеммами вольтметра, которые имеют комнатную температуру ( $\sim 25^\circ$ ). Градуировка термопары приведена в виде графика.



## Описание установки

Схема установки приведена на рис. 5.2. В кварцевом тигле 1 находится олово (~20 г.). Нагрев спирали 2 осуществляется от стабилизированного источника тока ТЕС-13. Скорость нагрева зависит от напряжения  $U$  источника. Внутри исследуемого вещества (олова) помещён «горячий» спай термопары 3. Для измерения величины термо-ЭДС используется комбинированный цифровой прибор В7-32.

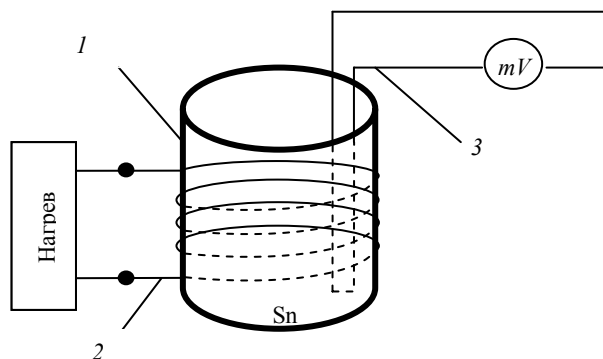


Рис. 5.2

## Ход работы

1. Ознакомьтесь с установкой.
2. Включите прибор ТЕС-13 (предварительно отсоединив от его клемм нагревательный элемент). По указанию преподавателя или лаборанта установите величину выходного напряжения, определяющую нужную скорость нагрева ( $20 \pm 2$ ) В. Выключите прибор, присоедините нагревательный элемент.
3. Включите прибор В7-32. Поставьте переключатель прибора в положение ( $U-$ ). Запишите начальное значение измеряемого напряжения.
4. Пустите секундомер и одновременно включите нагрев (прибор ТЕС-13). Через каждые 30 с записывайте значения измеряемого напряжения в таблицу 5.1:
5. Когда напряжение достигнет величины ~9.2 мВ выключите нагрев и снова через каждые 30 с записывайте показания прибора в таблицу. Продолжать измерения следует в течение ~ 10 мин.
6. Выключите прибор В7-32.

Таблица 5.1

№	$U_i$ , мВ	$t_i$ , °С
1		
...		

Примечание: экспериментальные данные могут быть получены на ПК, сопряженным с цифровым вольтметром INSTЕК GDM 8246 по специальной программе, разработанной Быстрицким В.С. и представленной в виде файла-подсказки на рабочем столе.

## Обработка результатов

1. Для каждого значения измеренного напряжения найдите соответствующее значение температуры, пользуясь градуировочным графиком, и запишите в таблицу.
2. Постройте на миллиметровой бумаге графики зависимости температуры  $t$  °С от времени при нагревании и охлаждении олова. Пользуясь графиками, найдите температуру плавления олова

$$t_{\text{пл}}^{\circ} = \frac{t_{\text{пл}}^{\circ(1)} + t_{\text{пл}}^{\circ(2)}}{2},$$

где  $t_{\text{пл}}^{\circ(1)}$  – температура плавления олова при нагревании, а  $t_{\text{пл}}^{\circ(2)}$  – температура плавления олова при охлаждении. Примерный вид графиков показан на рис. 5.3.

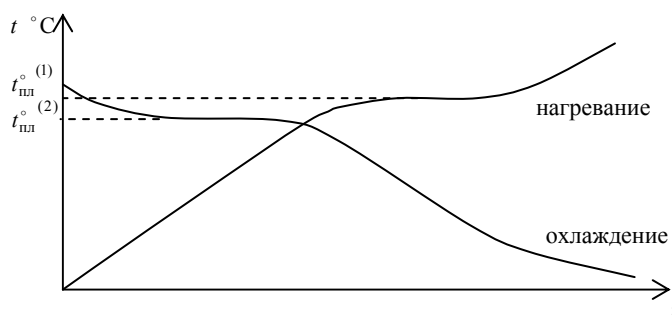


Рис. 5.3

3. Вычислите приращение энтропии  $\Delta S$  при нагревании олова от 50 °С до температуры плавления ( $T_{\text{пл}}$ , К) и при плавлении его по формуле

$$\Delta S = cm \ln \frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{н}}} + \frac{\lambda m}{T_{\text{пл}}},$$

где  $T_{\text{пл}} = t_{\text{пл}}^{\circ} + 273$ ;  $T_{\text{н}} = 323$  К;  $m = 20$  г;  $c = 230$  Дж/(кг·К);  $\lambda = 5,86 \cdot 10^4$  Дж/кг.

### Контрольные вопросы

1. Определение энтропии и её свойства, статистический смысл.
2. Второе начало термодинамики.
3. Понятие фазового перехода.
4. Кривая нагревания и плавления олова, кривая нагревания аморфного вещества.
5. Принцип действия термопары.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Савельев, И.В. Курс физики / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1989. – Т. 1.
2. Савельев, И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М. : Наука, 1987. – Т. 3.
3. Детлаф, А.А. Курс физики : учеб. пособие для втузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 4-е изд., испр. – М. : Высшая школа, 2002. – 718 с.
4. Трофимова, Т.И. Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 7-е изд., стер. – М. : Высшая школа, 2001. – 542 с.
5. Лабораторный практикум по физике : учеб. пособие для втузов / А.С. Ахматов, В.М. Андреевский, А.И. Кулаков и др. ; под ред. А.С. Ахматова. – М. : Высш школа, 1980. – 360 с.
6. Лабораторный практикум по физике ; под ред. К.А. Барсукова и Ю.И. Уханова. – М. : Высшая школа, 1988.
7. Майсова, Н.Н. Практикум по курсу общей физики : учеб. пособие / Н.Н. Майсова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Высшая школа, 1970. – 448 с.