

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»**

молекулярная физика и термодинамика

Лабораторный практикум

Чебоксары 2010

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

молекулярная физика и термодинамика

Лабораторный практикум

Чебоксары 2010

УДК 539.19 (076.5)
ББК 22.36я73+22.317я73

Составители: В.В. Егоров,
А.С. Макаров,
Г.М. Сорокин

Молекулярная физика и термодинамика: лаб. практикум
/сост. В.В. Егоров, А.С. Макаров, Г.М. Сорокин; Чуваш. ун-т. –
Чебоксары, 2010. – 72 с.

Изложены методические указания, требования, а также семь лабораторных работ, которые составлены в соответствии с действующей программой по физике.

Для студентов I курса технических факультетов вузов. Практикум может быть весьма полезен бакалаврам и магистрам наук.

Утверждено Методическим советом университета

Ответственный редактор д-р пед. наук,
профессор В.Н. Иванов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий лабораторный практикум по физике для инженерно-технических специальностей представляет собой переработанный вариант книг, изданных в Чувашском госуниверситете в 1982 и 1998 гг. При его подготовке к переизданию учитывалось имеющееся оборудование лабораторных работ, исправлены ошибки и опечатки в описаниях и учтены дружеские пожелания коллег кафедры общей физики, а также учтена проблема с переходом высшей школы на многоуровневую систему подготовки специалистов.

В связи с этим авторы практикума проделали следующую работу:

1) переработали описания и предложили комплексный подход к выполнению лабораторных работ, следуя темам лекций по изучению курса общей физики;

2) Решением кафедры было предложено раскрыть два лабораторных стенда, чтобы были видны все принадлежности и приборы за лицевой панелью установки. В этом случае при подготовке и допуске к выполнению работы студент имеет возможность разобраться с будущей экспериментальной установкой;

Теоретические и практические части описаний, изложенные в настоящем издании, призваны помочь студентам глубже понять основные рассматриваемые явления. Перечень контрольных вопросов к каждой работе помогает решению поставленной задачи, которые также частично переработаны и прошли коллегиальное кафедральное обсуждение. Каждая лабораторная работа содержит краткую теорию, описание лабораторной установки, порядок выполнения и обработки результатов. В приложении содержатся необходимые для выполнения лабораторных работ физические постоянные.

Авторы выражают благодарность рецензентам профессору В.С. Аbruкову и доценту С.И. Ксенофонтову, а также всем, кто помогал выходу этого издания.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТ

Все лабораторные работы по молекулярной физике и термодинамике выполняются бригадами по два человека строго в соответствии с графиком, который утверждается кафедрой и вывешивается в лабораториях. Замена отдельных работ практикума разрешается только заведующему кафедрой и лекторам, ведущим занятия с данной учебной группой. При выполнении лабораторных работ студенты обязаны выполнять правила внутреннего распорядка и техники безопасности. С этой целью преподаватель, ведущий лабораторный практикум, на первом вводном занятии проводит инструктаж по технике безопасности и пожарной безопасности. По прохождении инструктажа студенты, обязуясь его выполнять, должны расписаться в специальном лабораторном журнале.

Для успешного выполнения лабораторных работ студентам необходимо заблаговременно подготовиться к ним в часы самостоятельной работы. В помощь студентам описания лабораторных работ и их электронные версии выложены на веб-сайте с логином-названием `chuvsu.ru/~clmc\`. Эта страница Интернета разработана, внедрена и применяется в учебном процессе доцентом Г.М. Сорокиным. Подготовиться к лабораторной работе студент может и в специально отведенные часы, которые указаны на стенде объявлений в лаборатории «Молекулярная физика и термодинамика», где можно ознакомиться с экспериментальной установкой и описанием выполняемой работы. При этом студенты должны изучить цели и задачи заданной работы, сделать конспект по содержанию и порядку ее выполнения, разобраться с техническими характеристиками отдельных приборов, применяемых в данной работе, а также правилами обращения с ними. Для более детального рассмотрения некоторых вопросов, помимо описания лабораторных работ, следует использовать рекомендуемую в конце работ литературу.

Обязательным элементом предварительной подготовки является составление отчета по требованиям стандарта,

введенного на кафедре общей физики. При оформлении отчета следует руководствоваться общими правилами оформления научно-технической документации. Чертежи, схемы и рисунки выполняются по правилам технического черчения с соблюдением ГОСТов, а графики вычерчиваются на миллиметровой бумаге. Текстовая часть отчета оформляется на листах бумаги формата А4 в виде рукописного или компьютерного варианта. В исключительных случаях отчет можно оформлять в отдельной тетради. Отчет о лабораторной работе должен включать следующие элементы:

1) титульный лист, на котором указаны номер и название работы, дата ее выполнения, фамилия и инициалы студента и преподавателя, а также наименование вуза и кафедры;

2) цель работы;

3) краткую теоретическую часть с расчетными формулами;

4) электрическую схему установки с обозначением всех элементов, технические характеристики применяемых приборов (их спецификация), табличные и другие данные, необходимые для расчетов;

5) таблицы результатов измерений, формулы для вычисления погрешностей;

6) результаты расчетов средних значений, относительных и абсолютных погрешностей косвенных измерений;

7) запись окончательного результата эксперимента с указанием среднего значения и абсолютной погрешности измерения.

Образец оформления отчета о лабораторной работе имеется на стенде в лаборатории «Молекулярная физика и термодинамика». К выполнению лабораторных работ студенты могут приступить только после сдачи допуска преподавателю, который проверяет:

1) понимание целей и задач работы;

2) наличие подготовленного конспекта лабораторной работы, включая наличие таблицы для прямых измерений и рабочих формул;

3) знания основных этапов работы, последовательности их выполнения и методы измерения физических величин;

4) знания принципов работы приборов и правила обращения с ними;

5) знания правил техники безопасности.

Студенты, явившиеся на занятия неподготовленными, т.е. не имеющие конспекта, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Приступая к выполнению лабораторных работ, студенту необходимо обратиться к лаборанту за принадлежностями, которые выдаются на документ, удостоверяющий личность студента.

В практикуме представлены лабораторные работы, которые требуют электрических соединений. Источник питания следует подключать к схеме последним. Собранный электрическую схему можно включать только после проверки преподавателем или лаборантом. После включения установки необходимо приступать к выполнению задания, придерживаясь последовательности, указанной в описании к лабораторной работе, а также используя практические советы и указания преподавателя или лаборанта. После окончания работы установка должна быть отключена от источника питания. Полученные результаты измерений должны быть представлены преподавателю для проверки и подписи о выполнении лабораторной работы.

Защита лабораторной работы проводится преподавателем в дни лабораторных занятий, указанных в графике для каждой бригады. Защита проходит в виде собеседования с каждым студентом индивидуально. На защиту студент должен представить конспект выполненной и рассчитанной работы. На защите студент должен знать цель работы, методику проведения опыта и вывод расчетной формулы эксперимента. На защите студент должен уметь отвечать на вопросы преподавателя по выполненной лабораторной работе и на контрольные вопросы, приведенные в конце лабораторной работы, которые необходимо кратко подготовить в конце конспекта лабораторной работы.

Лабораторная работа 1

ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ

Цель работы: экспериментальное определение теплоемкости воздуха при постоянном давлении методом протока; изучение метода измерения разности температур.

Теоретические основы работы

Теплоемкостью называют отношение количества теплоты, полученного телом (веществом) при бесконечно малом изменении его состояния, к вызванному этим изменением приращению температуры:

$$C_{\text{тела}} = \frac{dQ}{dT}. \quad (1)$$

Теплоемкость единицы массы вещества называют удельной теплоемкостью:

$$c = \frac{dQ}{m dT}. \quad (2)$$

Теплоемкость одного моля вещества называют молярной теплоемкостью:

$$C = cM, \quad (3)$$

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

Теплоемкость идеального газа зависит от вида процесса, в результате которого к телу подводится теплота. Для расчета теплоемкости одного моля идеального газа следует воспользоваться первым началом термодинамики для элементарного квазистатического процесса (квазистатическим процессом называют термодинамический процесс, происходящий настолько медленно, что термодинамическая система в течение всего процесса остается близкой к состоянию равновесия):

$$\delta Q = dU + \delta A = dU + p dV, \quad (4)$$

где δQ – элементарное количество теплоты, полученное телом; dU – элементарное изменение внутренней энергии газа; δA – элементарная работа газа; p – давление газа; dV – элементарное изменение объема.

Для вычисления молярной теплоемкости необходимо знать термодинамическое уравнение состояния идеального газа. Для одного моля газа уравнение Клапейрона – Менделеева имеет вид

$$pV = RT . \quad (5)$$

Выражение для внутренней энергии

$$U_M = \frac{i}{2} RT , \quad (6)$$

где $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – универсальная газовая постоянная; i – число степеней свободы молекулы газа.

Из (1)-(6) получим соотношения для молярных теплоемкостей идеального газа в изопроцессах:

1) для изохорного процесса ($V=\text{const}$), следовательно, $\delta A = 0$ и $\delta Q = dU$

$$C_V = \left(\frac{dU}{dT} \right)_V = \frac{i}{2} R ;$$

2) для изобарного процесса ($p=\text{const}$), следовательно, $\delta Q = dU + \delta A = dU + p dV$

$$C_p = C_V + p \left(\frac{dV}{dT} \right)_p = C_V + R .$$

Для воздуха эффективная молярная масса $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, число степеней свободы молекул (основными компонентами воздуха являются азот и кислород – двухатомные молекулы) $i = 5$. Отсюда теоретическое значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении, считая воздух идеальным двухатомным газом:

$$c_p = \frac{7}{2} \frac{R}{M} = 1003 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} . \quad (7)$$

Описание установки. Вывод расчетных формул

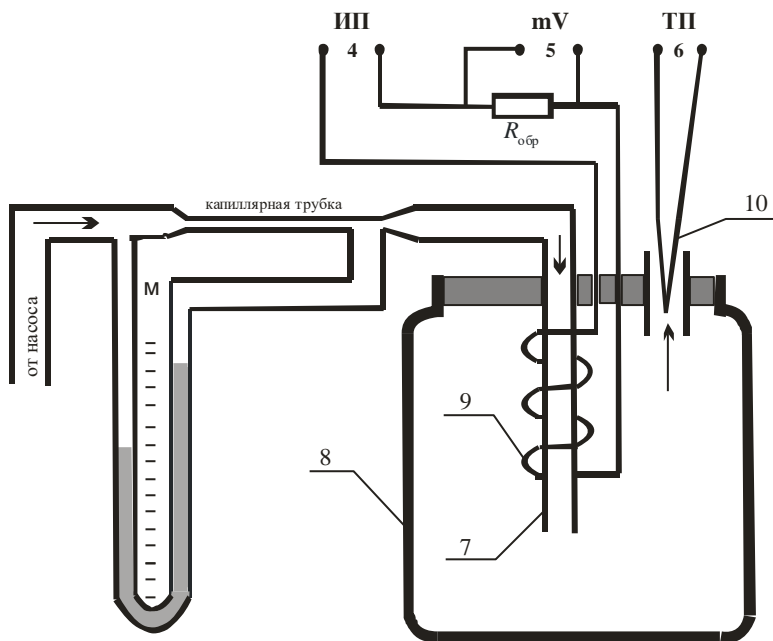


Рис. 1.1. Принципиальная схема установки

Воздух прокачивается насосом через цилиндрическую трубку 7 (рис. 1.1), помещенную в калориметре (сосуде Дьюара) 8. Протекающий через трубку воздух нагревается электрической спиралью 9. Разность температур воздуха на входе трубки 7, равной температуре воздуха в лаборатории, и на выходе из калориметра 8 нагретого воздуха измеряется дифференциальной хромель-алюмелевой термопарой 10. ТермоЭДС E термопары измеряется цифровым милливольтметром **ЦВ (mV)**, разъемы 3 которого соединяются с разъемами 6 **ТП** термопары (рис. 1.2). Электрический нагреватель питается постоянным током от универсального блока питания (УБП), подключенного к нагревателю через разъемы 4 **ИП**. Напряжение на нагревателе измеряется цифровым вольтметром **ЦВ (V)**, разъемы 2 которого соединяются с разъемами 1 УБП. Падение напряжения на образ-

цовом сопротивлении $R_{\text{обр}}$ измеряется цифровым милливольтметром ЦВ (mV), разъемы 3 которого соединяются с разъемами 5 mV.

Элементарное количество теплоты dQ , полученное телом (воздухом) за элементарный промежуток времени dt , можно записать

$$dQ = Pdt = I_n U_n dt, \quad (8)$$

где P – электрическая мощность, выделяемая нагревателем 9;

I_n – ток нагревателя; U_n – напряжение нагревателя.

Ток в нагревателе (электрической спирали 9) рассчитывается по падению напряжения на образцовом сопротивлении по формуле

$$I_n = \frac{U_R}{R_{\text{обр}}}, \quad (9)$$

где U_R – падение напряжения на образцовом сопротивлении.

Масса воздуха m , нагреваемого на температуру θ за элементарный промежуток времени dt , рассчитывается по формуле

$$m = m_t dt = \rho V^\beta dt, \quad (10)$$

где m_t – массовый расход воздуха; ρ – плотность воздуха; V^β – объемный расход воздуха.

Объемный расход воздуха определяется по формуле Пуазейля

$$V^\beta = \frac{\pi r_0^4 \Delta p}{8L\eta}, \quad (11)$$

где r_0 – радиус капилляра; L – длина капилляра; η – коэффициент внутреннего трения воздуха; Δp – перепад давлений на концах капилляра, определяется

$$\Delta p = \rho_{\text{ж}} gh, \quad (12)$$

где $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости в манометре; h – разность уровней жидкости в манометре M ; $g=9.81$ м/с² – ускорение свободного падения.

Из (10) – (12) массовый расход воздуха равен

$$m_t = \rho \frac{\pi r_0^4 \rho_{\text{ж}} gh}{8L\eta}. \quad (13)$$

Удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, с учетом (2), (8) и (10), определяется формулой

$$c_p = \frac{I_n U_n}{m_t \theta}. \quad (14)$$

Порядок выполнения работы

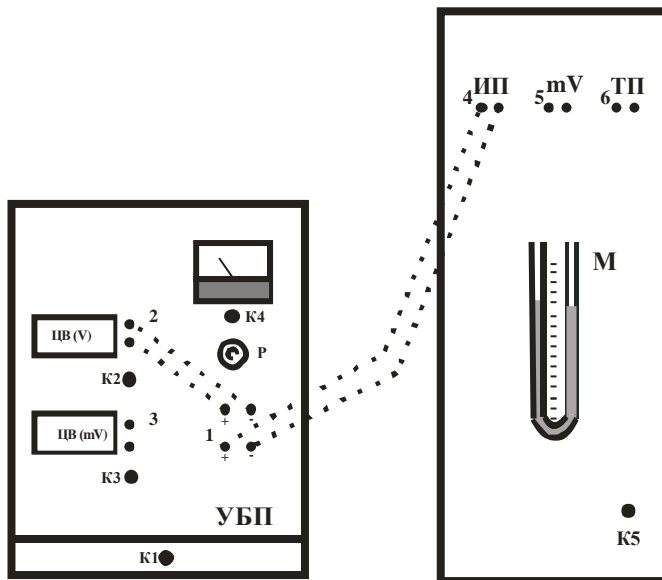


Рис. 1.2. Схема соединений. Внешний вид

1. Выписать данные со стенда установки и измерительных приборов.
2. Убедиться в том, что все приборы выключены. Повернуть регулятор напряжения P на универсальном блоке питания против часовой стрелки.
3. Соединить проводами разъемы 1 с разъемами цифрового вольтметра 2, разъемы 4 с разъемами 1 УБП, разъемы 6 с разъемами цифрового милливольтметра 3.

4. Согласовать с преподавателем, при каких значениях напряжения на источнике питания следует проводить эксперименты (например, $U_n = 1 \text{ В}; 3 \text{ В}; 5 \text{ В}; 7 \text{ В}; 9 \text{ В}$).

5. Включить стенд тумблером К1 и тумблером К5 насос. Включить измерительные приборы: цифровой вольтметр тумблером К2, а цифровой милливольтметр тумблером К3. Включить УБП, нажав кнопку К4.

6. Плавным поворотом регулятора напряжения P УБП по часовой стрелке по показанию цифрового вольтметра установить значение напряжения на нити U_n .

7. Наблюдать за показаниями цифрового милливольтметра, измеряющего термоЭДС термопары, до тех пор, пока прибор не будет регистрировать постоянное значение E (установилось постоянное значение температуры).

8. Произвести отсчет напряжения на нагревателе U_n по цифровому вольтметру и термоЭДС E по цифровому милливольтметру.

9. Переключить цифровой милливольтметр с разъемов 6 на разъемы 5 и измерить напряжение на образцовом сопротивлении U_R .

10. Полученные результаты записать в таблицу измерений.

11. Произвести отсчет разности уровней жидкостей h в манометре M .

12. Пункты 6-10 повторить для остальных заданных преподавателем значений напряжений нити U_n .

13. Снять напряжение на УБП поворотом регулятора напряжения P против часовой стрелки. Выключить измерительные приборы и стенд в порядке, обратным заданному в пункте 5.

Данные установки и таблица результатов измерений

Образцовое сопротивление $R_{\text{обр.}} = 0,010 \text{ Ом}$;
радиус капилляра $r_0 =$; длина капилляра $L =$;
коэффициент внутреннего трения воздуха $\eta = 18,1 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$;
плотность жидкости в манометре $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг/м}^3$;
температуру воздуха в лаборатории $t =$, °C;

давление воздуха в лаборатории $p =$
 разности уровней жидкостей в манометре M : $h =$

Номер опыта	U_n , В	U_R , мВ	E , мВ	I_n , А	$I_n \cdot U_n$, Вт	θ , К
1						
2						
3						
4						
5						

Обработка результатов измерений

1. По прил. 8 «Градуировочная характеристика хромель-алюмелевой термопары» определить значения разности температур θ , соответствующих измеренным значениям термоЭДС.

2. По формуле (9) рассчитать для каждого опыта значение I_n и значение $I_n U_n$.

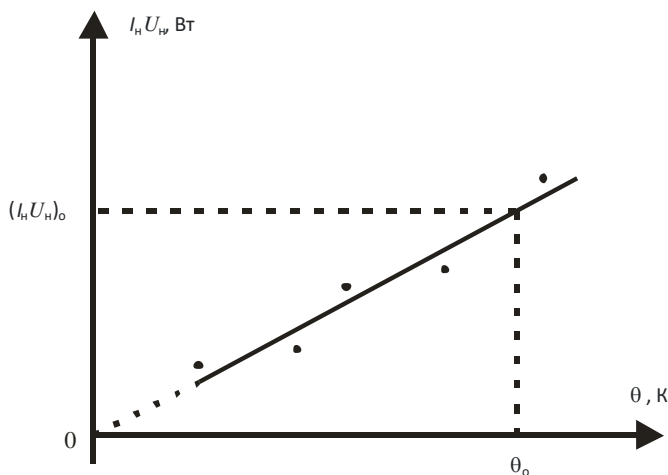


Рис. 1.3. График зависимости $I_n U_n = f(\theta)$

3. По полученным данным построить график зависимости $I_n U_n = f(\theta)$, аппроксимировать полученную зависимость прямой линией и определить тангенс угла наклона прямой по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = c_p m_t = \frac{(I_n U_n)_0}{\theta_0},$$

где θ_0 и $(I_n U_n)_0$ - выбранные на графике значения соответствующей точки.

График должен иметь вид, изображенный на рис. 1.3.

4. Определить плотность воздуха по прил. 7.

5. По формуле (13) рассчитать m_t массовый расход воздуха. Рассчитать удельную теплоемкость воздуха при постоянном давлении

$$c_p = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{m_t} = \frac{(I_n U_n)_0}{m_t \theta_0}.$$

7. Сравнить экспериментальное значение удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении с теоретическим значением, рассчитанным по формуле (7).

Контрольные вопросы и задания

1. Объясните, почему удельная (молярная) теплоемкость идеального газа зависят от протекающего в газе процесса.

2. Докажите соотношение $C_p - C_v = R$.

3. При высоких температурах наблюдается расхождение между экспериментальными данными и теоретическим значением удельной (молярной) теплоемкости. Объяснить этот факт.

4. Почему в данной работе давление воздуха можно считать постоянным?

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

6. Объяснить вывод расчетной формулы удельной теплоемкости воздуха при постоянном давлении (14).

Список рекомендуемой литературы

1. § 9.1÷9.6. 2. § 50÷55. 3. § 2.6÷2.13, 2.46÷2.60. 4. § 65÷72.

Лабораторная работа 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ C_p/C_v ДЛЯ ВОЗДУХА

Цель работы: экспериментальное определение показателя адиабаты $\gamma = C_p/C_v$ для воздуха.

Теоретические основы работы

Адиабатным (адиабатическим) называют термодинамический процесс, происходящий в термодинамической системе без теплообмена. Первый закон термодинамики имеет вид

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (1)$$

где δQ – элементарное количество теплоты, подводимое к термодинамической системе; dU – элементарное изменение внутренней энергии системы; δA – элементарная работа, совершаемая термодинамической системой в результате данного процесса. Для адиабатного процесса ($\delta Q = 0$) соотношение (1) принимает вид

$$0 = dU + \delta A, \quad (2)$$

для одного моля идеального газа имеем

$$dU = C_v dT; \quad (3)$$

$$\delta A = p dV. \quad (4)$$

где C_v – молярная теплоемкость при постоянном объеме газа; p – давление; dT и dV – элементарные изменения температуры и объема соответственно. Подставляя (3) и (4) в (2), получим

$$C_v dT + p dV = 0. \quad (5)$$

Для одного моля идеального газа уравнение Клапейрона – Менделеева имеет вид

$$pV = RT.$$

Дифференцируя его, найдем связь между параметрами dp , dV и dT :

$$pdV + Vdp = R dT. \quad (6)$$

Из (6) получим

$$dT = \frac{1}{R} (pdV + Vdp). \quad (7)$$

Подставляя (7) в (5), получим дифференциальное уравнение, связывающее объем и давление идеального газа в адиабатном процессе

$$(C_v + R)p dV + C_v V dp = 0. \quad (8)$$

Из уравнения Майера $C_v + R = C_p$ – молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении, и вводя обозначение показатель адиабаты γ :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}, \quad (9)$$

из (8) и (9) получим дифференциальное уравнение адиабатного процесса:

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dp}{p} = 0. \quad (10)$$

Для идеального газа молярные теплоемкости C_p и C_v не зависят от температуры:

$$C_p = \frac{i+2}{2} R;$$

$$C_v = \frac{i}{2} R,$$

где i – число степеней свободы молекулы идеального газа. Считая воздух двухатомным идеальным газом, получаем, что показатель адиабаты γ – постоянная для данного газа величина. В этом случае решение дифференциального уравнения (10) дает уравнение Пуассона

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (11)$$

Описание установки. Вывод расчетных формул

Экспериментальная установка (рис. 2.1) состоит из стеклянного баллона А, наполненного воздухом. Баллон соединен с манометром М и насосом Н. На рис. 2.1 обозначены также краны К1 и К2, с помощью которых баллон может быть соединен с насосом и атмосферой. Поперечное сечение трубки с краном К2 достаточно велико, следовательно, процесс установления атмосферного давления в сосуде происходит достаточно быстро. Быстрое изменение давления в сосуде происходит практически без теплообмена с окружающей средой, поэтому

процесс, происходящий при открывании крана К2, с достаточной точностью можно считать адиабатным.

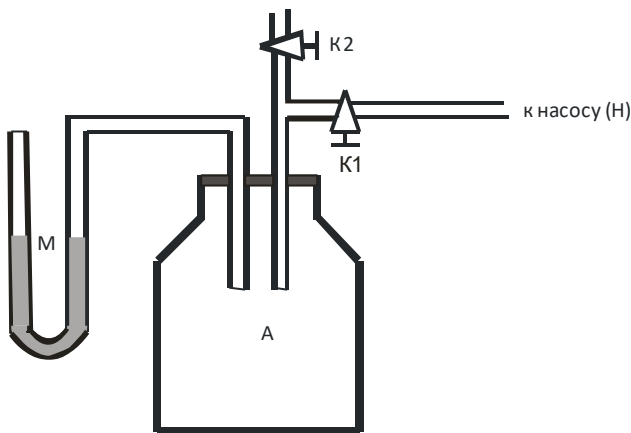


Рис. 2.1. Схема экспериментальной установки

Рассмотрим процессы, происходящие при проведении опыта (рис. 2.2), и учтем, что объем баллона А не изменяется, но закачку воздуха в баллон А и его выход при открывании крана К2 (изменение количества вещества ν при неизменном объеме) на pV – диаграмме можно представить соответственно как сжатие и расширение газа: $O \rightarrow B$ – закачивание насосом воздуха в баллон; $B \rightarrow I$ – изохорный процесс охлаждения воздуха вследствие теплообмена с окружающей средой; $I \rightarrow II$ – адиабатное расширение; $II \rightarrow III$ – изохорный процесс нагревания воздуха вследствие теплообмена с окружающей средой.

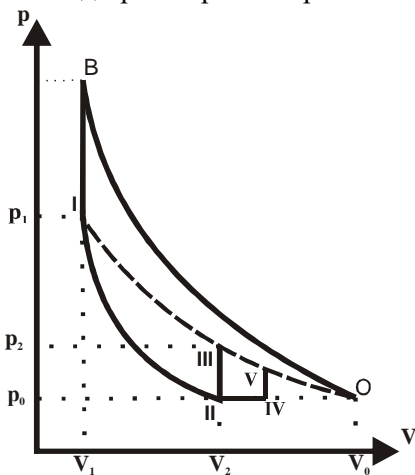


Рис. 2.2. Процессы, происходящие в опыте

Если кран К2 не закрыть точно в момент окончания адиабатного расширения, то после адиабатного расширения начнется изобарный процесс II→IV, затем изохорный процесс нагревания воздуха IV→V. Точки I, III, V лежат на изотерме, соответствующей температуре воздуха в лаборатории T_1 . Таким образом, воздух в баллоне характеризуется тремя параметрами (T, p, V).

Пусть с помощью насоса Н в баллон А накачали воздух, затем закрыли кран К1 (см. рис. 2.1). Через несколько минут температура воздуха в баллоне сравняется с температурой окружающей среды T_1 (см. рис. 2.2). Давление воздуха, установившееся в баллоне А:

$$p_1 = p_0 + p' = p_0 + \rho g H,$$

где p_0 – атмосферное давление; $p' = \rho g H = 10^3 \cdot 9,81 \cdot H = 9810 \cdot H$ [Па] – добавочное давление, измеряемое манометром; H – разность уровней манометра М. Состояние I – p_1, V_1, T_1 .

Если на короткое время открыть кран К2, то воздух в баллоне будет расширяться адиабатически, пока его давление не станет равным атмосферному p_0 , температура газа не понизится до T_2 , а объем не будет равен V_2 (состояние II – p_0, V_2, T_2). После закрытия крана К2 охладившийся при расширении воздух в баллоне через некоторое время вследствие теплообмена нагреется до температуры окружающей среды T_1 , а давление в баллоне А возрастет до p_2 :

$$p_2 = p_0 + p'' = p_0 + \rho g h = p_0 + 10^3 \cdot 9,81 h,$$

где h – новая разность уровней манометра.

Объем воздуха не изменится и будет равным V_2 (состояние III – p_2, V_2, T_1).

Применяя к состояниям I и II уравнение Пуассона (11), получим

$$(p_0 + \rho g H) V_1^\gamma = p_0 V_2^\gamma. \quad (12)$$

Перепишем уравнение (12) в виде

$$\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma = \frac{p_0 + \rho g H}{p_0}. \quad (13)$$

Воздух в баллоне в состояниях I и III имеет постоянную температуру T_1 , т.е. точки состояний I и III лежат на изотерме

($T_1 = \text{const}$ – изотермический процесс), следовательно, по закону Бойля - Мариотта, имеем

$$(p_0 + \rho g H) V_1 = (p_0 + \rho g h) V_2$$

или

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_0 + \rho g H}{p_0 + \rho g h}. \quad (14)$$

Возведем обе части выражения (14) в степень γ :

$$\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma = \left(\frac{p_0 + \rho g H}{p_0 + \rho g h} \right)^\gamma. \quad (15)$$

Из уравнений (13) и (15) получим

$$\left(\frac{p_0 + \rho g H}{p_0 + \rho g h} \right)^\gamma = \frac{p_0 + \rho g H}{p_0}.$$

Логарифмируя последнее выражение и решая его относительно показателя адиабаты γ , находим

$$\gamma = \frac{\ln(p_0 + \rho g H) - \ln p_0}{\ln(p_0 + \rho g H) - \ln(p_0 + \rho g h)}.$$

Вследствие того, что давления p_0 , $(p_0 + \rho g h)$ и $(p_0 + \rho g H)$ мало отличаются друг от друга ($p_0 \gg \rho g h$ и $p_0 \gg \rho g H$), разности логарифмов можно принять равными самим давлениям и приближенно считать, что

$$\gamma = \frac{(p_0 + \rho g H) - p_0}{(p_0 + \rho g H) - (p_0 + \rho g h)} = \frac{\rho g H}{\rho g H - \rho g h}.$$

Сокращая на величину ρg , окончательно получим

$$\gamma = \frac{H}{H - h}.$$

Показатель адиабаты γ можно записать в виде

$$\gamma = \frac{1}{1 - \frac{h}{H}}. \quad (16)$$

где H и h – разность уровней жидкости в манометре в I и III состояниях.

Известно, что отношение теплоемкостей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ зависит от числа степеней свободы молекул (i),

$$\frac{C_p}{C_v} = \gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (17)$$

Следует отметить, что значение h соответствует условию, что кран К2 закрыли точно в момент окончания адиабатного процесса. Если закрыть кран К2 раньше (до выравнивания давлений) или спустя некоторое время после адиабатного процесса, то результат вычислений по формуле (16) даст в первом случае завышенное значение, во втором случае – заниженное значение γ . Для получения наиболее точного экспериментального значения γ необходимо закрыть кран К2 точно в момент окончания адиабатного процесса. Так как мы не знаем времени протекания адиабатного процесса, значение разности уровней определяют косвенным графическим методом.

Порядок выполнения работы

1. Убедиться, что кран К1 открыт, а кран К2 закрыт.
2. Насосом Н (см. рис.2.1) накачать в баллон А воздух так, чтобы разность уровней жидкости в манометре стала равной 250-300 мм. Закрыть кран К1, выждать до тех пор, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающей среды. При этом в баллоне А давление установится и разность уровней жидкости в манометре перестанет меняться. По верхнему или нижнему уровням мениска необходимо определить уровни жидкости L_1 и L_2 в коленах манометра, производят первый отсчет разности уровней жидкости в манометре $H = L_2 - L_1$.
3. Открывают кран К2, соединяя баллон с атмосферой, и одновременно включают секундомер. Выдерживают кран открытым в течение заданного времени t и быстро закрывают. Подождав, пока температура воздуха в баллоне не станет равной температуре окружающей среды (в баллоне А установится давление и разность уровней жидкости в манометре перестанет меняться), по верхнему или нижнему уровням мениска определить уровни жидкости l_1 и l_2 в коленах манометра, производят второй отсчет разности уровней жидкости в манометре $h = l_2 - l_1$.
4. Полученные результаты заносят в таблицу.

5. Повторить опыты (пункты 1-4) не менее пяти раз, выдерживая кран К2 открытым в течение времени, заданными преподавателем (например, 3, 6, 9, 12, 15 с). Необходимо следить, чтобы разность уровней в манометре Н в опытах была приблизительно одинаковой.

Таблица результатов измерений

Температура окружающей среды (воздуха в лаборатории) $T_1 =$
атмосферное давление $p_0 =$

Погрешности измерения разностей уровней принять равными
 $\Delta H = \Delta h = 2$ мм.

Номер опыта	L_1 , мм	L_2 , мм	$H=L_2-L_1$, мм	t , с	l_1 , мм	l_2 , мм	$h=l_2-l_1$, мм	$\ln\left(\frac{h}{H}\right)_t$
1								
2								
3								
4								
5								

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать значения $\ln\left(\frac{h}{H}\right)_t$ для всех значений t .

2. Нанести полученные экспериментальные точки на график (рис. 2.3), где по оси абсцисс отложено время t , по оси ординат – значения $\ln\left(\frac{h}{H}\right)_t$.

3. По этим данным построить график зависимости $\ln\left(\frac{h}{H}\right)_t = f(t)$, аппроксимировать полученную зависимость прямой линией и экстраполировать ее до пересечения с осью ординат. Точка пересечения имеет координату $\ln\left(\frac{h}{H}\right)_0$, соответствующую $t = 0$ с.

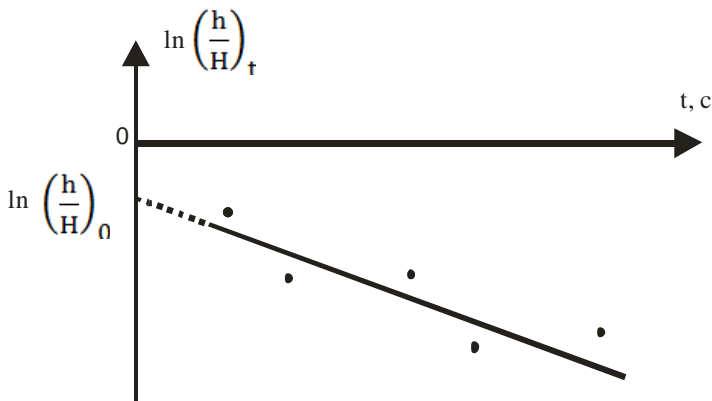


Рис. 2.3. Графическая обработка экспериментальных данных

4. Потенцируя $\ln \left(\frac{h}{H} \right)_0$, определить значение $\left(\frac{h}{H} \right)_0$,

характеризующее идеализированное адиабатическое расширение газа при переходе из состояния I в состояние II ($t = 0$ с, следовательно, теплообмен с окружающей средой полностью отсутствует).

5. По формуле (16) рассчитать экспериментальное значение показателя адиабаты $\gamma_{\text{эксп}}$.

6. Сравнить экспериментальное значение $\gamma_{\text{эксп}}$ с рассчитанным по формуле (17) теоретическим значением $\gamma_{\text{теор}}$ (воздух считать двухатомным идеальным газом: $i = 5$).

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определения изохорного, изобарного, изотермического, адиабатного и политропного термодинамических процессов.

2. Изобразите на графиках адиабатный, изохорный, изобарный и изотермический процессы.

3. Рассчитать теоретическое значение показателя адиабаты для одноатомного и трехатомного идеальных газов.

4. Какую величину называют показателем адиабаты (показателем Пуассона)? От каких факторов зависит значение показателя адиабаты для идеального газа?

5. Какие процессы осуществляются в данной лабораторной работе? Расскажите о них.

Список рекомендуемой литературы

1. § 9.1÷9.6. 2. § 50÷55. 3. § 2.6÷2.13, 2.46÷2.60. 4. § 65÷72.

Лабораторная работа 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА

Цель работы: 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 двумя параллельными пластинами (рис. 3.1). Пусть нижняя пластина неподвижна, верхняя движется горизонтально вправо со скоростью \vec{v}_0 . Тогда в жидкости возникнет течение со скоростью $v = v(z)$.

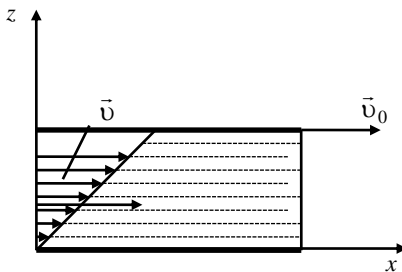


Рис. 3.1. Профиль скорости движения жидкости между двумя параллельными пластинами

Закон вязкого (внутреннего) трения был установлен Ньютоном. Он задает перенос импульса в слоях жидкости и имеет вид

$$F = \eta \frac{dv}{dz} S,$$

где F – касательная сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости друг относительно друга; S – площадь слоя, по которому происходит сдвиг; $\frac{dv}{dz}$ – градиент скорости течения жидкости (быстрота изменения скорости от слоя к слою).

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

Коэффициент пропорциональности η – коэффициент внутреннего трения жидкости (коэффициент вязкости жидкости). В СИ размерность $[\eta] = [\text{Па} \cdot \text{с}]$.

В условиях установившегося ламинарного течения при постоянной температуре T коэффициент внутреннего трения жидкости η 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 вязких жидкостей является метод Стокса. При движении тела в жидкости на тело действует сила сопротивления. Стокс вывел формулу для силы сопротивления, действующей на шар, движущийся в жидкости поступательно и с постоянной скоростью (вывод этой формулы требует знания специальных функций, поэтому мы его здесь не приводим). Формула Стокса имеет вид

$$F_C = 6\pi\eta r v, \quad (1)$$

где F – сила сопротивления жидкости при движении шара; η – коэффициент внутреннего трения; r – радиус шара; v – скорость поступательного движения шара. Следует отметить, что формула Стокса справедлива лишь при условии, что при

движении шара не возникает турбулентность (завихрение) жидкости. Движение прилегающих к шару слоев жидкости должно быть ламинарным. Это условие выполняется при

$$Re = \frac{\rho v r}{\eta} \ll 1, \quad (2)$$

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 натуральную конструкцию для явлений, в которых необходимо учитывать большое число факторов.

Описание установки. Вывод расчетных формул

Экспериментальная установка, используемая для определения коэффициента внутреннего трения жидкости по методу Стокса, показана на рис. 3.2. Это стеклянный цилиндрический сосуд 1, наполненный вязкой жидкостью; уровень поверхности жидкости обозначен цифрой 2. На боковую поверхность сосуда надеты два тонких проволочных кольца 3 и 4. Расстояние между кольцами равно L .

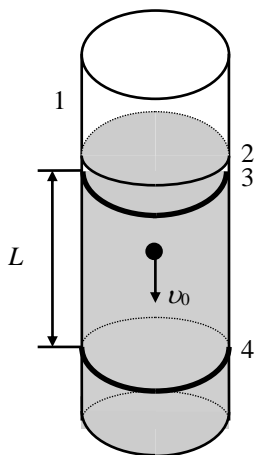


Рис.3.2. Схема экспериментальной установки

В сосуд опускают небольшой шарик (по возможности ближе к оси симметрии), плотность которого ρ_1 , больше плотности жидкости ρ_2 . Диаметр шарика предварительно измеряют с помощью микрометра. Расстояние между поверхностью жидкости 2 и верхним кольцом

3 подбирают так, чтобы на этом участке скорость шарика стабилизировалась (примерно 7-10 см); при этом на участке 3-4 движение шарика будет происходить с постоянной скоростью u_0 .

Рассмотрим силы, действующие на шарик, движущийся с постоянной скоростью u_0 в вязкой жидкости: сила тяжести $F_1 = \rho_1 g V$ (V – объем шарика) направлена вниз, сила Архимеда $F_2 = \rho_2 g V$ и сила Стокса F_C (1) направлены вверх. Условие постоянства скорости шарика u_0 дает (в проекции на вертикальную ось, направленную вниз)

$$F_1 - F_2 - F_C = 0. \quad (3)$$

Подставляя в (3) выражения F_1 , F_2 , F_C , а также учитывая, что объем шарика

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{1}{6} \pi d^3,$$

где d – диаметр шарика, получим выражение для коэффициента внутреннего трения жидкости η :

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho_1 - \rho_2) g d^2}{v_0}. \quad (4)$$

Установившуюся скорость движения шарика u_0 на участке 3-4 (см. рис. 3.2) найдем по формуле

$$v_0 = \frac{L}{\tau}, \quad (5)$$

где τ – время движения шарика между кольцами 3 и 4. Из (4) и (5) получим формулу для определения коэффициента внутреннего трения жидкости

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{(\rho_1 - \rho_2) g \tau d^2}{L}. \quad (6)$$

Порядок выполнения работы

1. Выписать данные со стенда установки и измерительных приборов.
2. Определить температуру T воздуха в лаборатории (жидкость имеет температуру, равную температуре T).

3. Измерить диаметр шарика d с помощью микрометра. Измерения проводить не менее трех раз; шарик при этом надо поворачивать (его форма может отличаться от сферической). Если отличия значительны, такой шарик следует забраковать. Результаты измерений внести в таблицу. Рассчитать среднее значение диаметра данного шарика $d_{\text{ср}}$. Результат внести в таблицу.

Примечание. При получении шариков у лаборанта следует подобрать шарики одинаковых размеров.

4. Аккуратно опустить шарик в сосуд (как можно ближе к оси симметрии).

5. Секундомером измерить время τ прохождения шариком расстояния L между кольцами 3 и 4. Необходимо следить, чтобы в моменты включения и выключения секундомера (в моменты прохождения шариком колец 3 и 4 соответственно) глаз наблюдателя располагался на уровне соответствующего кольца. Результат измерения времени τ внести в таблицу.

5. Пункты 3-5 повторить для остальных шариков.

Данные установки и таблица результатов измерений

Плотность материала шариков:

$\rho_1 =$; $\Delta\rho_1 =$;

плотность жидкости:

$\rho_2 =$; $\Delta\rho_2 =$;

расстояние между кольцами 3 и 4 $L =$; $\Delta L =$.

Температура жидкости $T =$; $\Delta T =$.

Жидкость:

Номер шарика	d_1 , мм	d_2 , мм	d_3 , мм	$d_{\text{ср}}$, мм	τ , с	η , Па·с
1						
2						
3						
4						

Обработка результатов измерений

1. Для каждого опыта рассчитать средний диаметр шарика по формуле

$$d_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^3 d_i}{3}.$$

2. По формуле (6) рассчитать коэффициент внутреннего трения жидкости η для каждого опыта.

3. Определить среднее (из пяти опытов) значение коэффициента внутреннего трения ($\eta_{\text{ср}}$).

4. Провести статистическую обработку результатов измерений для одного из шариков (выбрать шарик, для которого значения d_1, d_2, d_3 отличаются наиболее сильно). Рассчитать Δd .

Примечание. Следует отметить, что для времени τ статистическую обработку проводить нельзя, это было бы возможно, если бы мы каждый раз вынимали шарик из сосуда и проводили бы эксперимент с одним и тем же шариком.

5. Относительную погрешность косвенного измерения η рассчитать по формуле

$$\varepsilon = \frac{\Delta \eta}{\eta} = \frac{\Delta \rho_1 + \Delta \rho_2}{\rho_1 - \rho_2} + \frac{\Delta \tau}{\tau} + \frac{2\Delta d}{d} + \frac{\Delta L}{L}.$$

6. Рассчитать абсолютную погрешность $\Delta \eta = \varepsilon \eta$.

7. Записать результат с учетом погрешности измерений и сравнить с табличным значением (прил. 5).

Контрольные вопросы

1. Дайте определение явлению внутреннего трения (вязкости).

2. Запишите закон Ньютона для внутреннего трения.

3. Объясните понятие градиента упорядоченной скорости жидкости.

4. Какие силы действуют на шарик при его движении в жидкости?

5. Почему метод Стокса не применяют для определения коэффициента внутреннего трения воздуха?

6. Зависит ли коэффициент внутреннего трения жидкости от температуры? Проанализируйте данные Вашего повседневного опыта. Можете ли Вы объяснить эту зависимость с молекулярно-кинетической точки зрения?

7. Поясните, какое движение называют ламинарным, турбулентным?

8. Используя результаты, полученные в лабораторной работе, по формуле (2) определить число Рейнольдса.

9. Объяснить вывод расчетной формулы коэффициента внутреннего трения (вязкости) жидкости (6).

Список рекомендуемой литературы

1. § 10.7÷10.9. 2. § 48. 3. § 2.34÷2.38. 4. § 79, 80.

Лабораторная работа 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента внутреннего трения воздуха; определение средней длины свободного пробега молекул воздуха. Для определения коэффициента внутреннего трения воздуха в лабораторной работе используется метод, основанный на истечении воздуха через капилляр. Этот метод носит название метода Пуазейля.

Теоретические основы работы

Введем понятие внутреннего трения (вязкости) газа на простейшем примере. Пусть между двумя параллельными плоскостями находится воздух (рис. 4.1). Левая пластина неподвижна, правая пластина движется с постоянной скоростью u_0 , увлекая за собой прилегающие к ней слои воздуха. Если движение воздуха - ламинарное (слоистое), т.е. отсутствуют завихрения, то зависимость упорядоченной скорости от координаты x имеет вид, изображенный на рис. 4.1.

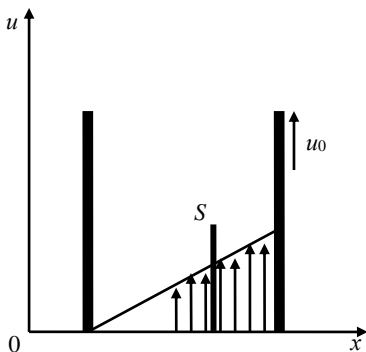


Рис. 4.1. Профиль скорости движения воздуха между двумя параллельными пластинами

Величина du/dx называется градиентом скорости упорядоченного движения.

Между слоями воздуха, движущимися с различными скоростями, происходит обмен молекулами, обусловленный беспорядочным тепловым движением молекул. В результате слой газа справа от мысленно выбранной плоскости S испытывает тормозящую силу, направленную против скорости упорядоченного движения. Этот процесс

описывают, используя термин силы трения, возникающей между слоями воздуха, движущимися с разными скоростями. Сила внутреннего трения F , действующая на участок поверхности плоского слоя площадью S , выражается феноменологическим (полученным путем обобщения опытных данных) соотношением

$$F = \eta \left| \frac{du}{dx} \right| S. \quad (1)$$

Соотношение (1) называют законом Ньютона для внутреннего трения. Здесь η – коэффициент внутреннего трения (вязкости), du/dx – градиент скорости упорядоченного движения. В СИ размерность $[\eta] = [\text{Па} \cdot \text{с}]$.

Методами молекулярно-кинетической теории идеального газа получено следующее выражение для коэффициента внутреннего трения

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \cdot \langle v \rangle \cdot \langle l \rangle, \quad (2)$$

где

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

$\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул идеального газа; M – молярная масса; T – температура; R – универсальная газовая постоянная; $\langle l \rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул, вычисляемая по формуле

$$\langle l \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \sigma_{\text{эфф.}} n}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{эфф.}}$ – эффективное сечение соударения молекул; n – число молекул газа в единице объема (концентрация) $n = \frac{p}{kT}$; p – давление газа, k – постоянная Больцмана.

Описание установки. Вывод расчетных формул

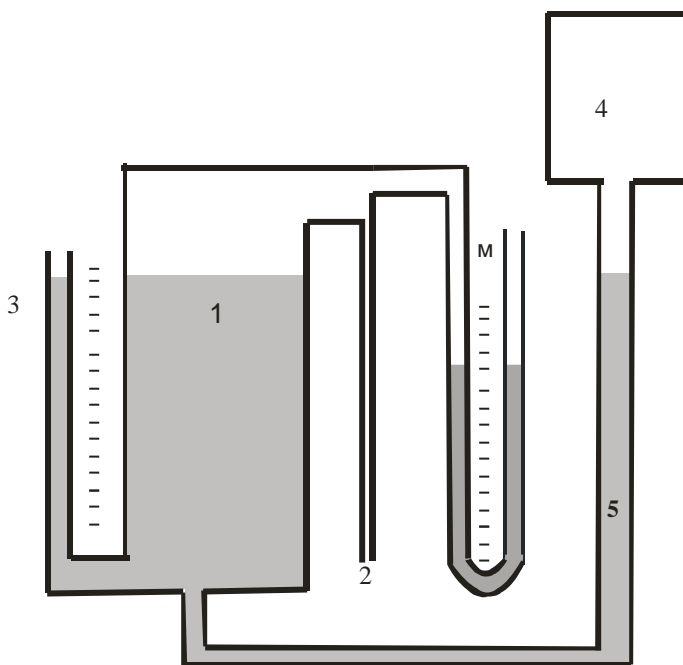


Рис. 4.2. Схема экспериментальной установки

Пусть в сосуд 1 налита вода (рис. 4.2). Если опустить сосуд 4 на стол, вода начнет перетекать в него из сосуда 1 по соединяющей их резиновой трубке 5. При этом в сосуде 1 объем воздушного пространства увеличивается, а давление воздуха уменьшается (воздух в сосуд 1 засасывается через капиллярную трубку 2, диаметр сечения которой много меньше диаметра сечения трубки 5). Разность давлений между давлением в сосуде 1 и атмосферным определяется с помощью манометра М, а объем воздуха, поступающего в сосуд 1, определяют по изменению уровня воды в сосуде, которое можно измерить с помощью трубки уровня воды 3.

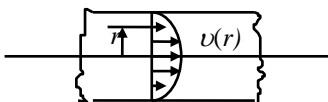


Рис. 4.3. Профиль скорости воздуха, протекающего в круговой цилиндрической трубе

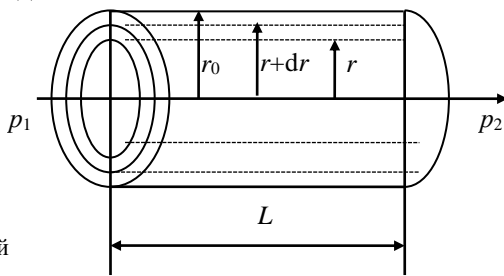


Рис. 4.4. К расчету коэффициента внутреннего трения

Рассмотрим ламинарное течение воздуха в капилляре (рис.4.3); наличие сил внутреннего трения приводит к возникновению градиента скорости упорядоченного движения $\frac{du}{dr}$. Очевидно, что наибольшая скорость на оси симметрии капилляра. Пусть радиус капилляра r_0 , длина L (рис. 4.4). Воздух протекает слева направо вследствие разности давлений на концах капилляра $p_1 - p_2$. Вырежем мысленно в газе цилиндрический слой с внутренним радиусом r и внешним радиусом $r+dr$. На этот слой со стороны более быстрых слоев действует «ускоряющая» сила внутреннего трения

$$F(r) = \eta \left| \frac{du}{dr} \right| S,$$

где S – площадь боковой поверхности цилиндра $S = 2\pi rL$. Таким образом,

$$F(r) = \eta \left| \frac{du}{dr} \right| 2\pi rL. \quad (4)$$

Со стороны более медленных слоев, прилегающих к выбранному, действует «замедляющая» сила $F(r+dr)$, причем силы $F(r)$ и $F(r+dr)$ направлены в противоположные стороны. Результирующая сила, действующая на выбранный слой, может быть найдена с использованием соотношения $F(r+dr) \approx F(r) + dF$. Тогда $F(r) - F(r+dr) = -dF$.

Опуская знака модуля, из (4) получим (коэффициент внутреннего трения η можно считать не зависящим от r)

$$dF = -2\pi\eta Ld\left(r \frac{du}{dr}\right). \quad (5)$$

Градиент упорядоченной скорости $\frac{du}{dr} < 0$ (самая большая скорость на оси симметрии), поэтому сила dF – положительная. Эта сила при стационарном течении воздуха равна силе dF' , действующей на слой из-за разности давлений $p_1 - p_2$:

$$dF' = (p_1 - p_2)dS = (p_1 - p_2)2\pi r dr. \quad (6)$$

Из (5) и (6) получим

$$-2\pi\eta Ld\left(r \frac{du}{dr}\right) = (p_1 - p_2)2\pi r dr. \quad (7)$$

Из соотношения (7) следует дифференциальное уравнение

$$d\left(r \frac{du}{dr}\right) = -\frac{p_1 - p_2}{\eta L} r dr. \quad (8)$$

Проинтегрируем (8)

$$r \frac{du}{dr} = -\frac{p_1 - p_2}{2\eta L} r^2 + C. \quad (9)$$

Постоянную интегрирования C найдем из следующих соображений: при $r = 0$ скорость упорядоченного движения достигает максимума, следовательно,

$$\left. \frac{du}{dr} \right|_{r=0} = 0.$$

Отсюда $C = 0$. Тогда из (9) получим

$$du = -\frac{p_1 - p_2}{2\eta L} r dr. \quad (10)$$

Проинтегрируем (10)

$$u = -\frac{p_1 - p_2}{4\eta L} r^2 + C'. \quad (11)$$

Из условия $u = 0$ при $r = r_0$ (на стенде капилляра) получим

$$C' = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} r_0^2. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (11), получим зависимость упорядоченной скорости $u(r)$

$$u = \frac{p_1 - p_2}{4\eta L} (r_0^2 - r^2). \quad (13)$$

Найдем теперь объем воздуха, протекающего через капилляр за время τ . Из выбранного нами слоя за время τ вытечет объем газа $dV = u\tau 2\pi r dr$. Используя соотношение (13), получим

$$dV = \frac{\pi(p_1 - p_2)\tau}{2\eta L} (r_0^2 r - r^3) dr. \quad (14)$$

Проинтегрируем (14) по всей площади поперечного сечения капилляра (от $r = 0$ до $r = r_0$)

$$V = \frac{\pi(p_1 - p_2)\tau}{2\eta L} \int_0^{r_0} (r_0^2 r - r^3) dr = \frac{\pi(p_1 - p_2)\tau r_0^4}{8\eta L}.$$

Из последнего соотношения получим формулу Пуазейля

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi r_0^4}{8L} (p_1 - p_2) \tau. \quad (15)$$

Следует отметить, что объем протекающего за время τ газа очень сильно зависит от радиуса капилляра ($V \sim r_0^4$). Отметим также, что для газов ламинарное (слоистое) течение возможно лишь при малых скоростях и в весьма тонких капиллярах.

Из формулы Пуазейля (15) выразим коэффициент внутреннего трения (вязкости) воздуха η . Для η получим

$$\eta = \frac{\pi r_0^4 (p_1 - p_2) \tau}{8LV}. \quad (16)$$

Разность давлений

$$p_1 - p_2 = \rho_{\text{ж}} g(h_1 - h_2), \quad (17)$$

где $h_1 - h_2$ – разность уровней воды в манометре; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести. Объем воздуха, протекающего через капилляр за время τ , равен объему вытекающей из сосуда 1 воды (см. рис. 4.2), рассчитываемого по формуле

$$V = S(L_1 - L_2) = \frac{\pi D^2}{4} (L_1 - L_2), \quad (18)$$

где D – диаметр основания сосуда 1 (цилиндра); L_1 и L_2 – метки уровня воды в сосуде 1 в начальный и конечный момент времени τ , задаваемые по миллиметровой линейке трубки уровня воды 3.

Из (2) получаем выражение для средней длины свободного пробега молекул

$$\langle l \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle}.$$

Здесь, как и ранее

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}.$$

$\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость теплового движения молекул; плотность газа определяем, используя уравнение Клапейрона - Менделеева:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}.$$

Давление воздуха в сосуде 1 практически равно атмосферному давлению. Отсюда для $\langle l \rangle$ получим соотношение

$$\langle l \rangle = 1,88 \frac{\eta}{p_{\text{атм.}}} \sqrt{\frac{RT}{M}}. \quad (19)$$

Порядок выполнения работы

1. Выписать данные установки и измерительных приборов.
2. По барометру определить давление воздуха в лаборатории $p_{\text{атм.}}$, по термометру определить температуру воздуха T , К.

3. Задать метки уровня воды в сосуде 1 на линейке трубки уровня воды 3, тем самым задав объем вытекающей воды (объем втекающего воздуха).

4. Снять сосуд 4 с подставки и поставить на стол.

5. В тот момент, когда уровень воды в сосуде 1 достигнет верхней метки L_1 , включить секундомер и измерить разность уровней воды в манометре М.

6. Зафиксировать момент времени τ , когда уровень воды в сосуде 1 достиг нижней метки L_2 , и снова измерить разность уровней воды в манометре М.

7. Пункты 4-6 повторить 5 раз.

Данные установки и таблица результатов измерений

Длина капилляра $L =$; диаметр капилляра $d = 1,50$ мм, $\Delta d = 0,05$ мм, Диаметр основания цилиндра $D = 77,6$ мм; $\Delta D = 0,1$ мм; молярная масса воздуха $M_{\text{возд.}} = 0,029$ кг/моль.

Условия опыта: атмосферное давление $p_{\text{атм.}} =$; температура $T =$; метка в начальный момент времени $L_1 =$; метка в конечный момент времени $L_2 =$.

Номер опыта	τ , с	$(h_1 - h_2)_{L_1}$, мм	$(h_1 - h_2)_{L_2}$, мм	$(p_1 - p_2)$, Па
1				
2				
3				
4				
5				
Среднее		Не заполнять		

Обработка результатов измерений

1. Для каждого опыта по формуле (17) рассчитать разность давлений на концах капилляра в начальный и конечный момент времени $((p_1 - p_2)_{L_1}$ и $(p_1 - p_2)_{L_2}$), усредненное значение записать в таблицу.

2. Определить среднее значение времени $\tau_{\text{ср}}$ и разности давлений $(p_1 - p_2)_{\text{ср}}$.

3. По формуле (18) рассчитать объем воздуха, протекающего через капилляр, по формуле (16) рассчитать коэффициент внутреннего трения η , по формуле (19) рассчитать среднюю длину свободного пробега молекул воздуха $\langle l \rangle$.

4. Рассчитать значение длины свободного пробега молекул воздуха при условиях эксперимента по формуле (3). При расчете принять, что эффективное сечение соударения для воздуха $\sigma_{\text{эф.}} = 7 \cdot 10^{-20} \text{ м}^2$.

5. Рассчитать значение коэффициента внутреннего трения η по формуле (2).

6. Полученные результаты сравнить с теоретическими значениями (прил. 2).

Контрольные вопросы и задания

1. Объяснить явление внутреннего трения в идеальном газе с точки зрения молекулярно-кинетической теории.

2. Написать закон Ньютона для внутреннего трения.

3. Объяснить вывод формулы Пуазейля (15).

4. Дать определение понятию ламинарное течение.

5. Написать формулу для расчета средней длины свободного пробега молекул идеального газа.

6. Объяснить вывод формулы для расчета коэффициента внутреннего трения (вязкости) воздуха (16).

Список рекомендуемой литературы

1. § 10.7÷10.9. 2. § 48. 3. § 2.34÷2.38. 4. § 79, 80.

Лабораторная работа 5

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕВА НИТИ

Цель работы: экспериментальное определение коэффициента теплопроводности воздуха, находящегося вблизи нагретой электрическим током нити. В лабораторной работе

определяются электрическая мощность, выделяемая в нити, и температура нити.

Теоретические основы работы

Теплопроводность - один из видов переноса теплоты от более нагретых частей тела к менее нагретым. Обычно этот процесс приводит к выравниванию температуры. Если же поддерживать разность температур неизменной, получаем так называемый стационарный процесс. Для стационарного одномерного процесса (температура тела меняется лишь по оси OX) имеем уравнение Фурье

$$dQ = -\chi \frac{dT}{dx} dS dt, \quad (1)$$

где dQ – количество теплоты, переносимое за время dt через поверхность площадью dS , нормальную к оси OX , в направлении убывания температуры; dT/dx – градиент температуры; χ – коэффициент теплопроводности.

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

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

$$\chi = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle c_v, \quad (2)$$

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:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}},$$

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

где m_0 – масса молекулы; $R = 8,314$ Дж/(моль · К) – газовая постоянная; M – молярная масса; T – термодинамическая температура; k – постоянная Больцмана; n – число молекул в единице объема; σ – эффективное сечение столкновений молекул. Отсюда из (2) получим

$$\chi = \text{const} \frac{c_v}{\sigma} \sqrt{T}. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что для реальных газов коэффициент теплопроводности с увеличением температуры растет быстрее, чем следует из (3). Это связано с незначительным увеличением c_v и уменьшением эффективного сечения столкновений σ с ростом температуры. Из опытов следует, что для многих газов (в частности, для воздуха)

$$\chi = \text{const} \cdot T^\beta,$$

где показатель $\beta = 0,7 \div 1$.

Описание установки. Вывод расчетных формул

Принципиальная схема установки изображена на рис. 5.1. Нагреваемая вольфрамовая нить 6 протянута по оси симметрии стеклянной трубки 8, которая является также внутренней стенкой цилиндрического баллона 7, заполненного водой. Температура воды в баллоне 7 и, следовательно, температура стенки $T_{\text{ст}}$ трубки 8 можно считать постоянной в течение опыта, равной температуре окружающей среды (комнатной температуре), вследствие большого значения теплоемкости воды

Баллон с нитью закреплен в модуле на лабораторном стенде (см. рис. 5.2). На панели модуля расположены электрические

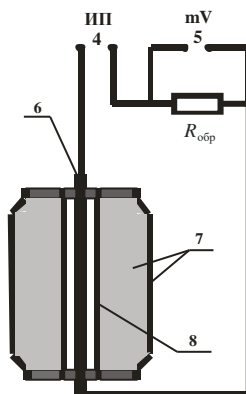


Рис. 5.1. Принципиальная схема установки

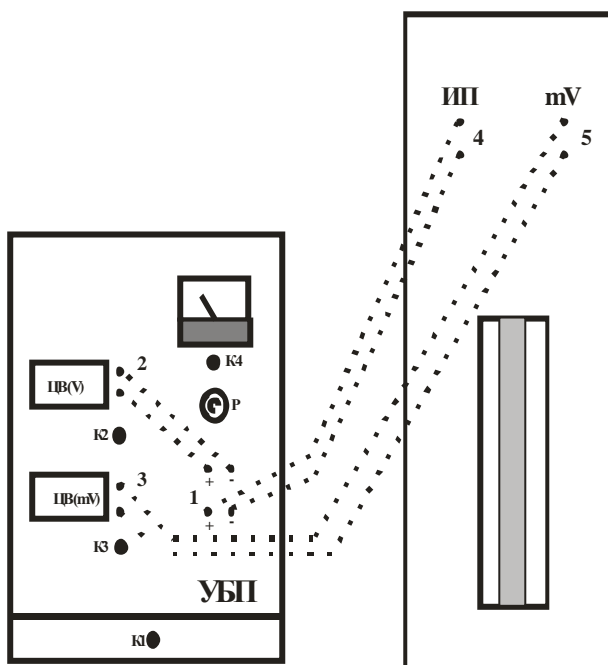


Рис. 5.2. Схема соединений. Внешний вид

разъемы: 4 **ИП** для подключения вольфрамовой нити 6 к разъемам 1 универсального блока питания УБП и 5 **mV**, соединяемые с разъемами 3 цифрового милливольтметра **ЦВ (mV)**, для измерения падения напряжения U_R на образцовом сопротивлении $R_{обр}$. Напряжение U_n на вольфрамовой нити 6, подаваемое от УБП, измеряется с помощью цифрового вольтметра **ЦВ (V)**, разъемы 2 которого соединяются со второй парой разъемов 1 УБП.

При нагревании нити вдоль радиуса трубки 8 создается градиент температуры dT/dr . Площадь, через которую передается тепло, равна площади поверхности цилиндра, коаксиального с нагретой нитью: $S = 2\pi rL$. При этом соотношение (1) принимает вид

$$dQ = -\chi \frac{dT}{dr} 2\pi rLdt = -\chi \frac{dT}{(dr/r)} 2\pi Ldt, \quad (4)$$

где L – длина цилиндра, радиус r – произволен.

Учитывая, что $dr/r = d(\ln r)$, запишем соотношение (4) для мощности теплового потока через поверхность цилиндра

$$q = \frac{dQ}{dt}$$

$$q = \frac{dQ}{dt} = -\chi(r) \frac{dT}{d(\ln r)} 2\pi L. \quad (5)$$

В (5) подчеркнут тот факт, что коэффициент теплопроводности больше зависит от r , чем от L .

Для стационарного процесса (при постоянной температуре нити T_n) мощность теплового потока, переносимого от нити к внутренней поверхности трубки 8, можно записать соотношением

$$q = -\chi \frac{T_{ст} - T_n}{\ln(r_2 / r_1)} 2\pi L, \quad (6)$$

где r_1 – радиус нити; r_2 – радиус трубки 8; $T_{ст}$ – температура стенки трубки; T_n – температура нити. Перепишем формулу (6) в виде

$$q = \chi 2\pi L \frac{T_n - T_{ст}}{\ln(r_2 / r_1)}. \quad (7)$$

Эксперимент проводится при постоянной температуре трубки 8, равной $T_{\text{ст}} = T_{\text{ср}}$. Увеличение электрической мощности, выделяемой в нити, приводит к увеличению мощности теплового потока: $dq = dP$; при этом температура нити возрастает на величину $dT_{\text{н}}$. Из (7) следует (при условии, что температуру воды в баллоне 7, а следовательно, и температуру $T_{\text{ст}}$ считаем постоянной)

$$dq = \frac{2\pi L}{\ln(r_2/r_1)} \chi(T_{\text{н}}) dT_{\text{н}}. \quad (8)$$

Так как вблизи нити теплопроводность воздуха определяется температурой $T_{\text{н}}$, то в (8) значение $\chi(T_{\text{н}})$ относится к этой температуре. При возрастании температуры нити на $dT_{\text{н}}$, дополнительный перенос тепловой мощности dP от нити к стенке трубки определяется только теплопроводностью слоя воздуха вблизи нити.

Из соотношения (8) получим

$$\chi(T_{\text{н}}) = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L} \frac{dP}{dT_{\text{н}}}. \quad (9)$$

Для нахождения производной $dP/dT_{\text{н}}$ необходимо знать зависимость $P = f(T_{\text{н}})$, которую определяют по экспериментальным данным. Мощность теплового потока $P = I_{\text{н}} U_{\text{н}}$ находят по напряжению на нити $U_{\text{н}}$ и току $I_{\text{н}}$, равному току протекающему через образцовое сопротивление $R_{\text{обр}}$:

$$I_{\text{обр}} = I_{\text{н}} = U_R / R_{\text{обр}} = U_{\text{н}} / R_{\text{н}}. \quad (10)$$

Следовательно,

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}} R_{\text{обр}}}{U_R}, \quad (11)$$

$$P = \frac{U_{\text{н}}^2}{R_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{н}} U_R}{R_{\text{обр}}}, \quad (12)$$

где $U_{\text{н}}$ – напряжение на нити; U_R – напряжение на образцовом сопротивлении; $R_{\text{н}}$ – сопротивление нити; $R_{\text{обр}}$ – образцовое сопротивление.

Температура нити определяется из соотношений

$$t_n = \frac{R_n - R_0}{\alpha_t R_0}, [^{\circ}\text{C}] \quad (13)$$

$$T_n = (273,15 + t_n), [\text{K}] \quad (14)$$

где R_0 – электрическое сопротивление нити при $t_n = 0^{\circ}\text{C}$, R_n – сопротивление нити при температуре опыта; α_t – температурный коэффициент сопротивления для материала нити.

Формула (9) позволяет по найденной экспериментальной зависимости $P = f(T_n)$ определить $\chi(T_n)$.

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

- 1) тепловые потери через концы нити;
- 2) конвективный перенос тепла от нити к стенке трубки.

Эти процессы приводят к методической погрешности определения коэффициента теплопроводности воздуха; оценка этой погрешности показала, что она не превосходит 7%.

Порядок выполнения работы

1. Выписать данные со стенда установки и измерительных приборов.

2. Убедиться в том, что все приборы выключены. Повернуть регулятор напряжения P на универсальном блоке питания против часовой стрелки.

3. Соединить проводами разъемы 1 с разъемами цифрового вольтметра 2, разъемы 4 с разъемами 1 УБП, разъемы 5 с разъемами цифрового милливольтметра 3.

4. Согласовать с преподавателем, при каких значениях напряжения на источнике питания следует проводить эксперименты (например, $U_n = 1 \text{ В}; 2 \text{ В}; 3 \text{ В}; 4 \text{ В}; 5 \text{ В}$).

5. Включить стенд тумблером К1. Включить измерительные приборы: цифровой вольтметр тумблером К2, а цифровой милливольтметр тумблером К3. Включить УБП, нажав кнопку К4.

6. Плавным поворотом регулятора напряжения P УБП по часовой стрелке по показанию цифрового вольтметра установить значение напряжения на нити U_n .

7. Подождать стабилизации температуры нити 6, при этом показание цифрового милливольтметра перестанет изменяться. Провести отсчет напряжения на нити U_n по цифровому вольтметру, отсчет напряжения на образцовом сопротивлении U_R по цифровому милливольтметру. Результаты занести в таблицу измерений.

8. Пункты 6 и 7 повторить для остальных заданных преподавателем значений напряжений нити U_n .

9. Снять напряжение на УБП поворотом регулятора напряжения P против часовой стрелки. Выключить измерительные приборы и стенд в порядке, обратным заданному в пункте 5.

Данные установки и таблица результатов измерений

Радиус нити $r_1 =$; $\Delta r_1 =$;
 внутренний радиус трубки $r_2 =$; $\Delta r_2 =$;
 сопротивление нити (при $t_n = 0^\circ\text{C}$) $R_0 = 2,26 \text{ Ом}$
 температурный коэффициент сопротивления нити
 $\alpha_t = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$, $\Delta \alpha_t =$;
 длина нити $L =$; $\Delta L =$; $R_{\text{обп}} = 0,010 \text{ Ом}$.

Номер опыта	U_n , В	U_R , мВ	I_n , А	R_n , Ом	T_n , К	P , Вт	χ , Вт м ⁻¹ К ⁻¹
1							
2							
3							
4							
5							

Обработка результатов измерений

По формулам (10), (11), (12) рассчитать I_n , R_n , P .

По формуле (13) рассчитать t_n и по формуле (14) T_n .

Производная dP/dT_n определяется графически.

Графическая обработка опытных данных

1. Построить на миллиметровой бумаге график зависимости $P = f(T_n)$. Провести с помощью лекал аппроксимирующую кривую через совокупность экспериментальных точек.

2. Выбрать три точки кривой и графически определить производную dP/dT_n в этих точках. Для этого провести в выбранных точках касательные к кривой и определить тангенс угла наклона каждой из них.

3. Рассчитать по формуле (9) коэффициент теплопроводности, для температур в выбранных точках.

4. Полученные результаты сравнить с теоретическими значениями (прил. 6).

Контрольные вопросы

1. Объяснить методику измерения коэффициента теплопроводности.

2. Зависит ли коэффициент теплопроводности воздуха от давления? Аргументировать ответ.

3. Объясните понятие градиента температуры.

4. Дайте определение средней скорости теплового движения молекул идеального газа. От каких физических величин она зависит?

5. Что называют средней длиной свободного пробега? От каких физических величин зависит длина свободного пробега?

6. Почему аппроксимирующая зависимость $P = f(T_n)$ выбрана в виде функции?

7. Как производится математическая обработка результатов?

8. Объясните процедуру графической обработки результатов.

9. Объяснить вывод формулы для расчета коэффициента теплопроводности воздуха (9).

10. Объясните формулу (2) с молекулярно–кинетической точки зрения.

Список рекомендуемой литературы

1. § 10.7÷10.9. 2. § 48. 3. § 2.34÷2.38. 4. § 79, 80.

Лабораторная работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА И ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ДЛЯ ВОЗДУХА МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ

Цель работы: экспериментальное определение отношения молярных теплоемкостей и скорости звука в воздухе методом стоячей волны.

Приборы и принадлежности: генератор сигналов низкочастотный (ГЗ), осциллограф (С1), труба с телефонами на концах.

Теоретические основы работы

Звуковыми (акустическими) волнами называются волны малой интенсивности, распространяющиеся в упругой среде. Если частицы среды колеблются в направлении распространения волны, то упругая волна называется продольной. Если частицы среды колеблются, оставаясь в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны, то упругая волна называется поперечной.

Уравнение плоской волны, которая распространяется вдоль положительного направления оси OX :

$$S = A \sin(\omega t - kx + \varphi_0),$$

где A – амплитуды волны; $\omega = \frac{2\pi}{T}$ – циклическая (круговая)

частота; T – период колебаний; $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{vT} = \frac{\omega}{v}$ – волновое

число; $\lambda = v/\nu$ – длина волны; v – фазовая скорость волны; ν – частота колебаний; φ_0 – начальная фаза колебаний (фаза колебания волны в момент времени $t = 0$ и в точке с координатой $x = 0$).

Рассмотрим частный случай наложения двух плоских волн, распространяющихся навстречу друг к другу, имеющих одинаковые амплитуды ($A_1 = A_2 = A$) и одинаковые частоты ($\omega_1 = \omega_2 = \omega$):

$$S_1 = A \sin(\omega t - kx + \alpha_1),$$

$$S_2 = A \sin(\omega t + kx + \alpha_2),$$

где α_1 и α_2 – начальные фазы соответствующих волн.

В соответствии с принципом суперпозиции (наложения) волн образуется плоская волна:

$$S = S_1 + S_2 = A \sin(\omega t - kx + \alpha_1) + A \sin(\omega t + kx + \alpha_2),$$

$$S = 2A \cos\left(kx + \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{\alpha_2 + \alpha_1}{2}\right). \quad (1)$$

Уравнение (1) является уравнением стоячей волны. Чтобы упростить его, выберем начало отсчета $x = 0$ так, чтобы разность $\alpha_2 - \alpha_1$ стала равной нулю, а начало отсчета $t = 0$ – так, чтобы стала равной нулю сумма $\alpha_2 + \alpha_1$. Кроме того, заменим волновое число k его значением $\frac{2\pi}{\lambda}$. Тогда уравнение стоячей волны (1) примет вид

$$S = 2A \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \sin(\omega t). \quad (2)$$

Из (2) видно, что амплитуда стоячей волны $A_{\text{ст}}$ зависит от координаты

$$A_{\text{ст}} = 2A \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right).$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots),$$

амплитуда колебаний имеет максимальное значение. Эти точки называются пучностями стоячей волны и имеют значение координат

$$x_{\text{пучн}} = \pm n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots).$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots),$$

амплитуда колебаний имеет минимальное значение. Эти точки называются узлами стоячей волны и имеют значение координат:

$$x_{\text{узл}} = \pm \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots).$$

Если звуковая волна распространяется в среде, имеющей ограниченный размер l , то стоячая волна образуется только в том случае, когда величина l кратна целому числу полуволен $\lambda/2$:

$$l = m \frac{\lambda}{2}. \quad (3)$$

С учетом, что $\lambda = v/v$, получим

$$l = \frac{m}{2} \frac{v}{v}, \quad (4)$$

где m – целое число.

Скорость распространения продольных волн в сплошной среде определяется по формуле

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E – модуль Юнга среды; ρ – плотность среды.

Процесс распространения продольных акустических волн в воздухе можно считать адиабатическим, поэтому формула для скорости звука принимает вид

$$v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \quad (5)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ – отношение молярных теплоемкостей для воздуха; p – давление воздуха, ρ – плотность воздуха.

При давлении, близком к нормальному атмосферному, и обычных температурах воздух по своим свойствам можно считать двухатомным идеальным газом, для которого $\gamma = 1,4$ и

$\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M}$, тогда формула (5) примет вид

$$v_T = \sqrt{1,4 \frac{RT}{M}}, \quad (6)$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – термодинамическая температура; $M = 0,029$ кг/моль – молярная масса воздуха.

Описание установки. Вывод расчетных формул

Установка (рис. 6.1) состоит из генератора низкочастотных сигналов ГЗ, осциллографа С1, трубы 1, двух телефонов T_1 и T_2 . Телефон T_1 закреплен на конце трубы 1 и проводами соединен с выходными клеммами 2 генератора сигналов. Телефон T_2 с помощью трубки 3 можно перемещать вдоль трубы 1, тем самым изменяя расстояние между телефонами l . Телефон T_2 проводами соединен с клеммами входа У осциллографа. Вращая ручку 4 лимба частот генератора сигналов ГЗ, можно изменить частоту колебаний мембраны телефона T_1 и, следовательно, задать частоту звуковой волны (частоту колебаний столба воздуха в трубе 1). Приемником является телефон T_2 , амплитуда колебаний мембраны которого оценивается по амплитуде колебаний сигнала, наблюдаемого на экране осциллографа Э.

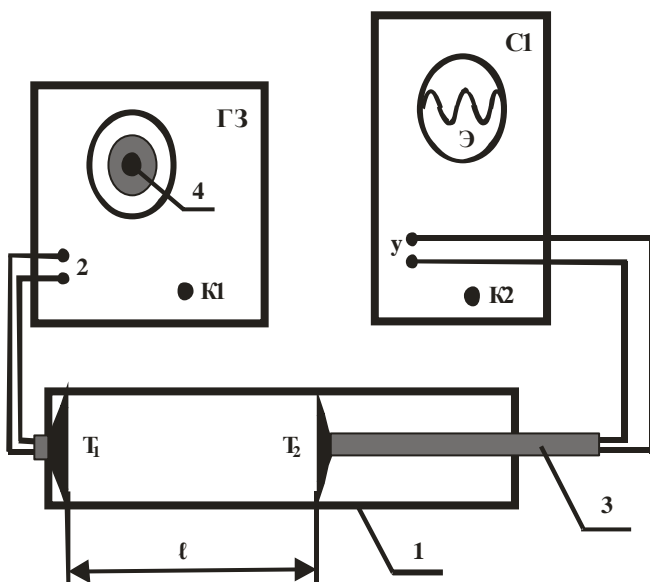


Рис. 6.1. Принципиальная схема

При выполнении условия (3) возникает стоячая волна, что соответствует резкому увеличению амплитуды колебаний сигнала, наблюдаемого на экране осциллографа Э.

Из условия (4) следует, что, меняя частоту сигнала при неизменном расстоянии l , мы будем получать в закрытой трубе стоячие волны каждый раз, когда вдоль трубы будет укладываться целое число полуволн. Частоты ν_m , при которых возникают стоячие волны, называются собственными частотами колебаний (гармониками).

Номер гармоники (целое число m) определяется из наблюдения двух последовательных состояний колеблющейся системы, при которых устанавливаются стоячие волны:

$$l = \frac{m}{2} \frac{v}{\nu_m} = \frac{m+1}{2} \frac{v}{\nu_{m+1}},$$

$$m = \frac{\nu_m}{\nu_{m+1} - \nu_m}. \quad (7)$$

Из условия (4) с учетом (7) получим выражение для расчета скорости звука

$$\nu_3 = 2l(\nu_{m+1} - \nu_m) = 2l\Delta\nu. \quad (8)$$

Из условия (4) можно получить выражение для расчета скорости звука, изменяя длину l при постоянном значении частоты ν (длины волны λ):

$$\nu_3 = 2\nu(l_{m+1} - l_m) = 2\nu\Delta l. \quad (9)$$

Зная скорость звука, из формулы (5) получим выражение для расчета отношения молярных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме γ :

$$\gamma = \nu_3^2 \rho / p. \quad (10)$$

Порядок выполнения лабораторной работы

Температура окружающей среды (воздуха в лаборатории)

$T =$

атмосферное давление $p =$

плотность воздуха (прил. 7) $\rho =$

Упражнение 1. Измерение скорости звука методом стоячей волны при фиксированной длине l

1. Установить заданное преподавателем расстояние l между телефонами.

2. Включить тумблером К1 генератор сигналов ГЗ и тумблером К2 осциллограф С1.

3. Подождать 2-3 минуты для прогрева приборов. Плавное вращение ручки 4 лимба частот генератора сигналов ГЗ, меняя частоту колебаний от 200 до 2000 Гц, последовательно возбуждая в закрытой трубе 1 стоячие волны. Частоты (гармоники), при которых произошло установление стоячих волн, фиксируются.

4. Определить разность частот последовательных гармоник

$$(\Delta\nu)_i \text{ и усреднить полученные значения } (\Delta\nu)_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\nu)_i}{n}.$$

5. По формуле (8) рассчитать скорость звука v_3 .

6. Определить, пренебрегая погрешностью измерения расстояния l , относительную и абсолютную погрешность измерения v_3 по формулам

$$\varepsilon_v = \Delta(\Delta\nu)/(\Delta\nu)_{\text{ср}}, \quad \Delta v = v_3 \varepsilon_v.$$

7. По формуле (10) рассчитать экспериментальное значение отношения молярных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме (показатель адиабаты) γ .

8. Выключить приборы.

Упражнение 2. Измерение скорости звука методом стоячей волны при фиксированной частоте колебаний ν

1. Включить тумблером К1 генератор сигналов ГЗ и тумблером К2 осциллограф С1. Подождать 2-3 минуты для прогрева приборов. Плавное вращение ручки 4 лимба частот генератора сигналов ГЗ, установить заданное преподавателем частоту колебаний ν .

2. Плавное выдвижение трубки 3, изменяем расстояние l между телефонами от 0 до 100 см, последовательно возбуждая в

закрытой трубе 1 стоячие волны. Расстояния l , при которых произошло установление стоячих волн, фиксируются.

3. Определить разность расстояний $(\Delta l)_i$ между последовательными положениями телефона T_2 , при которых произошло установление стоячих волн и усреднить полученные

$$\text{значения } (\Delta l)_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta l)_i}{n}.$$

4. По формуле (9) рассчитать скорость звука v_3 .

5. Определить, пренебрегая погрешностью выставления частоты колебаний ν , относительную и абсолютную погрешность измерения v_3 по формулам

$$\varepsilon_v = \Delta(\Delta l) / (\Delta l)_{\text{ср}}, \quad \Delta v = v_3 \varepsilon_v.$$

6. По формуле (10) рассчитать экспериментальное значение отношения молярных теплоемкостей воздуха при постоянном давлении и постоянном объеме (показатель адиабаты) γ .

7. Выключить приборы.

По формуле (6) рассчитать теоретическое значение скорости звука и сравнить с экспериментальными значениями, измеренными в упражнениях 1 и 2.

Контрольные вопросы и задания

1. Объяснить распространение колебаний в упругой среде.
2. Какая волна называется поперечной? продольной? Когда они возникают?
3. Дать определения длины волны, волнового числа, фазовой скорости. Какова связь между длиной волны, скоростью и периодом?
4. Какая волна является бегущей, гармонической, плоской, сферической? Каковы уравнения этих волн?
5. Когда возникает стоячая волна? Чем стоячая волна отличается от бегущей?
6. Звуковые волны в воздухе продольные или поперечные? Почему?

Список рекомендуемой литературы

Лабораторная работа 7

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

Цель работы: 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, равной 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 это, 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 плавления (кристаллизации) $\lambda_{\text{кр}}$. Из первого начала термодинамики $\delta Q = dU + \delta A$ следует

$$\lambda_{\text{кр}} = U_{\text{ТВ}} - U_{\text{Ж}} + p(V_{\text{ТВ}} - V_{\text{Ж}}),$$

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

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

$$\lambda_{\text{кр}} \approx U_{\text{тв}} - U_{\text{ж}}. \quad (1)$$

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

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

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

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

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

$$Q = \lambda_{\text{кр}} M_o, \quad (3)$$

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

Из (2) и (3) следует, что

$$S_2 - S_1 = \frac{\lambda_{\text{кр}} M_o}{T_{\text{кр}}} \quad (4)$$

или с учетом (1)

$$S_2 - S_1 = \frac{(U_{\text{тв}} - U_{\text{ж}})}{T_{\text{кр}}} M_o.$$

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

Описание установки. Вывод расчетных формул

В электрической печи 7 (рис. 7.1) помещена ампула с оловом 8. Разность температуры нагретого олова и температуры воздуха в лаборатории определяется при помощи дифференциальной хромель-копелевой термопары, горячий спай 9 которой находится в ампуле, а холодный через разъемы 4 mV на модуле соединен с разъемами 3 цифрового милливольтметра, измеряющего возникающую термоЭДС (E). Включение электрической печи производится тумблером К5 (рис. 7.2).

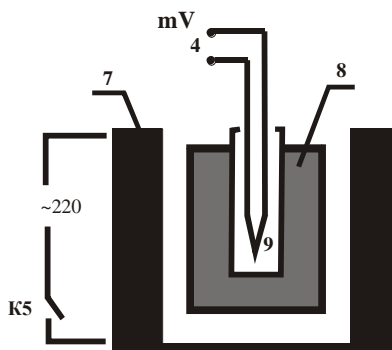


Рис. 7.1. Принципиальная схема установки

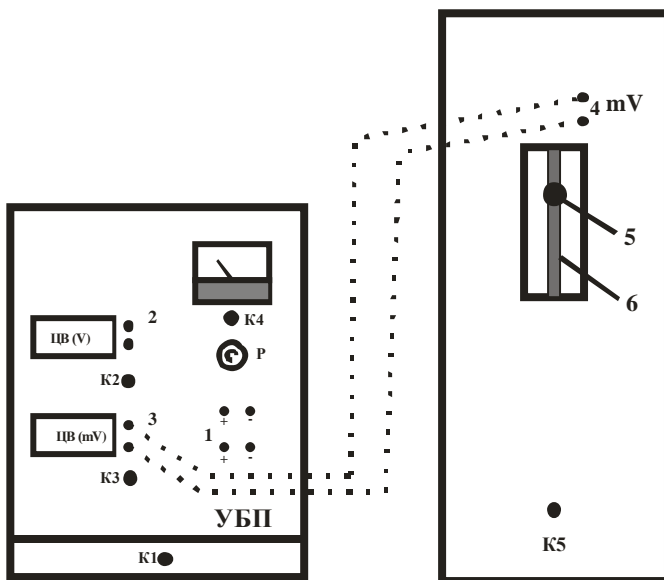


Рис. 7. 2. Схема соединений. Внешний вид

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

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

$$(c_o M_o + c_a M_a) dT + \alpha F (T - T_{cp}) d\tau = 0, \quad (5)$$

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

В (5) c_o , c_a – удельные теплоемкости олова и материалы ампулы, M_o и M_a – массы олова и ампулы; T – температура твердого олова; T_{cp} – температура окружающей среды; α –

коэффициент теплоотдачи с поверхности ампулы в окружающую среду. В дальнейшем считаем, что значение α в течение всего опыта постоянно.

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

$$\lambda_{\text{кр}} M_o + \alpha F (T_{\text{кр}} - T_{\text{ср}}) \Delta \tau = 0, \quad (6)$$

где $Q = \lambda_{\text{кр}} M_o$ – количество теплоты, отданное оловом при его кристаллизации за время кристаллизации $\Delta \tau$. Так как тепло отдано окружающей среде, то $Q < 0$. Второй член суммы в (6): $\alpha F (T_{\text{кр}} - T_{\text{ср}}) \Delta \tau > 0$ – количество теплоты, полученное окружающей средой через поверхность ампулы за время кристаллизации.

Из соотношений (5) и (6) следует

$$\lambda_{\text{кр}} = (c_o M_o + c_a M_a) \frac{\Delta \tau}{M_o} \frac{T_{\text{кр}} - T_{\text{ср}}}{T - T_{\text{ср}}} \frac{dT}{d\tau},$$

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \frac{\lambda_{\text{кр}} M_o}{T_{\text{кр}}}.$$

Следовательно, для определения ΔS необходимо измерить температуру кристаллизации $T_{\text{кр}}$, время кристаллизации $\Delta \tau$, а также вычислить производную $dT/d\tau$ функции $T = f(\tau)$ 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.

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

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

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

Порядок выполнения работы

1. Выписать данные установки и измерительных приборов.

2. Соединить проводами разъемы 4 **mV** термопары на модуле с разъемами 3 цифрового милливольтметра.

3. Отвернуть винт 5 ползунка 6 и опустить ампулу с оловом 8 в печь 7.

4. Включить стенд тумблером K1 и цифровой милливольтметр тумблером K3.

5. Включить электрическую печь 7 тумблером K5.

6. Проследить в течение нескольких минут за тем, чтобы олово, находящееся в ампуле, расплавилось. Процесс плавления олова происходит при постоянной температуре – температуре плавления $T_{пл}$. При этом показания милливольтметра практически не изменяются. Окончание процесса плавления можно определить как момент времени, после которого показания милливольтметра начинают возрастать.

7. Ампулу с оловом прогреть до 17 мВ (максимальное значение). Выключить электрическую печь 7 тумблером K5.

8. Отвернуть винт 5 ползунка 6, поднять ампулу с оловом 8 из печи 7 и закрепить в верхнем положении.

9. Включить секундомер и через каждые 10 секунд снимать показания милливольтметра, фиксирующего значение термоЭДС, соответствующее разности температур олова и окружающей среды $\theta = T - T_{ср}$. Измерения продолжать до тех пор, пока не будут пройдены:

- область I - область полного расплава;
- область II - область кристаллизации;
- область III - область охлаждения твердого олова (см. рис. 7.3).

$\Delta\tau = \tau_2 - \tau_1$ - время кристаллизации.

10. Получив 50-70 экспериментальных точек, выключить милливольтметр и стенд.

Данные установки и таблица результатов измерений

Масса олова $M_o =$; $\Delta M_o =$;
масса ампулы $M_a =$; $\Delta M_a =$;
удельная теплоемкость олова $c_o =$; $\Delta c_o =$;
удельная теплоемкость материала ампулы $c_a =$; $\Delta c_a =$.
температура среды $T_{ср} = 273,15 + t_{ком} =$ [K]

Номер опыта	τ , с	E , мВ	θ , К	$T = \theta + T_{cp}$, К	$\ln \theta$
1	0				
2	10				
3	20				

50	490				

Обработка результатов измерений

Удельную теплоту кристаллизации $\lambda_{кр}$ и изменение энтропии ΔS при кристаллизации олова можно определить графической или математической обработкой экспериментальных данных с использованием ЭВМ. Способ обработки задает преподаватель.

Графическая обработка результатов измерений

1. Определить по лабораторному термометру температуру окружающей среды – воздуха, представив ее в К (кельвинах).

2. По прил. 9 "Градуировочная характеристика хромель-копелевой термопары" определить значения разности температур θ , соответствующих измеренным значениям термоЭДС.

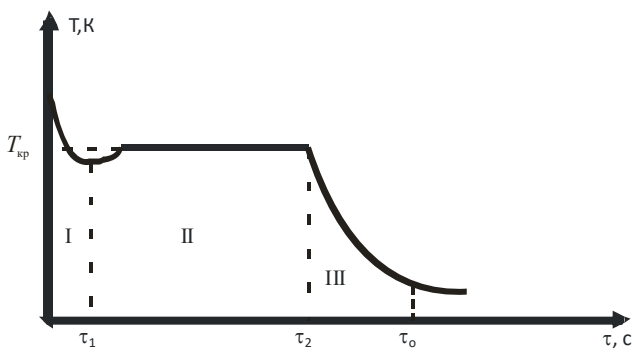


Рис. 7.3. Кривая охлаждения олова

3. Определить температуру олова T и построить график зависимости $T = f(\tau)$ (см. рис. 7.3).

4. По графику определить температуру кристаллизации олова $T_{кр}$.

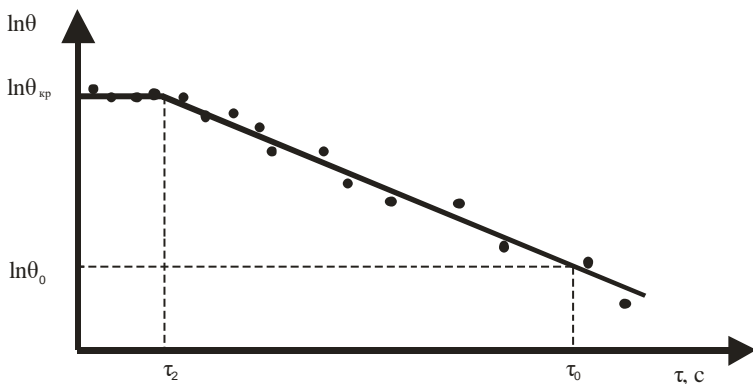


Рис. 7.4. Графическая обработка экспериментальных данных

5. Построить график зависимости $\ln\theta = f(\tau - \tau_2)$ для участка III (рис. 7.4), аппроксимировать полученную зависимость прямой линией и определить тангенс угла наклона по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\ln \theta_{кр} - \ln \theta_0}{\tau_0 - \tau_2},$$

где θ_0 и τ_0 – выбранные на графике значения разности температур и времени в конце опыта.

6. Рассчитать удельную теплоту кристаллизации олова по формуле

$$\lambda_{кр} = -(c_o M_o + c_a M_a) \frac{\theta_{кр} \Delta \tau}{M_o} \operatorname{tg} \varphi.$$

7. Рассчитать изменение энтропии при кристаллизации олова по формуле (4).

Контрольные вопросы

1. Запишите первое начало (закон) термодинамики в применении к процессу кристаллизации.
2. Дайте определение понятия энтропии. Как определяется изменение энтропии для обратимого термодинамического процесса?
3. Как изменяется энтропия в процессе кристаллизации?
4. Примените закон сохранения энергии к процессу кристаллизации олова.
5. Объяснить вывод расчетной формулы для определения изменения энтропии при кристаллизации олова (12).
6. Каким уравнением описывается процесс охлаждения твердого олова?
7. Опишите методику определения $\lambda_{кр}$.

Список рекомендуемой литературы

1. § 11.3, 11.5, 11.6. 2. § 56, 57, 73-76. 3. § 2.62 – 2.68, 2.105 – 2.109.
4. § 81, 82, 89 -91.

Список рекомендуемой литературы

1. *Детлаф А.А.* Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов / А.А. Детлаф, Б.М. Яворский. – 4-е изд., испр. – М.: Академия, 2003. – 720 с.

2. *Трофимова Т.И.* Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 16-е изд., стер. – М.: Академия, 2008. – 500 с.

3. *Трофимова Т.И.* Физика в таблицах и формулах: учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2004. – 432 с.: ил.

4. *Савельев И.В.* Курс физики: учебник: в 3 т. / И.В. Савельев. Т.1. Механика. Молекулярная физика. – М.: Наука, 1989. – 352 с.

Приложение 1

Универсальные физические постоянные

Гравитационная постоянная	$G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{кг}^2$
Ускорение свободного падения стандартное	$g = 9,80665 \text{ м/с}^2$
Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ м/с}$
Масса протона	$m_{\text{п}} = 1,670 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Масса электрона	$m_{\text{е}} = 9,10 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Масса Земли	$M_{\text{З}} \approx 5,960 \cdot 10^{24} \text{ кг}$
Масса Солнца	$M_{\text{С}} \approx 1,980 \cdot 10^{30} \text{ кг}$
Масса Луны	$M_{\text{Л}} \approx 7,33 \cdot 10^{22} \text{ кг}$
Средний радиус Земли	$R_{\text{З}} \approx 6,370 \cdot 10^6 \text{ м}$
Средний радиус Солнца	$R_{\text{С}} \approx 6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$
Средний радиус Луны	$R_{\text{Л}} \approx 1,74 \cdot 10^6 \text{ м}$
Среднее расстояние от Земли до Солнца	$L \approx 1,50 \cdot 10^{11} \text{ м}$
Среднее расстояние от Земли до Луны	$l \approx 3,84 \cdot 10^8 \text{ м}$
Период обращения Луны вокруг Земли	$T = 27,3 \text{ сутки}$
Газовая постоянная универсальная	$R = 8,314 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$
Число Авогадро	$N_{\text{А}} = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Постоянная Больцмана	$k = \frac{R}{N_{\text{А}}} = 1,380 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Объем одного моля идеального газа при нормальных условиях ($T_0 = 273,15 \text{ К}$, $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$)	$v_0 = 22,414 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{моль}$
Нормальное атмосферное давление	$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$
Абсолютный нуль	$OK = -273,15^\circ \text{ С}$
Термодинамическая температура	$T = (273,15 + t, ^\circ\text{С}) \text{ К}$

Некоторые постоянные газов (при $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па)

M – молярная масса, ρ – плотность при нормальных условиях ($T_0 = 273,15$ К, $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па), α_p – термический коэффициент давления, c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении и $\gamma = c_p / c_v$ – отношение теплоемкостей при $T = 291$ К, η – динамическая вязкость при $T = 293$ К, χ – коэффициент теплопроводности при $T_0 = 273,15$ К, $T_{пл}$ – температура плавления (кристаллизации), $T_{кип}$ – температура кипения

Газ	Формула	$M, 10^{-3}$ кг/моль	$\rho,$ кг/м ³	$\alpha_p, 10^{-6}$ К ⁻¹	$c_p,$ Дж/(кг·К)	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$	$\eta,$ 10 ⁻⁶ Па·с	$\frac{\chi, 10^{-2}}{(\text{м} \cdot \text{К})}$	$T_{пл}, \text{К}$	$T_{кип}, \text{К}$
Азот	N ₂	28,016	1,250	3674	1043	1,40	17,4	2,43	63,13	77,35
Аммиак (пары)	NH ₃	17,031	0,771	3802	2244	1,34	97,0	2,18	195,45	235,75
Водород	H ₂	2,016	0,090	3662	14278	1,41	8,8	16,84	13,95	20,37
Воздух сухой*		28,960	1,293	3674	1010	1,40	18,1	2,41	60,15	80,15
Гелий	He	4,002	0,178	3660	5281	1,66	19,4	14,15	0,95	4,22
Кислород	O ₂	32,000	1,429	3674	913	1,40	20,0	2,44	54,32	90,18
Оксид азота	NO	30,006	1,340	-	1013	1,38	18,8	2,38	106,15	123,15
Оксид углерода	CO	28,010	1,250	3670	1047	1,40	17,6	2,32	74,15	83,15
Углекислый газ	CO ₂	44,010	1,977	3726	846	1,30	14,5	1,39	217,15	194,65

Примечание. Состав воздуха по объему: 78,03% N₂, 20,99% O₂, 0,933% Ar, 0,03% CO₂, 0,01% H₂, 0,0018% Ne и другие.

Некоторые постоянные жидкостей
(при норм. атм. давлении $p_0=1,013 \cdot 10^5$ Па)

ρ – плотность при 293 К, $T_{пл}$ – температура плавления (кристаллизации), $T_{кип}$ – температура кипения, c – удельная теплоемкость, η – динамическая вязкость при 293 К, λ – удельная теплота плавления (кристаллизации), r – удельная теплота парообразования при $T_{кип}$, σ – коэффициент поверхностного натяжения при 293 К

Жидкости	ρ , 10^3 кг/м ³	$T_{пл}$, К	$T_{кип}$, К	c , Дж/(кг·К)	η , 10^{-3} Па·с	λ , 10^5 Дж/кг	r , 10^5 Дж/кг	σ , 10^{-3} Н/м
Анилин	1,026	267,15	457,15	2156	4,60	0,88	4,35	0,043
Ацетон	0,787	178,15	329,65	2177	0,337	0,82	5,23	0,023
Бензол	0,879	278,65	353,25	1716	0,673	1,27	3,94	0,030
Вода	0,998	273,15	373,15	4187	1,05	3,34	22,6	0,073
Глицерин	1,264	293,15	563,15	2430	1393,0	1,76	-	0,066
Ксилол	0,850	223,85	411,65	1675	0,647	1,63	3,39	0,028
Масло касторовое	0,970	-	-	1800	950,00	-	-	0,035
Ртуть	13,596	234,15	630,15	138	1590,00	0,12	2,85	0,50
Спирт этиловый	0,789	159,15	351,65	2510	1,22	1,08	8,50	0,022
Уксусная кислота	1,049	289,85	391,15	2090	1,270	1,88	3,77	0,026
Эфир этиловый	0,714	157,15	307,65	2344	0,238	1,13	3,55	0,017

Некоторые постоянные твердых тел
(при норм. атм. давлении $p_0=1,013 \cdot 10^5$ Па)

ρ – плотность при 293 К, $T_{пл}$ – температура плавления (при $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па), c – удельная теплоемкость при 293 К, χ – коэффициент теплопроводности при 293 К, λ – удельная теплота плавления, α – линейный коэффициент расширения

Твердое тело	ρ , 10^3 кг/м ³	$T_{пл}$, К	c , Дж/(кг·К)	χ , Вт/м·К	λ , 10^5 Дж/кг	α , 10^{-6} К ⁻¹
Алюминий	2,70	933	896	200	3,22	24,0
Бронза	8,7	-	377	59	-	17,0
Вуда сплав	9,7	344	167	126	0,35	-
Дерево дубовое еловое березовое	0,7-1,03 0,4-0,7 0,5-0,8	} - }	1380	0,21	-	4-60
Железо	7,9	1803	500	59	2,72	12,1
Сталь	7,7-8,0	-	470	46	-	10,6
Константан	8,8	-	419	23	-	15,2
Латунь	8,4	1173	386	9	-	1,90
Лед	0,9	273	2100	2,5	3,35	-
Медь	8,8	1356	395	38,5	1,76	16,7
Никель	8,9	1726	460	59	2,70	12,8
Олово	7,3	505	230	66	0,60	23,0
Пробка	0,24	-	2050	0,42	-	-
Свинец	11,3	600	126	35	0,226	29,0
Серебро	10,5	1233	235	423	0,88	19,7
Эбонит	1,2	-	1680	0,17	-	84,0

Приложение 5

Коэффициент внутреннего трения (вязкости) η жидкостей при различных температурах

T, K	$\eta, 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$		
	Вода	Глицерин	Касторовое масло
288	1,140	2250	1514
293	1,050	1393	950
298	0,894	952	621
303	0,801	600	451

Приложение 6

Коэффициент теплопроводности χ воздуха при различных температурах

T, K	$\chi, 10^{-2} \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
273	2,41
290	2,48
300	2,55
310	2,62
320	2,69
330	2,76
340	2,84
350	2,90
360	2,96
370	3,03

**Плотность воздуха ρ
при различных температурах и давлениях, кг/м³**

<i>t</i> , С	<i>P</i> , кПа								
	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
17	1,149	1,161	1,173	1,185	1,200	1,209	1,212	1,221	1,232
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

Соотношения между единицами давления

$$1 \text{ атм} = 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.}$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} 133,3 \text{ Па}$$

Градуировочная характеристика хромель-алюмелевой термопары

θ, K	Термоэлектродвижущая сила (E, мВ)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,044	1,081	1,122	1,162
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,770	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,736	2,727	2,809
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639
90	3,681	3,712	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,420	4,467

Градуировочная характеристика хромель-копелевой термопары

θ, K	Термоэлектродвижущая сила (E, 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	3,650	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	6,898	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	14,712	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,505	15,586	15,708	15,790	16,872	15,950	16,036	16,118
220	16,200	16,283	16,361	16,449	16,532	16,015	16,628	16,781	16,864	16,917

Оглавление

Предисловие	3
Общие методические указания и требования к выполнению работ	4
<i>Лабораторная работа 1</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ	7
<i>Лабораторная работа 2</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ C_p/C_v ДЛЯ ВОЗДУХА	15
<i>Лабораторная работа 3</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПО МЕТОДУ СТОКСА	23
<i>Лабораторная работа 4</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ И СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА	29
<i>Лабораторная работа 5</i>	
ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОЗДУХА МЕТОДОМ НАГРЕВА НИТИ	37
<i>Лабораторная работа 6</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА И ОТНОШЕНИЯ МОЛЯРНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ДЛЯ ВОЗДУХА МЕТОДОМ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ	46
<i>Лабораторная работа 7</i>	
ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ ЭНТРОПИИ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ОЛОВА	53
Список рекомендуемой литературы	61
Приложение 1. Универсальные физические постоянные ..	62
Приложение 2. Некоторые постоянные газов	63
Приложение 3. Некоторые постоянные жидкостей	64
Приложение 4. Некоторые постоянные твердых тел	65
Приложение 5. Коэффициент внутреннего трения (вязкости) η жидкостей при различных температурах	66

Приложение 6. Коэффициент теплопроводности χ воздуха при различных температурах	66
Приложение 7. Плотность воздуха ρ при различных температурах и давлениях, кг/м ³	67
Приложение 8. Градуировочная характеристика хромель-алюмелевой термопары	68
Приложение 9. Градуировочная характеристика хромель-копелевой термопары	69

Учебно-практическое издание

Молекулярная физика и термодинамика

Лабораторный практикум

Отв. за выпуск М.В. Яковлева

Подписано в печать . Формат 60×84/16.
Бумага газетная. Печать оперативная. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 6,97. Уч.-изд. л. 6,19. Тираж 500 экз.
Заказ № .

Чувашский государственный университет
Типография университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15