

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

**Разделы «КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»,
«МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»**

Под редакцией В.А. Шилова

*Рекомендовано УМО «Ядерные физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

Москва 2012

УДК 537(076.5)+621.3.083(076.5)
ББК 22.33я7+31.264я7
Л12

Лабораторный практикум курса общей физики. Разделы «Колебания и волны», «Молекулярная физика»: Учебное пособие / Под ред. В.А. Шилова. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. 200 с.

Авторы: И.В. Белова (работа 2.4), Н.С. Воронова (работа 2.6), В.И. Гервидс (работы 2.2, 2.13, 2.14), Н.А. Иванова (работа 2.1), С.С. Муравьев-Смирнов (работа 2.18), А.А. Плясов (работы 2.17, 2.19), А.И. Романов (работа 2.5), Н.Б. Сперанская (работы 2.11, 2.12), А.Н. Тюлюсов (работа 2.3), Е.В. Хангулян (работы 2.9, 2.10), В.А. Шилов (работы 2.7, 2.8, 2.12, 2.15), О.В. Щербачёв (работа 2.16).

Дано описание 19 новых лабораторных работ по курсу «Колебания, волны, основы статистической термодинамики» для студентов 1-го курса (2-го семестра) факультетов «А», «Е», «КиБ», «Т», «Ф» НИЯУ МИФИ, выполняемых на установках фирмы РНУВЕ.

Подготовлено в рамках Программы создания и развития НИЯУ МИФИ.

Рецензент проф. Ю.А. Коровин (ИАТЭ НИЯУ МИФИ)

ISBN 978-5-7262-1663-8

© Национальный исследовательский
ядерный университет «МИФИ», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Методические указания	4
Работа 2.1. Изучение гармонических колебаний спиральных пружин при параллельном и последовательном соединениях	5
Работа 2.2. Изучение колебаний с помощью маятника Поля.....	20
Работа 2.3. Колебания струн	33
Работа 2.4. Определение скорости ультразвука в воздухе и отношения C_p/C_v методом стоячих волн.....	42
Работа 2.5. Измерение скорости звука в воздухе с использованием установки «Кобра 3»	50
Работа 2.6. Уравнение состояния идеального газа с использованием установки «Кобра 3»	58
Работа 2.7. Определение теплоемкости воздуха при постоянном объеме	70
Работа 2.8. Измерение теплоемкости металлов с использованием установки «Кобра 3»	79
Работа 2.9. Изучение распределения молекул газа по скоростям.....	93
Работа 2.10. Барометрическая формула. Распределение Больцмана	106
Работа 2.11. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца	116
Работа 2.12. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца с применением установки «Кобра 3» ..	129
Работа 2.13. Изучение зависимости давления насыщенных паров жидкости от температуры и определение теплоты парообразования	140
Работа 2.14. Изучение зависимости давления насыщенных паров жидкости от температуры и определение теплоты парообразования при высоких температурах	149
Работа 2.15. Эффект Джоуля–Томсона	154
Работа 2.16. Определение термического коэффициента линейного расширения твердых тел с помощью дилатометра	164
Работа 2.17. Определение удельной теплоемкости металлов методом вращающихся цилиндров	170
Работа 2.18. Коллектор солнечной энергии	182
Работа 2.19. Изучение теплопроводности неметаллических материалов	189

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Работа в лаборатории требует от студента тщательной подготовки, поэтому, кроме описания работы, рекомендуется ознакомиться с явлением, которое предстоит экспериментально наблюдать и исследовать, по литературе, список которой приводится в описаниях работ.

К работе в лаборатории допускаются только подготовленные студенты. При подготовке к лабораторной работе студент обязан внести в лабораторный журнал:

- название работы и ее номер;
- принципиальную и рабочую схему установки;
- таблицы, расчетные формулы и формулы для расчета погрешностей.

При выполнении задания студент должен быть сосредоточен, внимателен и осторожен при работе с установками или отдельными их деталями. Он должен руководствоваться правилами техники безопасности и мерами предосторожности, указанными в описаниях. Выполнение задания требует от студента отчетливого представления о тех действиях, которые необходимо произвести при работе с установками, причем в том порядке, который рекомендуется в описаниях.

В процессе измерений следует систематически и аккуратно записывать результаты в лабораторный журнал. Отсчеты, как правило, заносятся в таблицы, форма которых приведена в описаниях работ. Все факторы, способные оказать влияние на точность измерений, должны быть записаны. В тех случаях, когда это рекомендуется, графические построения необходимо производить в процессе работы.

Выполнение работы заканчивается составлением краткого отчета, в котором следует указать:

- 1) что и каким методом исследовалось или определялось;
- 2) какой результат и с какими погрешностями (абсолютными и относительными) был получен;
- 3) краткое обсуждение полученных результатов (соответствуют ли полученные результаты теоретическим предсказаниям или табличным данным, если нет, то какова возможная причина этого несоответствия и т.п.);
- 4) анализ погрешностей (указать, каков характер погрешностей результатов – приборный или случайный, какие из непосредственно измеряемых величин вносят наибольший вклад в погрешность результата).

Заключение обычно занимает около половины страницы лабораторного журнала.

Работа 2.1

ИЗУЧЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ СПИРАЛЬНЫХ ПРУЖИН ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИЯХ

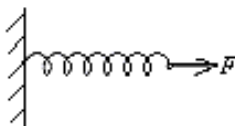
Цель: изучение гармонических колебаний, определение коэффициента жесткости пружины при параллельном и последовательном соединениях.

Оборудование: установка для изучения гармонических колебаний; спиральные пружины; набор разновесов.

ВВЕДЕНИЕ

Всякое реальное тело под действием приложенных к нему сил деформируется, т.е. изменяет свои размеры и форму. Если после прекращения действия сил тело принимает первоначальные размеры и форму, деформация называется *упругой*. Упругие деформации наблюдаются в том случае, если сила, обусловившая деформацию, не превосходит некоторый, определенный для каждого конкретного материала предел (предел упругости), после которого деформацию называют *пластической*.

Рис. 2.1.1



Возьмем пружину, имеющую в недеформированном состоянии длину l_0 , один конец которой закрепим. К другому концу приложим силу F (рис. 2.1.1). Под действием этой силы пружина растянется на некоторую величину Δl , после чего наступит равновесие. В состоянии равновесия внешняя сила F будет уравновешена упругими силами, возникшими в пружине в результате деформации. Опыт показывает, что при небольших деформациях удлинение

пружины Δl оказывается пропорциональным растягивающей силе: $\Delta l \sim F$. Соответственно, упругая сила оказывается пропорциональной удлинению пружины:

$$F = \kappa \Delta l .$$

Коэффициент пропорциональности κ называется *коэффициентом жесткости пружины*, или просто *жесткостью пружины*, и имеет размерность [Н/м].

Пусть грузик массой m , подвешенный на невесомой пружине жесткости κ , совершает вертикальные колебания. Возьмем начало O оси X в положении равновесия, где сила mg уравнивается упругой силой:

$$mg = \kappa \Delta l , \quad (2.1.1)$$

где Δl – модуль удлинения пружины. Тогда при смещении грузика в положение, характеризуемое координатой x , основное уравнение динамики примет следующий вид:

$$m\ddot{x} = mg - \kappa(\Delta l + x) . \quad (2.1.2)$$

Учтя условие (2.1.1), получим, что

$$m\ddot{x} = -\kappa x . \quad (2.1.3)$$

Введя обозначение

$$\omega_0^2 = \frac{\kappa}{m} , \quad (2.1.4)$$

преобразуем уравнение (2.1.3) следующим образом:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0 . \quad (2.1.5)$$

Это дифференциальное уравнение называют *уравнением гармонического осциллятора*.

Гармоническими называют колебания, в которых смещение из положения равновесия изменяется со временем t по закону:

$$x = a \cos(\omega_0 t + \alpha) , \quad (2.1.6)$$

где a – амплитуда; $(\omega_0 t + \alpha)$ – фаза; α – начальная фаза; ω_0 – циклическая (круговая) частота колебаний. Эта частота связана с периодом T и линейной частотой ν как

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu , \quad (2.1.7)$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\kappa}}. \quad (2.1.8)$$

Решение дифференциального уравнения (2.1.5) содержит две произвольные постоянные: a и α . Для каждого конкретного колебания они определяются начальными условиями – смещением x_0 и скоростью \dot{x}_0 в фиксированный момент времени t_0 .

Рассмотрим систему из двух пружин. Тогда возможны два типа их соединения: параллельный и последовательный. Такую систему можно рассматривать как новую пружину, обладающую своим коэффициентом жесткости. Найдем связь эквивалентного коэффициента жесткости пружины с жесткостями пружин κ_1 и κ_2 .

При *параллельном* соединении силы отдельно взятых пружин в сумме равны общей силе:

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 = -(\kappa_1 + \kappa_2)s, \\ \kappa_{\text{экв}} &= \kappa_1 + \kappa_2. \end{aligned} \quad (2.1.9)$$

Таким образом, общая жесткость пружины $\kappa_{\text{экв}}$ равна сумме жесткостей отдельно взятых пружин κ_1 и κ_2 .

При *последовательном* соединении пружин растяжения s_1 и s_2 в сумме равны общему растяжению s . Действующая сила F для обеих пружин одинакова:

$$\begin{aligned} F &= -\kappa_1 s_1 \Rightarrow s_1 = -\frac{F}{\kappa_1}, \\ F &= -\kappa_2 s_2 \Rightarrow s_2 = -\frac{F}{\kappa_2}, \end{aligned}$$

при $s = s_1 + s_2$

$$s = -\left(\frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2}\right)F.$$

Следовательно, $F = -\frac{1}{\kappa_1^{-1} + \kappa_2^{-1}}s$, тогда $\kappa_{\text{экв}} = \frac{1}{\kappa_1^{-1} + \kappa_2^{-1}}$. Или

$$\frac{1}{\kappa_{\text{экв}}} = \frac{1}{\kappa_1} + \frac{1}{\kappa_2}.$$

Таким образом, при последовательном соединении обратное значение общей жесткости пружины равно сумме обратных значений жесткостей отдельных пружин:

$$\kappa_{\text{эКВ}} = \frac{\kappa_1 \kappa_2}{\kappa_1 + \kappa_2} . \quad (2.1.10)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Схема установки для изучения гармонических колебаний спиральных пружин представлена на рис. 2.1.2. Установка состоит из стержня 3 на штативе, на котором укреплен держатель 7 для пружины 6 (на рисунке изображена большая пружина) с нитью, к которой подвешиваются грузы 4. Нить проходит через блок, вращение которого регистрируется с помощью светового барьера 5. На блоке нанесены прорезы, прохождение которых через световой луч регистрируется фотозлементом. Световой барьер подключен к универсальной установке «Кобра 3» 2, которая соединена с ПК с помощью шины USB. Крепления светового барьера позволяют регулировать его положение по высоте. В комплекте также имеется малая пружина 1.

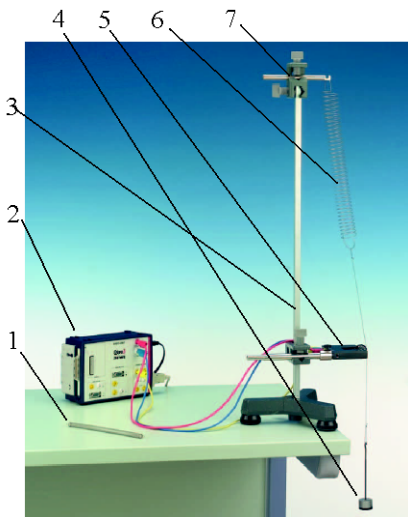


Рис. 2.1.2

Внимание! Строго воспрещается запускать на ПК программное обеспечение, кроме рекомендованного в описании работы, и подключать без разрешения преподавателя носители информации к ПК.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Необходимо соблюдать все правила техники безопасности, с которыми студент ознакомлен на вводной беседе.
2. Не вынимайте провода, не прикасайтесь к шине заземления.
3. Прежде чем включить питание схемы, необходимо проверить правильность ее монтажа, правильность начальных положений различных регулировок, а также подготовиться к проведению измерений. Не оставлять установку включенной без присмотра.


ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Определение коэффициента жесткости различных пружин

1. Подвесьте большую пружину и закрепите на ее конце нить. С другого конца нити расположите держатель для грузов. Пропустите нить через блок на световом барьере и отрегулируйте установку так, чтобы нить проходила по желобку блока, а подвешенный к ней держатель для гирь (с дополнительными гирями) висел свободно.

На держатель для грузов подвесьте гири.

Внимание! Нить свисает не вертикально, а под углом, это позволяет проходить нити в блоке и не соскальзывать.

2. Измерьте период колебаний T исследуемых пружин от массы нагрузки. Для этого запустите программу  **measure**, которая находится на рабочем столе. Выберите в меню «Прибор» пункт «Кобра 3 Перемещение/Вращение», после чего появится экран настроек (рис. 2.1.3).

В появившемся окне настроек выберите опции, как показано на рисунке. Нажмите кнопку «Далее».

На экране появится панель для измерений (рис. 2.1.4).

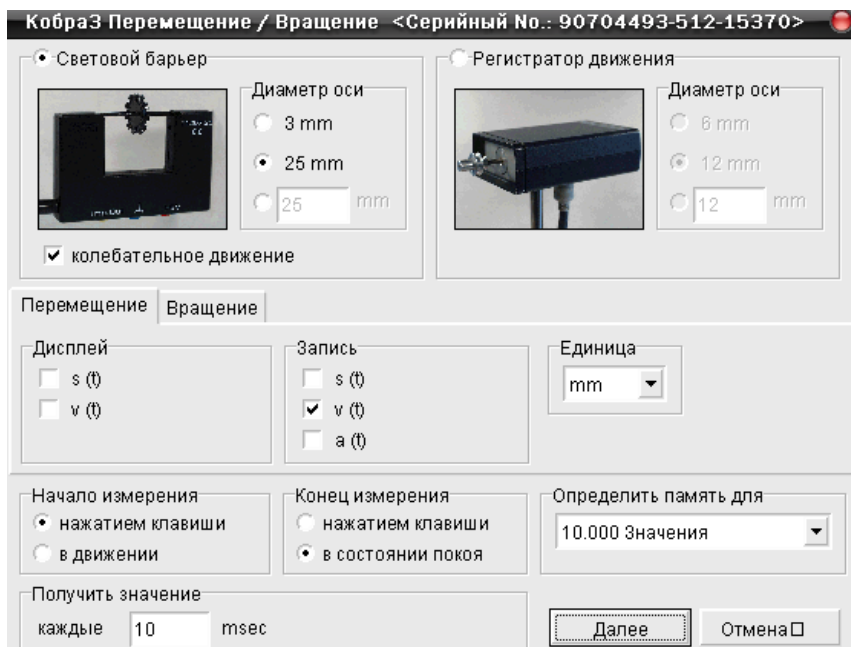


Рис. 2.1.3

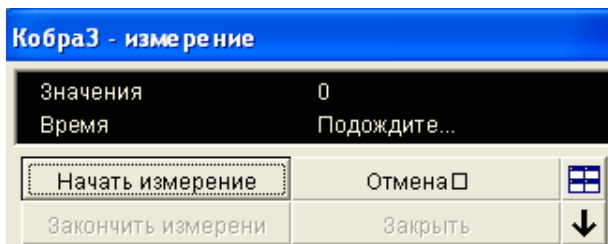


Рис. 2.1.4

Осторожно потяните нить, взявшись выше ролика и отпустите ее. Выждав 2–3 периода, запустите измерения. Для этого нажмите кнопку «Начать измерение».

Через несколько секунд измерение остановится и на экране появится изображение в виде графика.

При малых амплитудах могут возникнуть деформации сигнала и колебания могут выйти на ангармонизм. Поэтому повторяя несколько раз измерения с различными амплитудами, добейтесь хорошего вида графика.

3. Выберите в меню «Анализ» пункт «Сгладить», после чего в появившемся окне установите параметры сглаживания в соответствии с рис. 2.1.5.

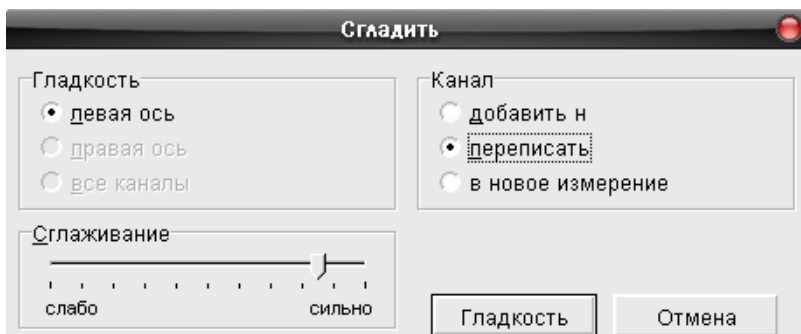


Рис. 2.1.5

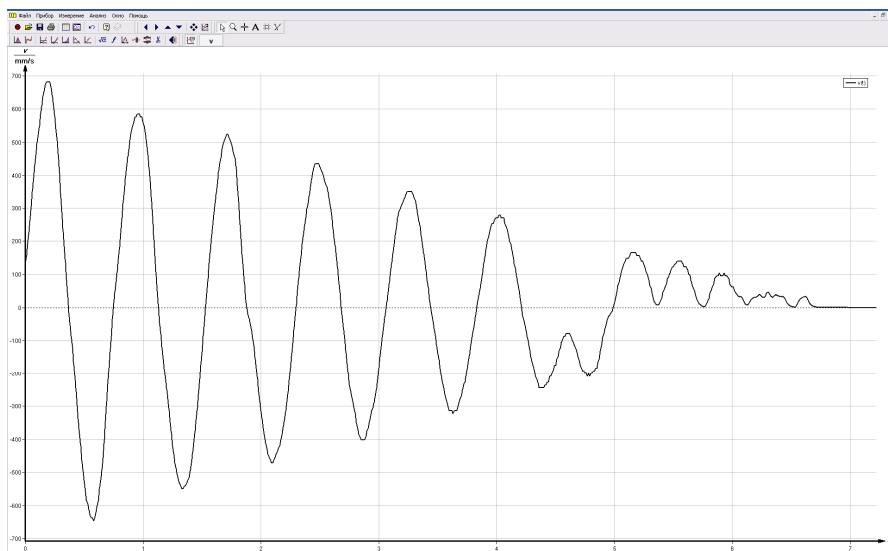


Рис. 2.1.6

Нажмите кнопку «Гладкость». На экране появится сглаженный график зависимости (рис. 2.1.6).

4. Выберите в меню «Анализ» пункт «Анализ кривой». В появившемся окне установите значения параметров согласно рис. 2.1.7.

вид	t[s]	v[mm/s]
минимум	0,280	-715,126
максимум	0,570	690,324
минимум	0,860	-661,388
максимум	1,150	636,586
минимум	1,430	-593,871
максимум	1,730	582,848
минимум	2,020	-566,313
максимум	2,310	533,244
минимум	2,600	-520,843
максимум	2,900	500,175
минимум	3,180	-475,373
максимум	3,480	456,082
минимум	3,770	-434,036
максимум	4,060	409,234

☒ Отобразить результат

Рис. 2.1.7

Нажмите кнопку «Рассчитать», затем – «Заккрыть». На кривой точки максимумов и минимумов будут отмечены стрелочками, около которых указаны значения (см. рис. 2.1.7). Для первых 5–6 хорошо различимых периодов запишите координаты максимумов и минимумов в заранее заготовленную табл. 2.1.1.

Если количество различимых периодов меньше пяти, то повторите измерения более тщательно (см. п. 2).

5. Добавьте грузик и повторите вышеописанную процедуру измерения для 6–8 различных масс в интервале от 260 до 380 г.

В начале каждого эксперимента регулируйте высоту светового барьера таким образом, чтобы он находился примерно посередине между концом пружины и крючком держателя для гирь.

6. Аналогичные измерения проведите для маленькой пружины, подвешивая к ней гири с массой в интервале от 20 до 120 г, не допуская чрезмерного растяжения пружины. Результаты измерений занесите в заранее подготовленную таблицу (по образцу табл. 2.1.1).

Таблица 2.1.1

m , г	t_{\max}	t_{\min}	$T_{t_{\max}}$, с	$T_{t_{\min}}$, с	$\langle T \rangle$, с	ΔT , с
...

Задание 2. Определение коэффициента жесткости пружин при параллельном и последовательном соединениях

1. Соберите экспериментальную установку, как показано на рис. 2.1.8 (и 2.1.9) для пружин, соединенных параллельно (и последовательно).

2. Аналогично заданию 1 выполните измерения для одной массы $m = 360$ г для параллельного соединения и $m = 60$ г для последовательного соединения. Результаты измерений занесите в заранее подготовленную таблицу (по образцу табл. 2.1.1, в которой оставлено только одно значение m).

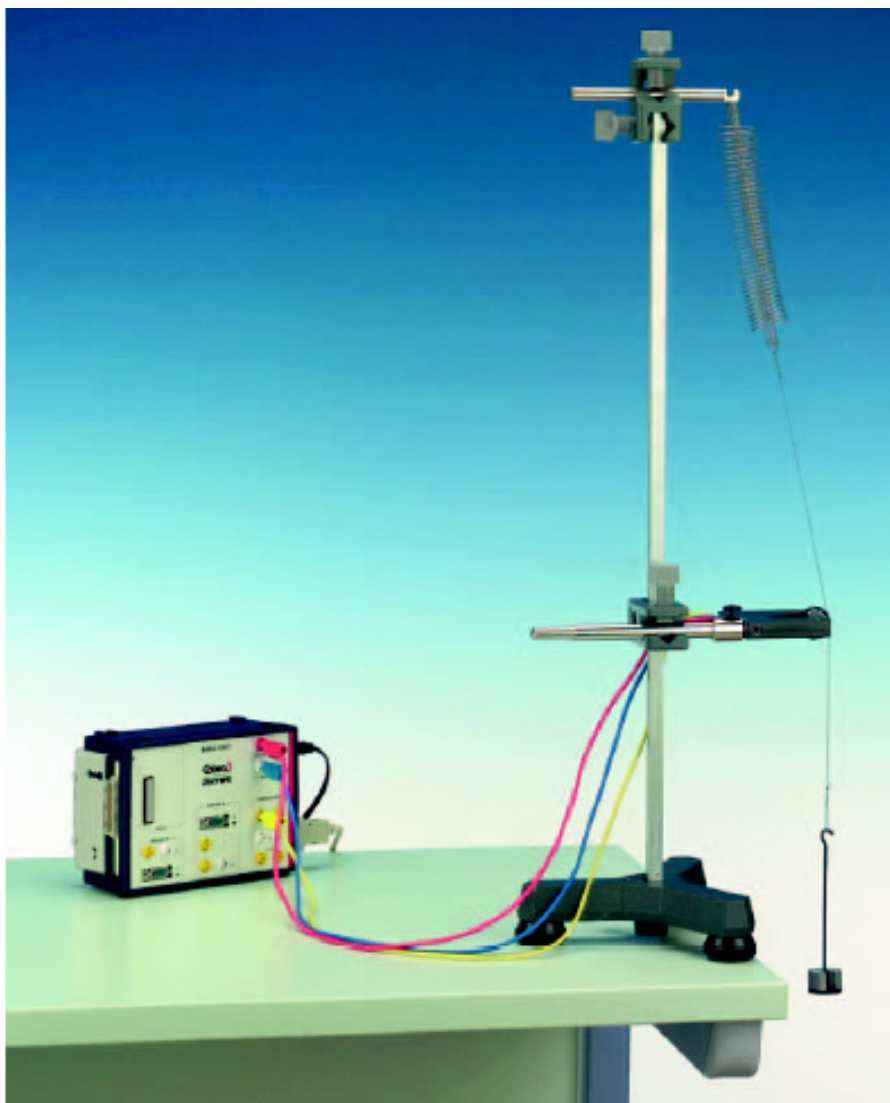


Рис. 2.1.8

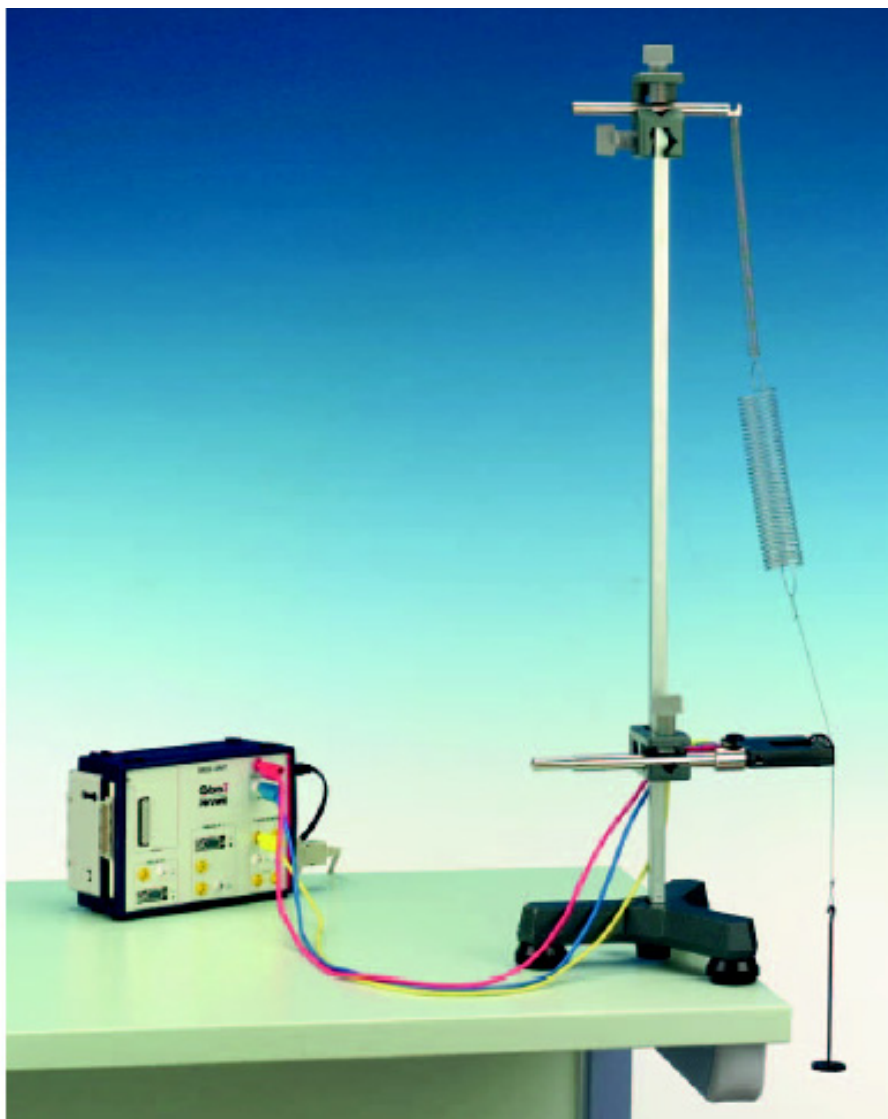


Рис. 2.1.9

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

1. По полученным экспериментальным данным для каждой серии измерений рассчитайте периоды колебаний пружины $T_{t_{\max}}$ и $T_{t_{\min}}$ между максимумами и минимумами, найдите среднее значение $\langle T \rangle$ по формуле

$$\langle T \rangle = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}, \quad (2.1.11)$$

где T_{\max} , T_{\min} – максимальное и минимальное значение периода колебаний пружины в серии измерений при одной массе нагрузки.

Значение погрешности измерения периода ΔT оцените методом Корнфельда по формуле

$$\Delta T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{2}. \quad (2.1.12)$$

Результаты вычислений занесите в табл. 2.1.1.

2. Рассчитайте \sqrt{m} и погрешность $\Delta\sqrt{m}$ по нижеприведенной формуле

$$\Delta\sqrt{m} = \frac{\Delta m}{2\sqrt{m}}, \quad (2.1.13)$$

и результаты вычислений занесите в табл. 2.1.2.

Таблица 2.1.2

m , кг	$\langle T \rangle$, с	ΔT , с	\sqrt{m} , $\sqrt{\text{кг}}$	$\frac{\Delta m}{2\sqrt{m}}$, $\sqrt{\text{кг}}$
...

По данным табл. 2.1.2 постройте на листе миллиметровой бумаги график зависимости периода T колебаний от \sqrt{m} .

При условии выполнения закона Гука график должен представлять собой линейную зависимость.

3. Методом парных точек определите коэффициент наклона k этой прямой. Погрешность углового коэффициента оцените по методу Корнфельда:

$$\Delta k = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2}, \quad (2.1.14)$$

где k_{\max} , k_{\min} – максимальное и минимальное значения k , полученные методом парных точек.

4. По формуле

$$\kappa = \frac{4\pi^2}{k^2}, \quad (2.1.15)$$

следующей из выражения (2.1.8), определите коэффициенты жесткости различных пружин и оцените их погрешность по формуле

$$\Delta \kappa = \frac{8\pi^2}{k^3} \Delta k. \quad (2.1.16)$$

5. По экспериментальным данным рассчитайте коэффициент жесткости соединенных параллельно (и последовательно) пружин по формуле

$$\kappa = \frac{4\pi^2 m}{T^2}. \quad (2.1.17)$$

Оцените относительную погрешность результата по формуле

$$\varepsilon_{\kappa} \equiv \frac{\Delta \kappa}{\kappa} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta T}{T}\right)^2}. \quad (2.1.18)$$

Найдите абсолютную погрешность результатов по формуле

$$\Delta \kappa = \kappa \varepsilon_{\kappa}. \quad (2.1.19)$$

6. Пользуясь формулами (2.1.9) и (2.1.10), вычислите теоретические значения коэффициента жесткости пружин при параллельном и последовательном соединениях, где κ_1 и κ_2 взять из задания 1, и оцените относительные и абсолютные погрешности теоретических значений по формулам

$$\Delta \kappa_{\text{парал}} = \sqrt{(\Delta \kappa_1)^2 + (\Delta \kappa_2)^2}, \quad (2.1.20)$$

$$\Delta\kappa_{\text{послед}} = \kappa_{\text{послед}}^2 \sqrt{\left(\frac{\Delta\kappa_1}{\kappa_1^2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\kappa_2}{\kappa_2^2}\right)^2}. \quad (2.1.21)$$

По результатам вычислений заполните табл. 2.1.3.

Таблица 2.1.3

Виды пружин	$\kappa_{\text{измеренное}}, \text{ Н/м}$	$\kappa_{\text{вычисленное}}, \text{ Н/м}$
Пружина 1		—
Пружина 2		—
Последовательное соединение: 1+2		
Параллельное соединение: 1+2		

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. По результатам измерений для двух различных пружин постройте графики зависимости периода T колебаний от \sqrt{m} . По виду графиков сделайте вывод о соответствии их закону Гука.

2. Сравните экспериментально найденные значения коэффициентов жесткости пружин при параллельном и последовательном соединениях с результатами вычислений по теоретическим формулам. Сделайте соответствующее заключение.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулируйте закон Гука.
2. Как должен выглядеть экспериментальный график зависимости растяжения пружины от величины нагрузки при условии выполнения закона Гука?
3. В каких случаях может нарушаться закон Гука?
4. Какие колебания являются гармоническими?
5. Можно ли считать колебания гармоническими, если не выполняется закон Гука?
6. Чему равен коэффициент жесткости пружин, соединенных параллельно?

7. Чему равен коэффициент жесткости пружин, соединенных последовательно?

8. Чему равно значение амплитуды при начальных условиях $x_0 = 0$, $v_0 = 0$?

9. Чем отличается упругая деформация от пластической?

10. Запишите $v(t)$ в случае гармонических колебаний.

11. В какие моменты времени достигается x_{\min} , x_{\max} ?

12. Некоторая величина $x = 1,74 \pm 0,03$. Чему равна величина: $y = \ln x$?

13. Две пружины подвешены одинаково параллельно с коэффициентами жесткости κ_1 и κ_2 . К ним последовательно подвешена пружина с коэффициентом жесткости κ_3 . Чему равна суммарная жесткость пружины $\kappa_{\text{экв}}$?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. М.: Астрель, 2003.

2. Иродов И.Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2005.

3. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. М.: Наука, 1986.

Дополнительная

1. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика. Т. 1. М.: Наука, 1983.

2. Фейнман Р., Лейтон Р., Сендс М. Фейнмановские лекции по физике. Т. 2. М.: Мир, 1978.

3. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.Н. Л.И. Мандельштам и современная теория нелинейных колебаний и волн // Успехи физических наук. 1979. Т. 128. Вып. 4. С. 579–622.

Работа 2.2

ИЗУЧЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ПОЛЯ

Цель: наблюдение свободных затухающих и вынужденных крутильных колебаний механической системы – маятника Поля; экспериментальное определение основных характеристик этих колебаний (частоты свободных затухающих колебаний, коэффициента затухания, зависимости амплитуды установившихся вынужденных колебаний от частоты, сдвига по фазе установившегося вынужденного колебания).

Оборудование: крутильный маятник со спиральной пружиной; электрический блок питания; электродвигатель с червячной передачей, эксцентриком и шатуном; мостовая выпрямительная схема; амперметр; электронный секундомер.

ВВЕДЕНИЕ

Свободные колебания системы, в которой, кроме упругой (в общем случае – квазиупругой) силы, действуют силы трения, с течением времени затухают. В механических системах при наличии смазки сила трения, как правило, пропорциональна скорости относительного движения трущихся деталей («жидкое трение»). Отметим, что сюда же относятся колебания, например, в электрических цепях (LCR -контур), где роль «силы жидкого трения» играет напряжение U на активном сопротивлении ($U = R \cdot I$), пропорциональное «скорости» – силе тока I – через сопротивление R . Можно привести другие примеры: движение маятника (или тела на пружине) в жидкой или газообразной среде и т.п.

Если сила трения пропорциональна скорости, то амплитуда колебаний экспоненциально убывает во времени, так что зависимость координаты x системы от времени t имеет вид

$$x(t) = a_0 e^{-\beta t} \cos(\omega' t + \alpha), \quad (2.2.1)$$

где $a(t) = a_0 e^{-\beta t}$ – амплитуда колебаний в момент времени t ($a_0 = a(0)$); β – коэффициент затухания; α – начальная фаза колебания; ω' – частота свободных затухающих колебаний системы, связанная с ее собственной частотой ω_0 (частотой колебаний в отсутствие трения) соотношением

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}. \quad (2.2.2)$$

Формулы (2.2.1) и (2.2.2) предполагают, что $\omega_0 > \beta$. Если силы трения столь велики, что $\beta \geq \omega_0$, система не способна совершать колебания, ее движение носит аperiодический характер. При малом затухании, когда $\beta \ll \omega_0$ и $\omega' \approx \omega$, связь (2.2.2) между частотой и коэффициентом затухания может быть переписана в виде

$$\frac{\omega_0 - \omega'}{\omega'} \approx \frac{\beta^2}{2\omega'^2} \approx \frac{\beta^2}{2\omega^2}. \quad (2.2.3)$$

Колебания вида (2.2.1) не являются гармоническими, так как их амплитуда ($a(t) = a_0 e^{-\beta t}$) зависит от времени. Для создания незатухающих гармонических колебаний в системе с трением требуется подвод энергии извне для компенсации ее потерь за счет трения. Это можно осуществить, действуя на систему гармонической внешней – вынуждающей – силой

$$F_x = F_0 \cdot \cos(\omega t), \quad (2.2.4)$$

где F_0 – амплитуда и ω – частота вынуждающей силы.

Движение системы под действием вынуждающей силы (2.2.4) является суперпозицией свободного затухающего колебания вида (2.2.1) и установившегося (вынужденного) гармонического колебания

$$x_{\text{уст. вын}} = a(\omega) \cdot \cos(\omega t - \varphi(\omega)), \quad (2.2.5)$$

где $a(\omega)$ – амплитуда; $\varphi(\omega)$ – отставание по фазе установившегося вынужденного колебания от вынуждающей силы. Если колебания линейны, например тело массой m , подвешенное на пружинке, то зависимость амплитуды $a(\omega)$ и сдвига по фазе $\varphi(\omega)$ от частоты описывается следующими формулами:

$$a(\omega) = \frac{F_0 / m}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}; \quad (2.2.6)$$

$$\operatorname{tg}(\varphi(\omega)) = \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}. \quad (2.2.7)$$

При крутильных колебаниях (например, в данной работе исследуются именно крутильные колебания маятника Поля) роль амплитуды вынуждающей силы играет амплитуда момента этой силы, а роль массы, соответственно, момент инерции тела совершающего крутильные колебания. При переходе от линейных (совершаемых вдоль некоторой прямой) колебаний к крутильным (вращательное движение) структура формул (2.2.6) и (2.2.7) не меняется, зависимость от частоты амплитуды и сдвига по фазе остается прежней.

Зависимости a и φ от ω для трех различных значений β (см. второй аргумент функций у левой вертикальной оси) показаны на рис. 2.2.1 и 2.2.2. Отметим, что показанные на рисунках кривые – результат расчета, так что масштаб и форма кривых полностью соблюдены.

На рис. 2.2.1 первый аргумент амплитуды $a(\Omega, B, F_{\max})$: $\Omega = \omega/\omega_0$ – частота вынуждающей силы в единицах собственной частоты ω_0 ; второй аргумент: $B = \beta/\omega_0$ – коэффициент затухания в тех же единицах; третий аргумент: $F_{\max} = F_0/(m\omega_0^2)$ – приведенная амплитуда вынуждающей силы (момента сил для крутильных колебаний).

На рис. 2.2.2 даны зависимости сдвига (деленного для наглядности на π) по фазе φ установившегося вынужденного колебания от вынуждающей силы при различных значениях коэффициента затухания. Остальные обозначения на рисунке такие же, как и на рис. 2.2.1.

Продифференцировав (2.2.6) по частоте и приравняв производную нулю, легко показать, что амплитуда установившегося вынужденного колебания $a(\omega)$ достигает максимального значения при

равенстве частоты вынуждающей силы ω резонансной частоте системы β

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega'^2 - \beta^2} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}. \quad (2.2.8)$$

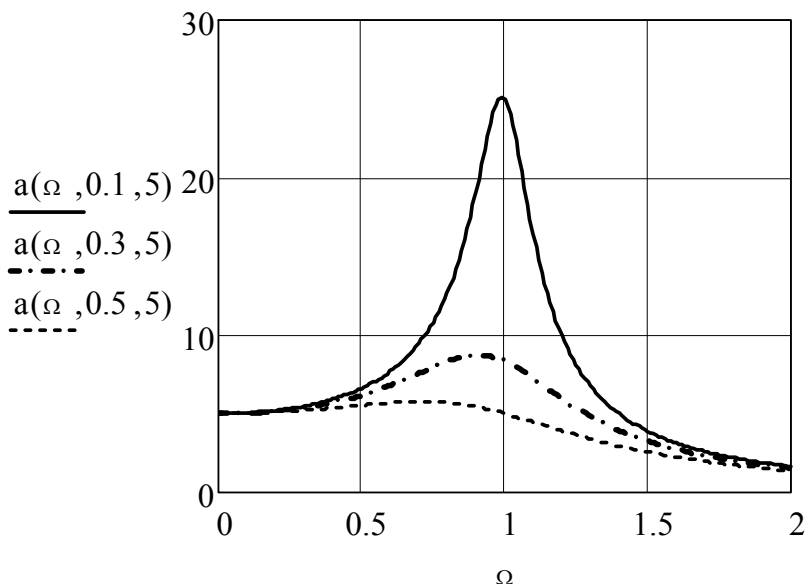


Рис. 2.2.1

Отметим еще раз, что при $\beta \ll \omega$ как резонансная частота, так и частота свободных затухающих колебаний, обе приближенно равны собственной частоте системы (см. также (2.2.3)):

$$\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0 \left(1 - \beta^2 / \omega_0^2\right), \quad \omega' \approx \omega_0 \left(1 - \beta^2 / (2\omega_0^2)\right).$$

Явление, состоящее в резком увеличении амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к строго определенному для каждой физической системы (резонансному) значению $\left(\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}\right)$, называется *резонансом*.

Видно, что резонансная частота меньше собственной, собственной частоте на оси абсцисс соответствует единица.

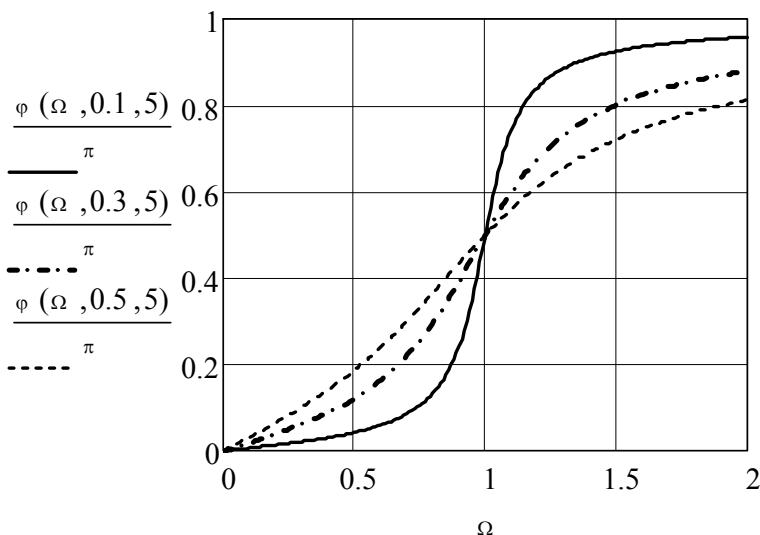


Рис. 2.2.2

Как видно из рис. 2.2.1 (верхняя сплошная кривая), при малом затухании ($\beta \ll \omega_0$) амплитуда в момент резонанса

$$a_{\text{рез}} \equiv a(\omega_{\text{рез}}) \approx F_0 / (2m\beta) \propto 1/\beta$$

может достигать весьма большой величины. В некоторых случаях резонансное возрастание амплитуды колебаний способно привести к разрушению колеблющейся системы (мост, ротор турбины и т.п.).

Как видно из формулы (2.2.7) (см. также рис. 2.2.2), при малых частотах вынуждающей силы ($\beta\omega \ll \omega_0^2$) система колеблется синфазно ($\varphi \ll 1$) с вынуждающей силой, при больших частотах ($\omega \gg \omega_0$) колебания совершаются в противофазе ($\varphi \approx \pi$); при $\omega = \omega_0$ точно. В окрестности резонанса ($\omega \approx \omega_{\text{рез}}$), если, кроме того, мало затухание ($\beta \ll \omega_0$), то $\varphi \approx \pi/2$ приближенно.

Отметим, что колебание вида (2.2.5) называют *установившимся*, так как система колеблется по этому закону лишь по прошествии достаточно большого времени, а именно: $t \gg 1/\beta$, от момента

включения вынуждающей силы, когда амплитуда свободного затухающего колебания уже пренебрежимо мала по сравнению с амплитудой установившегося колебания, т.е. выполняется неравенство: $a_0 \exp(-\beta t) \ll a(\omega)$. При временах $t \leq 1/\beta$ идет процесс установления колебаний, в течение которого амплитуда постепенно (вовсе необязательно монотонно) приближается к значению $a(\omega)$.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В данной работе исследование механических колебаний производится с помощью маятника Поля. Установка показана на рис. 2.2.3.

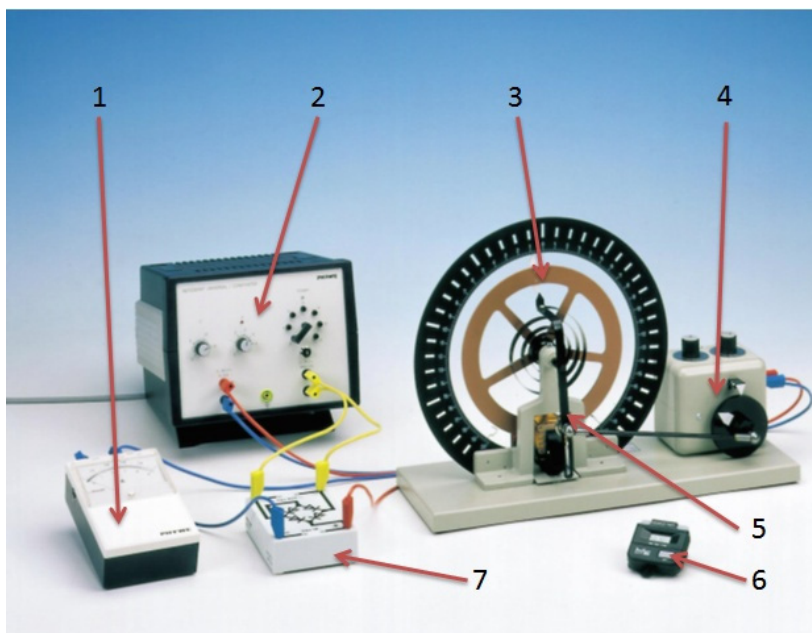


Рис. 2.2.3

Маятник Поля представляет собой металлический диск 3, совершающий крутильные колебания вокруг горизонтальной оси под действием спиральной пружины. Одним концом пружина жестко

соединена с диском маятника, другим – с рычагом 5, колеблющимся вокруг той же горизонтальной оси. Периодическое воздействие на диск передается от вала мотора 4 с помощью системы, состоящей из червячной передачи и эксцентрика (с белой стрелкой – виден на рисунке), шатуна, рычага и пружины. На рис. 2.2.3 также показаны входящие в комплект установки: 1 – амперметр; 6 – электронный секундомер; 7 – мостовая выпрямительная схема и 2 – блок питания.

Изменяя выходное напряжение блока питания, можно варьировать скорость вращения вала электромотора и, следовательно, частоту вынуждающей силы, действующей на маятник. Затухание колебаний маятника обусловлено трением в оси и взаимодействием вихревых токов в диске с магнитным полем электромагнита, между полюсами которого движется диск. Реостат, включенный в цепь электромагнита, дает возможность регулировать силу тока в обмотках электромагнита и тем самым изменять затухание колебаний диска. Диск маятника снабжен указателем, амплитуда колебаний диска отсчитывается по шкале лимба Л.

ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Определение частоты свободных затухающих колебаний

При выключенном электромоторе в отсутствие тока через электромагнит измерить t_n – продолжительность $n \geq 10$ полных колебаний маятника. Для надежности повторить измерения не менее трех раз. По формулам

$$T = t_n / n, \quad \omega' = 2\pi / T; \quad (2.2.9a)$$

$$\delta T = \Delta T / T = \Delta t_n / t_n, \quad \delta \omega' = \delta T \quad (2.2.9б)$$

рассчитать период T , частоту ω' свободных затухающих колебаний и их относительные δT , $\delta \omega'$ и абсолютные ΔT , $\Delta \omega'$ погрешности. При этом погрешность Δt_n измерения продолжительности n колебаний принять равной 0,1 с в том случае, если цена деления секундомера меньше этой величины, и равной цене деления секундомера, если она больше этой величины (0,1 с). Такой выбор соответствует характерному времени реакции человека как раз и равному, в

среднем, 0,1 с. Присутствие во многих сотовых телефонах секундомеров с ценой деления в одну тысячную долю секунды, учитывая тот факт, что запускает и останавливает эти секундомеры человек нажатием пальцем на кнопку, необходимо признать не более чем «маркетинговой» акцией.

Задание 2. Определение коэффициента затухания

Для определения β удобнее экспериментально получить зависимость амплитуды не от времени, а от числа прошедших колебаний. Пусть a_0 – начальное отклонение маятника, a_m – амплитуда через m периодов ($m = 0, 1, 2, \dots$). Тогда, как видно из формулы (2.2.1),

$$a_m = a_0 e^{-m\lambda}, \quad (2.2.10)$$

где $\lambda = \beta T$ – логарифмический декремент затухания.

Для сокращения времени измерений рекомендуем поступить следующим образом.

Измерение зависимости амплитуды от числа колебаний предлагаем выполнить следующим образом.

Убедитесь в том, что на «тормозящий» электромагнит не подано электрическое напряжение от источника питания. При этом переключатель переключения напряжения (в правой части лицевой панели источника) одним своим концом должна находиться в центральном гнезде переключателя, второй конец должен свободно висеть. Если второй конец переключателя вставлен в одно из гнезд, расположенных по окружности, двумя пальцами слегка потяните переключатель на себя, чтобы извлечь периферийный конец переключателя из гнезда. После этого отпустите переключатель.

Рукой поверните маятник по часовой стрелке на максимальный угол (190 делений по лимбу) и без толчка отпустите. Глядя на маятник, измерьте угол отклонения по прошествии одного колебания (в делениях шкалы) и запишите его значение в колонку I первой строки табл. 2.2.1. Остановите колебания маятника. Повторите описанное измерение еще два раза, результаты запишите в колонки II и III соответственно.

Снова поверните диск маятника на 190 делений и троекратно измерьте его отклонение после двух колебаний. Результаты запишите в ячейки второй строки табл. 2.2.1.

Подобным образом измерьте и запишите амплитудные отклонения маятника после 3, 4 и т.д. (до 10) колебаний маятника.

С помощью переключки подайте на электромагнит напряжение $U_{\text{маг}} = 4 \text{ В}$ и измерьте зависимость амплитуды колебания от числа колебаний при этом напряжении, как это описано выше. Результаты запишите в таблицу, построенную аналогично табл. 2.2.1.

То же самое сделайте при напряжении на электромагните $U_{\text{маг}} = 8 \text{ В}$ и результаты запишите в новую таблицу, построенную аналогично табл. 2.2.1.

Таблица 2.2.1

№ п/п	$U_{\text{маг}} = \dots$				
	a_m			$\langle a_m \rangle$	$\ln \langle a_m \rangle$
	I	II	III		
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Задание 3. Снятие резонансных кривых

Экспериментальное определение зависимости $a(\omega)$ провести два раза: в отсутствие тока через электромагнит и при напряжении на электромагните, равном $U_{\text{маг}} = 8 \text{ В}$.

С помощью переключки отключите напряжение питания от электромагнита. Верхний (левый) регулятор на кожухе электромотора 4 установите в положение 40.

Установите напряжение питания электродвигателя $U_{\text{двиг}} = 7 \text{ В}$ (по шкале левого регулятора на панели источника питания 2 (см. рис. 2.2.3)), запишите это значение в первую колонку первой строки табл. 2.2.2. Рычаг 5, создающий вынуждающую силу, начнет

двигаться. С помощью секундомера измерьте время пяти колебаний рычага t_5 , запишите в таблицу.

Таблица 2.2.2

$U_{\text{маг}} = \dots$						
$U_{\text{двиг}}, \text{ В}$	$t_5, \text{ с}$	$T = t_5/5, \text{ с}$	$\omega = 2\pi/T,$ рад/с	$\varphi_{\text{л}},$ дел.	$\varphi_{\text{пр}},$ дел.	$a = \frac{\varphi_{\text{л}} + \varphi_{\text{пр}}}{2}, \text{ дел.}$

Подождите, пока установится режим колебаний (порядка минуты), после чего измерьте отклонения стрелки колеблющегося диска влево ($\varphi_{\text{л}}$) и вправо ($\varphi_{\text{пр}}$) в делениях шкалы лимба. Результаты запишите в соответствующие ячейки табл. 2.2.2. Выполните измерения времени пяти колебаний и отклонений диска, увеличивая напряжение на электродвигателе с шагом в 1 В. Результаты запишите в табл. 2.2.2. Измерения можно прекратить, когда величина отклонения пройдет через максимум и уменьшится (по сравнению с максимальным) в 2–3 раза.

С помощью переключки подайте на обмотку тормозящего электромагнита напряжение $U_{\text{маг}} = 8 \text{ В}$ и выполните вышеописанные измерения зависимости отклонения маятника от напряжения на электродвигателе (т.е. фактически от частоты вынуждающей силы) при новой (увеличенной) величине коэффициента затухания. Результаты запишите в таблицу, построенную аналогично табл. 2.2.2.

Замечание. В результате нестройной гармоничности вынуждающей силы и, возможно, нелинейности колебаний самого маятника вблизи резонанса, при малом затухании, наблюдается явление, похожее на бииения: амплитуда нарастает до некоторого значения, затем убывает, опять нарастает и т.д., причем не обязательно до прежнего значения. Эти нерегулярные осцилляции амплитуды не прекращаются за время $\geq 1/\beta$ и поэтому к процессу установления колебаний отношения не имеют.

За амплитуду установившегося вынужденного колебания рекомендуется принимать максимальное из наблюдаемых значений амплитуды.

Задание 4. Визуальная оценка разности фаз

Наблюдая за относительным движением рычага и диска маятника, оценить сдвиг по фазе установившихся колебаний диска относительно колебаний рычага. Наблюдения провести для трех частот колебаний рычага: вблизи резонанса и при минимальной и максимальной (для данной установки) частотах.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Вычислите и запишите в табл. 2.2.1–2.2.3 средние значения амплитуд $\langle a_m \rangle$ и их натуральные логарифмы $\ln \langle a_m \rangle$.

На одном листе миллиметровой бумаги постройте три графика (для разных значений U) зависимостей $\ln \langle a_m \rangle$ от m , проводя по экспериментальным точкам три прямых линии. По угловым коэффициентам этих прямых (*угловым коэффициентом прямой* называется величина K в уравнении прямой вида: $y = K \cdot x + b$, величина b в этом же уравнении носит название «свободный член»)

$$\ln \langle a_m \rangle = \ln \langle a_0 \rangle - \lambda \cdot m. \quad (2.2.11)$$

Определите λ и, используя результат предыдущего задания для периода T , рассчитайте $\beta = \lambda/T$ (для трех напряжений на электромагните).

По разбросу точек на графиках оцените относительную погрешность определения логарифмического декремента затухания $\delta\lambda$. Относительную погрешность $\delta\beta$ коэффициента затухания рассчитайте по формуле

$$\delta\beta = \sqrt{(\delta\lambda)^2 + (\delta T)^2}. \quad (2.2.12)$$

Вычислите абсолютную погрешность $\Delta\beta = \beta \cdot \delta\beta$.

Используя формулу (2.2.3) и результаты данного и предыдущего заданий, заполните табл. 2.2.3.

На основании сравнения относительной разности частот $(\omega_0 - \omega')/\omega'$ и относительной погрешности определения частоты $\delta\omega'$ сделайте вывод: есть ли основания (в условиях данного эксперимента) отличать частоту свободных затухающих колебаний ω' и резо-

нансную частоту $\omega_{\text{рез}}$ (см. (2.2.3) и текст после (2.2.8)) от собственной частоты ω_0 , или, учитывая экспериментальную погрешность $\delta\omega'$ определения частот, можно приближенно полагать их равными собственной частоте системы ω_0 ?

Таблица 2.2.3

Напряжение на электромагните	β , $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\frac{\omega_0 - \omega_{\text{рез}}}{\omega_{\text{рез}}} \approx \frac{\beta^2}{\omega'^2}$	$\delta\omega'$
$U = 0$			
$U = 4 \text{ В}$			
$U = 8 \text{ В}$			

Вычислите и запишите в табл. 2.2.2 значения периода колебаний T , циклической частоты колебаний ω и амплитуды колебаний a .

По полученным данным на одном листе постройте две ($U_{\text{маг}} = 0$ и $U_{\text{маг}} = 8 \text{ В}$) резонансных кривых $a(\omega)$. Оцените по графикам $\omega_{\text{рез}}$ и сравните ее с ω' (см. также формулу (2.2.8)). Оцените по графикам $a_{\text{рез}}$ амплитуды в момент резонанса, используя полученные в задании 2 коэффициенты затухания, проверьте, наблюдается ли в эксперименте обратная пропорциональность: $a_{\text{рез}} \propto 1/\beta$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Во сколько раз уменьшится амплитуда затухающего колебания за время $\Delta t = 1/\beta$?

2. Может ли система совершать свободные колебания, если $\beta = 2\omega_0$?

3. Собственная частота колебаний $\omega_0 = 1 \text{ с}^{-1}$, коэффициент затухания $\beta_1 = 0,01 \text{ с}^{-1}$ и $\beta_2 = 0,02 \text{ с}^{-1}$. Можно ли экспериментально заметить различие резонансных частот, если относительная погрешность измерения частоты 1%?

4. Как изменится амплитуда в момент резонанса, если коэффициент затухания уменьшить в два раза (считать, что $\beta \ll \omega_0$)?

5. Коэффициент затухания $\beta = 0,01 \text{ с}^{-1}$. Сколько примерно времени необходимо для установления вынужденных колебаний?

6. Известны значения амплитуды колебаний через десять периодов: a_2 и a_{12} . Чему равен логарифмический декремент затухания?

7. Сила трения пропорциональна квадрату скорости. Можно ли утверждать, что амплитуда свободных затухающих колебаний будет экспоненциально убывать во времени?

8. Чему примерно равна добротность колебаний Q , если $\beta \ll \omega_0$, амплитуда силы равна F_m и отношение амплитуды в момент резонанса к величине сдвига системы из положения равновесия под действием постоянной силы величины F_m равно десяти?

9. При какой частоте амплитуда скорости достигает максимального значения?

10. Вывести формулы, связывающие начальную амплитуду и начальную фазу затухающего колебания с начальным смещением и начальной скоростью.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. М.: Астрель, 2003.

2. Иродов И.Е. Механика. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2005.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. М.: Наука, 1986.

2. Киттель Ч., Найт У., Рудерман М. Механика. Т. 1. М.: Наука, 1983.

Работа 2.3

КОЛЕБАНИЯ СТРУН

Цель: изучение собственных колебаний струны с закрепленными концами; изучение зависимостей собственной частоты струны от натяжения и длины струны, от материала и плотности струны.

Оборудование: установка для изучения собственных колебаний струны, набор струн, динамометр, частотомер, микрометр, линейка.

ВВЕДЕНИЕ

Если в каком-либо месте упругой среды внести возмущение в виде отклонения частиц среды от положения равновесия, то, в силу упругих свойств, это приведет к колебаниям данных частиц. Причем если потенциал, создаваемый всей средой для данной частицы можно считать приближенно квадратичным (по крайней мере, для достаточно малых амплитуд), то такое колебание будет гармоническим. А вследствие взаимодействия между частицами, это колебание начнет распространяться в среде. Процесс распространения колебаний в среде называется *волной*.

В случае, когда в среде распространяется одновременно несколько волн, частицы участвуют сразу в нескольких колебательных движениях, и их колебания оказываются геометрической суммой колебаний, которые совершали бы частицы при распространении каждой из волн в отдельности. Такое поведение называется *принципом суперпозиции*.

Колебательный процесс, называемый *стоячей волной*, возникает в результате сложения двух встречных волн с одинаковой амплитудой, частотой и направлением колебаний частиц. На практике стоячие волны возникают при отражении волн от преград: падающая на преграду волна и бегущая ей навстречу отраженная и представляют собой встречные волны, образующие стоячую волну при наложении. При этом частицы среды, к которым колебания от па-

дающей и отраженной волн приходят в одинаковой фазе, колеблются с максимальной амплитудой, а те частицы, к которым колебания приходят в противофазе, – покоятся. Первые частицы среды образуют *пучности*, вторые – *узлы* стоячей волны.

Каждая точка среды совершает гармонические колебания, описываемые в одномерном случае (например, колебания струны) выражением:

$$\xi(x, t) = A(x) \sin(\omega t + \alpha),$$

где $\xi(x, t)$ – смещение точки среды с координатой x в момент времени t ; $A(x)$ – амплитуда колебаний в этой точке; ω – частота этих колебаний; α – начальная фаза. Поскольку предполагалось, что накладываются волны – гармонические, логично будет предположить, что и зависимость амплитуды от координаты тоже будет гармонической функцией. Таким образом, приходим к следующему виду уравнения стоячих волн:

$$\xi(x, t) = A_0 \sin(kx + \varphi) \sin(\omega t + \alpha),$$

где k – волновое число, связанное с длиной волны λ соотношением $k = 2\pi/\lambda$.

Непосредственный вид стоячих волн зависит от так называемых *граничных условий*, которые определяются физическими условиями на границе колеблющейся среды. В случае колебаний струны возможны следующие варианты.

1. Жестко закрепленный конец (возьмем его координату за x_0) – физически это означает, что эта точка не может колебаться. Таким образом, граничное условие можно записать в виде $\xi(x = x_0) = 0$.

2. Свободный конец – означает, что среда в этой точке не испытывает деформации, т.е. граничное условие будет $\left. \frac{\partial \xi}{\partial x} \right|_{x=x_0} = 0$. Вари-

анты жестко закрепленного и свободного конца на практике практически нереализуемы и, как правило, соответствующие им граничные условия являются приближенными. При этом если свободный конец при некоторых технических ухищрениях можно реализовать (например, поместив установку в вакууме и невесомости и исключив влияние каких-либо силовых полей), то жесткое закреп-

ление невозможно теоретически, в силу невозможности существования абсолютно твердых тел (например, оно противоречит теории относительности).

Это приводит нас к следующему условию.

3. Условие, когда имеем полусвободный конец. Физически это означает наличие связи между деформациями и смещением, т.е. граничному условию вида $\frac{\partial \xi}{\partial x} = r\xi$. Наглядной моделью является закрепление через пружину к абсолютно жесткому креплению, тогда роль коэффициента связи r будет играть жесткость такой пружины.

В закрепленной с обоих концов струне при распространении в ней поперечных колебаний устанавливаются стоячие волны, причем в местах закрепления струны располагаются узлы. Вследствие этого в струне возбуждаются колебания только таких частот, при которых на длине струны l укладывается целое число полувольт.

Отсюда следует условие:

$$l = \frac{n\lambda_n}{2} \quad \text{или} \quad \lambda_n = \frac{2l}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots). \quad (2.3.1)$$

Учитывая связь длины волны колебаний с частотой ν и скоростью распространения волны v , можно записать:

$$\nu_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2l}. \quad (2.3.2)$$

Частоты ν_n называются *собственными* частотами колебаний струны.

Самая низкая собственная частота $\nu_1 = \frac{v}{2l}$ называется *основной*, или *основным тоном*. Более высокие частоты, кратные ν_1 , называются *обертонами*, или *гармониками* ($n = 2$ – первый обертон; $n = 3$ – второй и т.д.).

Рассмотрим струну. Выделим малый элемент струны шириной dx . На этот элемент (рис. 2.3.1) слева действует сила натяжения F , вертикальная проекция которой на ось ξ равна:

$$F_\xi = -F \sin \alpha. \quad (2.3.3)$$

Аналогичное выражение для проекции силы (только со знаком «+») можно записать и для правого конца элемента 12.

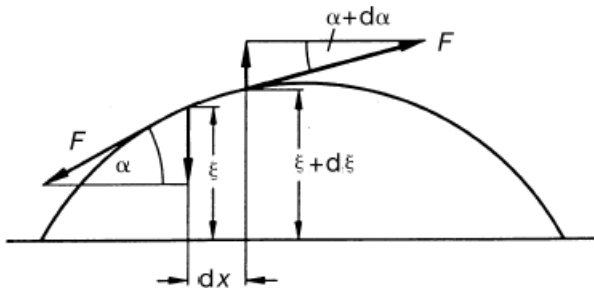


Рис. 2.3.1

При малых смещениях:

$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad (2.3.4)$$

тогда из уравнения (2.3.4) следует:

$$d\alpha = \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx. \quad (2.3.5)$$

Пренебрегая изменением силы F вдоль струны (это справедливо для малых смещений при колебаниях), результирующая этих двух проекций сил равна:

$$F_{\xi} = F \sin(\alpha + d\alpha) - F \sin \alpha = F \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} dx. \quad (2.3.6)$$

Масса малого элемента равна:

$$dm = \rho S dx, \quad (2.3.7)$$

где ρ – плотность материала струны; S – площадь ее поперечного сечения. Применим к этому малому элементу второй закон Ньютона:

$$dm \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = F_{\xi}. \quad (2.3.8)$$

Подставим (2.3.6) и (2.3.7) в уравнение (2.3.8):

$$\rho S \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = F \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}$$

или

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = \frac{F}{\rho S} \cdot \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2}. \quad (2.3.9)$$

Скорость распространения поперечных колебаний вдоль струны зависит от натяжения струны и определяется по формуле:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\rho S}} = \frac{2}{d} \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}}, \quad (2.3.10)$$

где $F = mg$ – натяжение струны; ρ и d – плотность материала струны и ее диаметр соответственно.

Подставим (2.3.10) в формулу (2.3.2) и получим выражение для частоты основного тона:

$$\nu = \frac{1}{ld} \sqrt{\frac{F}{\pi \rho}} \quad (2.3.11)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для изучения колебаний струн изображена на рис. 2.3.1.

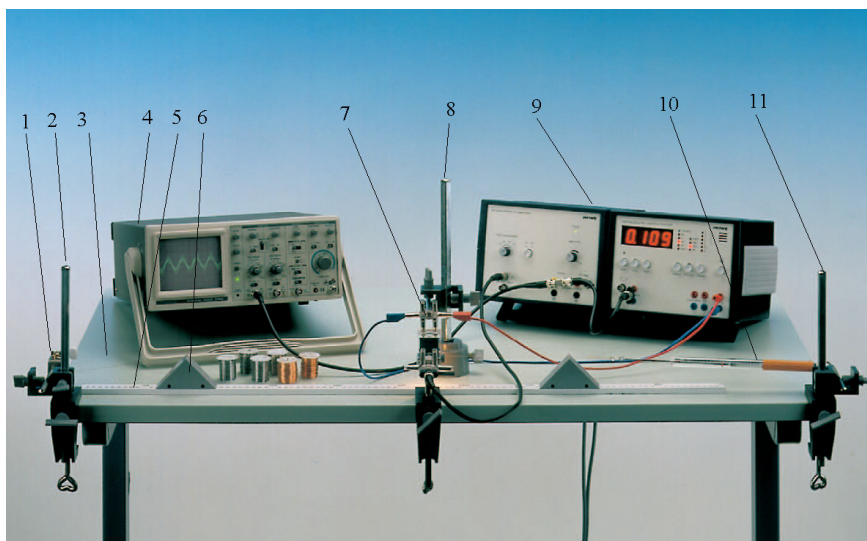


Рис. 2.3.1

Установка состоит из струны 3, закрепленной с одной стороны на штативе 2, оснащенном устройством натяжения, изменение силы которого производится с помощью винта 1. Второй конец прикреплен через динамометр 10, предназначенный для измерения натяжения, к штативу 11. Опорные призмы 6 служат для задания длины колеблющегося участка струны, длина которого определяется с помощью линейки 5. На штативе 8 закреплена система измерения частоты колебаний 7, состоящая из осветителя и фотодатчика, скоммутированного с частотомером 9. Для возбуждения колебаний струны служит резиновый молоток (на рисунке не показан).

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Во избежание повреждения кожных покровов не касаться струны руками.
2. Операции монтажа и демонтажа производить только на ненагруженной струне.
3. Не допускать нагружения струны более указанных выше допустимых величин силы натяжения.
4. Не касаться оголенных частей проводки при включенном питании.

ЗАДАНИЯ

Задание 1. Определение зависимости собственной частоты струны от силы натяжения струны

1. Закрепите струну на консолях устройства натяжения и динамометра.
2. Установите опорные призмы и зафиксируйте струну в прорезях. Запишите расстояние между призмами.
3. Измерьте диаметр струны при помощи микрометра.
4. При помощи винта устройства натяжения нагрузите струну до 5 Н.
5. Возбудите колебания струны, легко ударив по ней резиновым молотком. Выждав одну-две секунды для установления колебаний (время подбирается экспериментальным путем, для чего необходимо произвести несколько прикидочных измерений), запишите час-

тоту колебаний, определенную по индикации частотомера в заранее подготовленную табл. 2.3.1. Повторите 5–7 раз.

6. Повторите измерения для различных натяжений с шагом 5 Н, при этом максимальная нагрузка не должна превышать 30 Н.

Таблица 2.3.1

№	Сила натяжения F , Н					
1						
2						
...						
$\langle \nu \rangle$, Гц						
$\Delta \nu$, Гц						

Задание 2. Определение зависимости собственной частоты струны от длины струны

1. Смонтируйте установку по аналогии с заданием 1.
2. Выберите и зафиксируйте силу натяжения струны в диапазоне 10–30 Н.
3. Проведите измерения частоты собственных колебаний струны (см. п. 4 задания 1) для 5–7 длин колеблющейся части. Максимальная длину и шаг подберите таким образом, чтобы минимальная длина оказалась не менее 20 см. Результаты занесите в заранее подготовленную табл. 2.3.2.

Таблица 2.3.2

№	Длина струны l , Н					
1						
2						
...						
$\langle \nu \rangle$, Гц						
$\Delta \nu$, Гц						

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Задание 1

1. Для каждой серии измерений частоты определите ее среднее значение, используя следующее соотношение:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2.3.12)$$

а также погрешность:

$$\Delta v = t_{n\alpha} \sigma \quad (2.3.13)$$

где

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (v_i - \langle v \rangle)^2} \quad (2.3.14)$$

и $t_{n\alpha}$ – коэффициент Стьюдента, причем доверительную вероятность необходимо выбрать равной 0,7.

2. Постройте график зависимости средней частоты от силы натяжения струны в дважды логарифмическом масштабе.

3. Определите коэффициент углового наклона графика и установите показатель степени в степенной зависимости частоты от силы натяжения.

Задание 2

1. Для каждой серии измерений частоты определите ее среднее значение и погрешность в соответствии с (2.3.12)–(2.3.14).

2. Постройте график зависимости средней частоты от обратной длины струны.

3. Определите коэффициент углового наклона графика и установите плотность материала струны, используя (2.3.11).

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Результаты работы представьте в виде:

таблиц с непосредственно измеренными и косвенно определенными физическими величинами;

графиков зависимости средней частоты от силы натяжения и длины колеблющегося участка струны;

заклучения.

2. Сделайте вывод о соответствии теории показателя степенной зависимости частоты от силы натяжения.

3. Сравните найденную плотность материала струны с табличной.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как выглядит профиль стоячей волны на струне, закрепленной с обеих сторон, если на ней установились колебания первого обертона?

2. Как выглядит профиль стоячей волны на струне, закрепленной с обеих сторон, если на ней установились колебания основного тона?

3. Как выглядит профиль стоячей волны на струне, закрепленной с одного конца, если на ней установились колебания основного тона?

4. Как выглядит профиль стоячей волны на струне, закрепленной с одного конца, если на ней установились колебания первого обертона?

5. Почему существование абсолютно твердого тела противоречит теории относительности?

6. Как связаны понятия доверительного интервала и доверительной вероятности?

7. Как ведет себя коэффициент Стьюдента при асимптотическом приближении доверительной вероятности к единице?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. М.: Наука, 1998.
2. Иродов И.Е. Основные законы механики. М.: Высшая школа, 1997.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. М.: Наука, 1979.

Работа 2.4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА В ВОЗДУХЕ И ОТНОШЕНИЯ C_p/C_v МЕТОДОМ СТОЯЧИХ ВОЛН

Цель: измерение скорости ультразвука в воздухе методом стоячих волн и определение отношения C_p/C_v .

Оборудование: ультразвуковой генератор, излучатель, приемник на подвижном штативе, экран, регулировочный винт, мультиметр.

ВВЕДЕНИЕ

Звуковая волна в газе представляет собой распространяющуюся в пространстве последовательность чередующихся областей сжатия и разрежения газа. Звуковая волна является продольной, т.е. смещение частиц среды происходит в направлении распространения волны. Рассмотрим плоскую волну, распространяющуюся в газе вдоль оси x . В этом случае волновое уравнение имеет вид

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\rho}{\gamma p} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}, \quad (2.4.1)$$

где ξ – смещение частиц среды (газа) из положения равновесия; t – время; ρ – плотность среды; p – давление газа в отсутствие волн; $\gamma = C_p/C_v$.

Коэффициент при второй производной по времени в волновом уравнении (2.4.1) является квадратом фазовой скорости волны. Таким образом, скорость распространения звука в газах:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}. \quad (2.4.2)$$

При атмосферном давлении и комнатной температуре большинство газов по своим свойствам близко к идеальному газу. Поэтому из уравнения состояния идеального газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (2.4.3)$$

получаем для фазовой скорости:

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (2.4.4)$$

где T – термодинамическая температура; R – газовая постоянная; M – масса одного моля газа.

В работе измеряется скорость ультразвука в воздухе методом стоячих волн.

Стоячая волна возникает при наложении двух встречных плоских волн с одинаковой амплитудой. Практически стоячие волны возникают при отражении от преград. Падающая на преграду волна и бегущая ей навстречу отраженная волна образуют стоячую волну.

Уравнения двух плоских волн, распространяющихся в противоположных направлениях:

$$\xi_1 = a \cdot \cos(\omega t - kx + \alpha),$$

$$\xi_2 = a \cos(\omega t + kx + \beta),$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число.

Сложив, получим уравнение стоячей волны:

$$\xi = \xi_1 + \xi_2 = 2a \cos kx \cos \omega t.$$

(Начало отсчета координаты и времени выбраны таким образом, что $\beta - \alpha = 0$ и $\alpha + \beta = 0$.)

Из уравнения стоячей волны видно, что ее амплитуда зависит от x :

$$\text{амплитуда} = \left| 2a \cos \left(2\pi \frac{x}{\lambda} \right) \right|.$$

В точках, координаты которых удовлетворяют условию:

$$2\pi \frac{x}{\lambda} = \pm n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \quad (2.4.5)$$

амплитуда колебаний достигает максимального значения. Эти точки называют *пучностями стоячей волны*. Значения координат пучностей:

$$x_{\text{пучн}} = \pm n \frac{\lambda}{2} \quad (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (2.4.6)$$

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 обращается в нуль. Эти точки называют *узлами стоячей волны*.

Из формулы (2.4.6) следует, что расстояние между соседними пучностями (так же как и расстояние между соседними узлами) равно $\lambda/2$ (рис. 2.4.1).

На рисунке показана стоячая волна (смещение $\xi(x, t)$ при $t_1 = 0$ и $t_2 = T/2$).

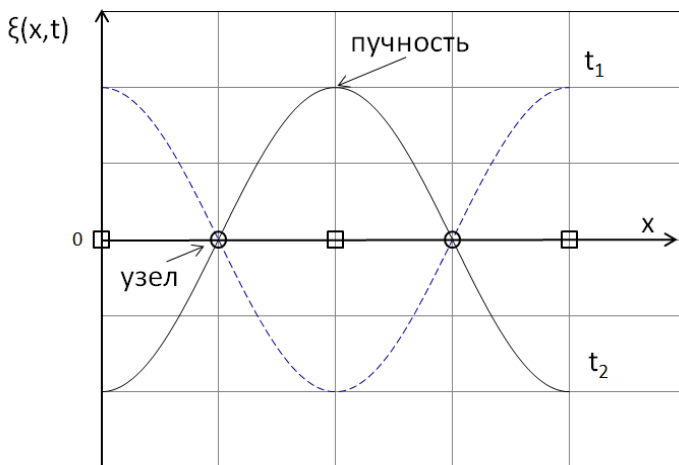


Рис. 2.4.1

Избыточное давление Δp , возникающее в некоторой точке среды при прохождении звуковой волны, пропорционально деформации ε ($\Delta p \sim \varepsilon$):

$$\varepsilon = \frac{\partial \xi}{\partial x}.$$

Поэтому уравнение для избыточного давления будет иметь вид

$$\Delta p \sim \sin kx \cdot \cos \omega t.$$

Таким образом, мгновенное значение давления в некоторой точке пространства можно представить в виде

$$p' = p + \Delta p$$

(рис. 2.4.2).

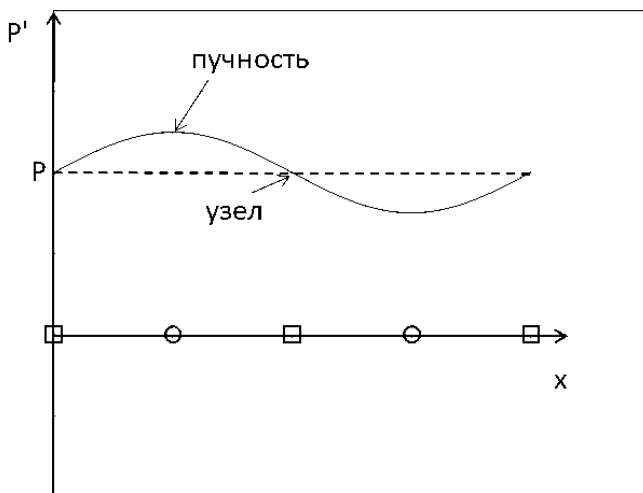


Рис. 2.4.2

По положению пучностей на графике давления можно определить длину звуковой волны.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для определения длины ультразвуковой волны (рис. 2.4.3) состоит из: ультразвукового генератора – 1; излучателя – 2; приемника на подвижном штативе – 3; экрана – 4; регулировочного винта – 5 и мультиметра – 6.

Генератор 1 генерирует ультразвуковые волны частотой 40 кГц. Плоская волна от излучателя 2 попадает на экран 4, отражается от него и распространяется в противоположном направлении. Прямая и обратная волны складываются, образуя стоячую волну. С помощью приемника 3 колебания давления преобразуются в электрические. Сигнал подается на мультиметр 6, показания которого пропорциональны интенсивности волны в данной точке среды. С помощью винта 5 можно перемещать штангу с приемником 3 и измерять интенсивность волны в различных точках пространства.

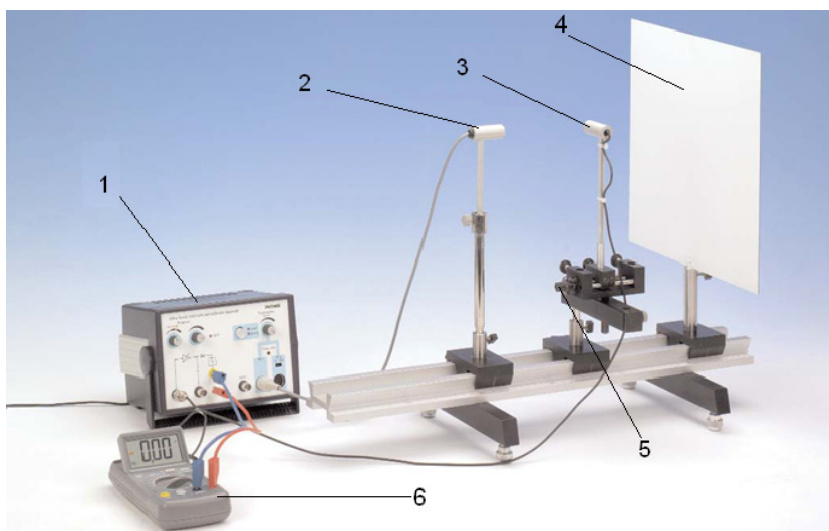


Рис. 2.4.3

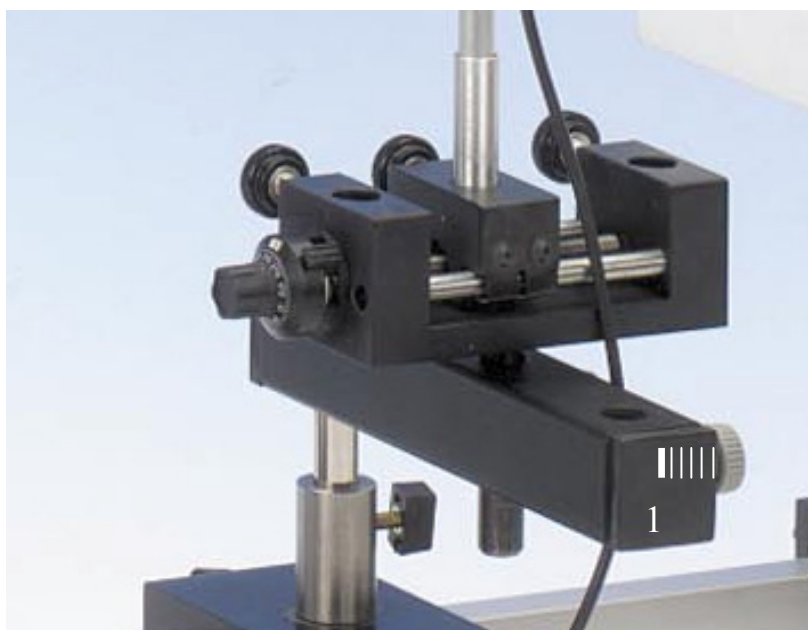


Рис. 2.4.4

При повороте измерительного винта (рис. 2.4.4) штанга приемника смещается в горизонтальном направлении. Одно деление горизонтальной шкалы равно 1 мм, что соответствует двум полным оборотам винта. Число оборотов винта показано в окошке на корпусе винта.

ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включить ультразвуковой генератор.
2. На мультиметре выставить режим ДС (прямой ток, кнопка справа сверху). Выбрать предел измерения 20V.
3. Провести измерения интенсивности стоячей волны в зависимости от положения приемника. Для этого следует перемещать приемник 3 с помощью винта 5. Интенсивность пропорциональна напряжению на вольтметре 6. Результаты измерений занести в табл. 2.4.1, где x_i – координата приемника по горизонтальной шкале 2 (на рис. 2.4.4); U_i – показания мультиметра, В. Измерения проводить до тех пор, пока не будет получено три четких максимума на графике зависимости $U(x)$ (рис. 2.4.5).

Таблица 2.4.1

№	x_i , мм	U_i , В
...

4. По данным табл. 2.4.1 построить график $U(x)$.
5. По графику $U(x)$ определить длину волны ультразвука λ . Это следует сделать разными способами. Например, по двум соседним максимумам:

$$\lambda = 2|x_{1\max} - x_{2\max}|.$$

Или по максимуму и минимуму интенсивности:

$$\lambda = 4|x_{1\max} - x_{2\max}|.$$

Найти $\langle \lambda \rangle$.

6. Рассчитать скорость распространения ультразвука по формуле: $V = \langle \lambda \rangle \nu$.

Частота ультразвуковых волн указана в разделе «Описание устройства».

Определить γ для воздуха с помощью формулы (2.4.4).

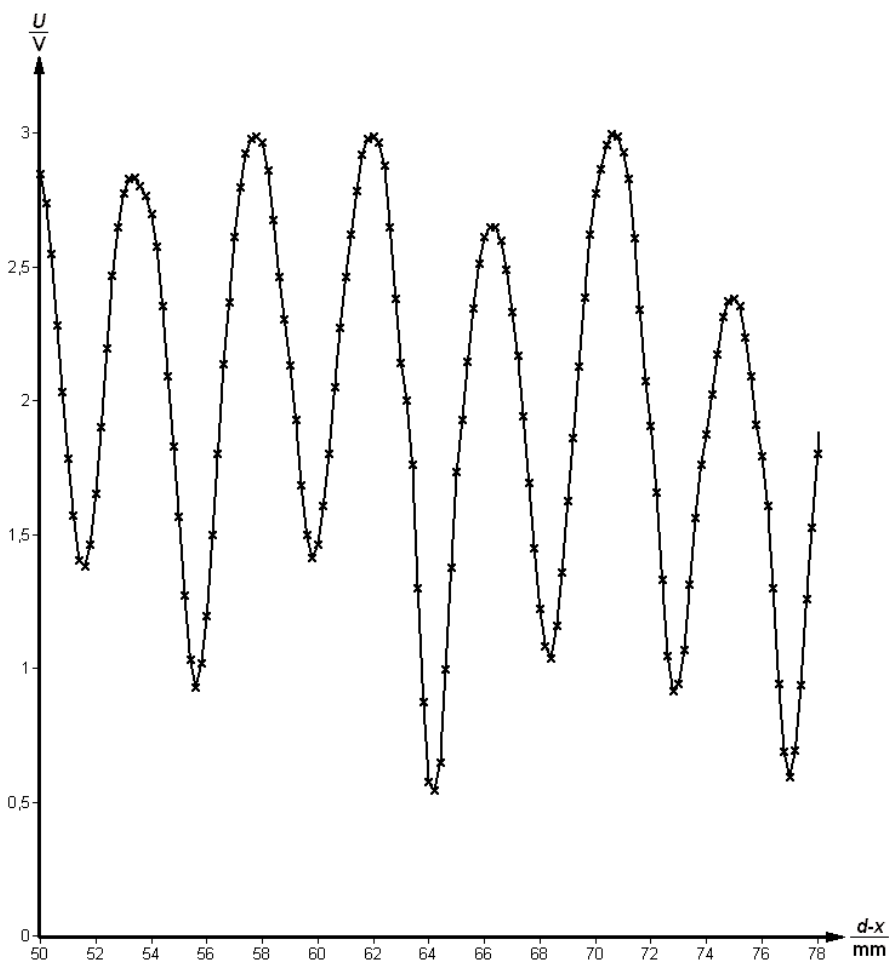


Рис. 2.4.5

7. Оценить погрешности $\Delta\lambda$ методом Корнфельда. Для V и γ посчитать погрешности косвенных измерений.

8. Написать заключение. Сравнить полученное значение γ с табличным.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая волна называется продольной?
2. Какой вид имеет волновое уравнение для плоской волны, распространяющейся вдоль оси x ?
3. Как определить фазовую скорость волны по волновому уравнению?
4. Что такое стоячая волна?
5. Как определить координаты пучностей (узлов) стоячей волны?
6. Чему равно расстояние между соседними пучностями (узлами) стоячей волны?
7. Каким образом можно получить стоячую волну? Как ее получают в данной работе?
8. Нарисуйте график давления от координаты в звуковой волне в некоторый момент времени.
9. Опишите процедуру определения длины волны ультразвука в данной работе.
10. Как определить γ для воздуха, зная длину волны ультразвука?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 4. Волны. Оптика: учебное пособие для втузов. М.: АСТ, Астрель, 2008.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. В 5 кн. Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика: учебное пособие для втузов. М.: АСТ: Астрель, 2005.
3. Иродов И.Е. Волновые процессы. Основные законы: учебное пособие для вузов. М.: Лаборатория базовых знаний, 2006.
4. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. Т. 1, 2. М.: Дрофа, 2003, 2004.
5. Светозаров В.В. Элементарная обработка результатов измерения: учебное пособие. М.: МИФИ, 2005.

Дополнительная

1. Крауфорд Ф. Волны. М.: Наука, 1974.

Работа 2.5

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ЗВУКА В ВОЗДУХЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАНОВКИ «КОБРА 3»

Цель: *определение звука в воздухе измерением времени прохождения звуковой волны*

Оборудование: два металлических стержня, микрофон, основания для крепления стержня и микрофона, рулетка, усилитель-формирователь, соединительные провода, блок Cobra3, персональный компьютер.

ВВЕДЕНИЕ

Распространяющиеся в среде возмущения, переносящие энергию, называются *волнами*. При распространении волны в среде частицы самой среды не участвуют в поступательном движении. Они совершают колебания около положения своего равновесия. В зависимости от направления этих колебаний волны делят на *продольные* и *поперечные*. В поперечных волнах колебание частиц среды происходит перпендикулярно направлению распространения волны. В случае продольных волн имеют место колебания вдоль направления распространения волны.

Звуковая волна в газе – распространяющаяся в пространстве последовательность чередующихся областей сжатия и разрежения газа. Это продольная волна.

Идея, на которой основано измерение скорости звука в данной работе заключается в следующем. Измеряется время t , за которое звуковая волна проходит некоторое фиксированное расстояние L . Тогда скорость звука определяется по формуле

$$v = \frac{L}{t}.$$

Следует учитывать, что скорость звука зависит от температуры воздуха. Эта зависимость выражается формулой

$$v = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}, \quad (2.5.1)$$

где $R = 8,31$ Дж / (моль×К) – универсальная газовая постоянная; $\mu = 29$ г/моль – молярная масса воздуха; $\gamma = 1,4$ – показатель адиабаты для воздуха. Соответственно, следует сравнивать полученный в ходе эксперимента результат с величиной скорости звука, соответствующей температуре воздуха в лаборатории.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Используемая в настоящей работе установка изображена на рис. 2.5.1, а на рис. 2.5.2 представлена ее принципиальная схема.



Рис. 2.5.1

В состав установки входят массивные металлические стержни 1 и 2, причем стержень 1 установлен на массивном основании, стер-

жень 2 может брать в руку экспериментатор, работающий на установке. На заданном расстоянии от стержня 1, измеренном рулеткой 3, установлен микрофон 4.

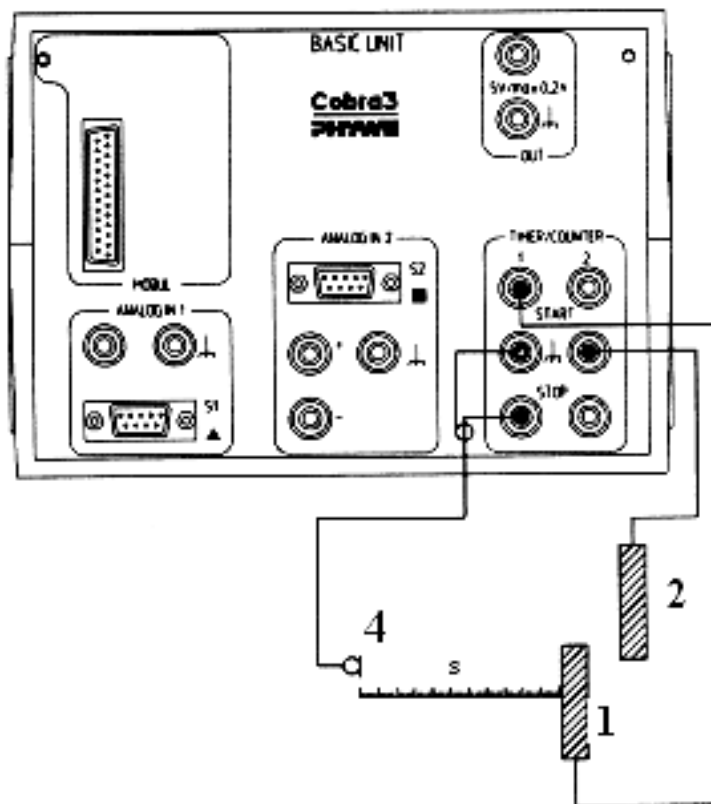


Рис. 2.5.2

Стержни 1 и 2 соединены проводами с входом «Старт» измерителя временных интервалов, встроенного в базовый блок установки «Кобра 3» (6 на рис. 2.5.1). Микрофон подключен к входу «Стоп» того же измерителя через усилитель-формирователь 5.

В ходе работы экспериментатор наносит легкий кратковременный удар стержнем 2 по стержню 1. При соприкосновении стержней цепь замыкается и возникает электрический импульс, который поступает на вход «Старт» измерителя временных интервалов. При

соударении стержней возникнет звуковой импульс, распространяющийся в окружающей воздушной среде. Когда звук достигает микрофона, вырабатывается электрический импульс, поступающий на вход «Стоп» измерителя временных интервалов. Блок «Кобра 3» вырабатывает цифровой код, несущий в себе информацию о длительности временного интервала между импульсами «Старт» и «Стоп». Этот код по кабелю передается в компьютер для дальнейшей программной обработки и отображения (компьютер на рис. 2.5.1 не показан).

Посредством компьютерной программы, созданной для обслуживания данной лабораторной работы, длительность измеренного временного интервала выводится на экран монитора.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. При выполнении работы следует руководствоваться правилами стандартной инструкции по технике безопасности при работе в лаборатории молекулярной физики.

2. Не следует соударять стержни с излишней силой, чтобы не повредить крепление неподвижного стержня.

ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Убедитесь, что персональный компьютер, входящий в состав лабораторной установки, включен и находится в режиме ожидания.

2. Убедитесь, что базовый блок «Кобра 3» включен (у включенного прибора светится зеленый светодиод в правом верхнем углу лицевой панели блока). Если вышеупомянутые устройства не включены, попросите сотрудников лаборатории подготовить их к работе.

3. Найдите на рабочем столе компьютера иконку в виде желтой латинской буквы **m** с надписью «Измерение» и дважды щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране возникнет диалоговое окно программы, обслуживающей измерения с помощью блока Cobra3, с заголовком «Phywe measure 4».

4. В меню, расположенном в верхней части окна, найдите опцию «Прибор» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране появится «выпадающее» меню, в котором перечислены про-

граммы, управляющие различными измерительными приборами, входящими в комплект оборудования от фирмы Phywe.

5. Найдите в этом меню строку «Timer/Counter» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране появится настроечное окно для работы с измерителем временных интервалов, использующимся в данной работе (рис. 2.5.3). Окно содержит элементы управления, с помощью которых можно задавать режим измерений. По умолчанию при запуске программы устанавливаются значения параметров, необходимые для выполнения данной работы, так что менять эти установки не следует.

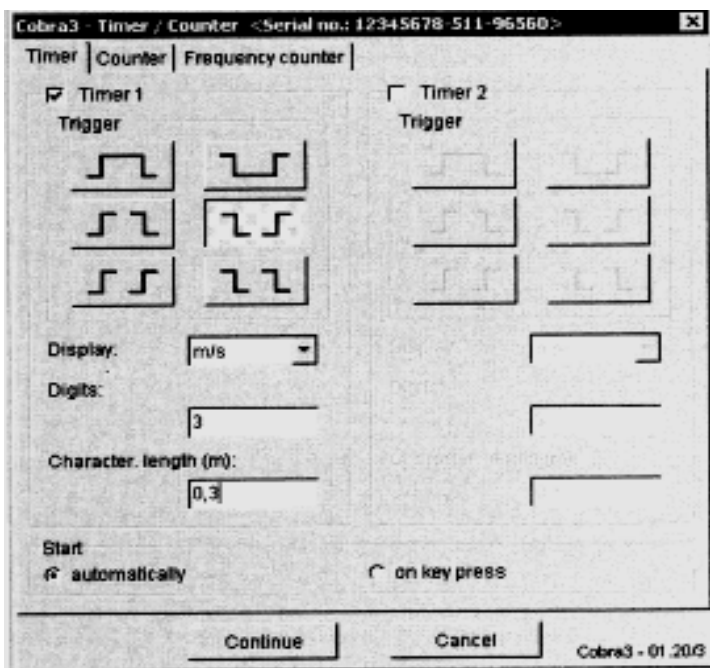


Рис. 2.5.3

6. В нижней части настроечного окна (см. рис. 2.5.3) найдите клавишу «Далее» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». Настроечное окно исчезнет с экрана, вместо него появится окно с таблицей, в которой после каждого соударения стержней на экране отображается измеренное время распространения звука от источ-

ника до микрофона. Это значение автоматически вводится в память компьютера. При этом программа сразу же готова к следующему измерению – никаких дополнительных действий не требуется.

ЗАДАНИЕ

Определение скорости звука в воздухе

1. Убедитесь в том, что компьютерная программа «Timer/Counter» готова к измерениям.

2. Расположите закрепленный стержень и микрофон на расстоянии 60 см друг от друга.

3. Выполните измерение времени прохождения звука между стержнями пять раз.

Для измерения времени аккуратно ударьте незакрепленным стержнем по стержню, закрепленному на основании. Удар должен быть достаточно резким, чтобы не было длительного соприкосновения стержней, что приведет к неверному результату измерения. Если результат измерения получается слишком малым, то измерение следует повторить: возможно, звук достиг микрофона, распространяясь через поверхность стола, на котором находится установка. Измеренное время запишите в заранее подготовленную табл. 2.5.1.

4. Выполните аналогичные серии измерений для расстояний 50, 40, 30 и 20 см.

Таблица 2.5.1

№	L , см	t , мс					$\langle t \rangle$, мс	Δt , мс
1	60							
2	50							
3	40							

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Вычислите среднее значение времени прохождения звука для каждого расстояния между стержнем, источником звука и микрофоном. Результаты запишите в табл. 2.5.1.

2. Для каждого расстояния вычислите погрешность измерения времени по методу Корнфельда. Результаты запишите в табл. 2.5.1.

3. По полученным результатам постройте график зависимости времени прохождения звука от расстояния между стержнем, источником звука и микрофоном. Отложите на графике рассчитанные погрешности экспериментальных точек (из табл. 2.5.1). График должен представлять собой прямую линию.

4. Методом парных точек определите угловой коэффициент построенной прямой и погрешность его определения. По угловому коэффициенту найдите скорость звука в воздухе и ее погрешность.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам проделанной работы напишите в лабораторном журнале заключение, в котором:

1) укажите, что (какая физическая величина) измерялось в данной работе;

2) укажите, каким методом выполнялись измерения;

3) приведите полученное в работе значение скорости звука в воздухе с погрешностью;

4) рассчитайте по формуле (2.5.1) теоретическое значение скорости звука и приведите его в заключении;

5) по справочным таблицам определите (и укажите в заключении) табличное (измеренное другими авторами) значение скорости звука в воздухе;

6) если обнаружится расхождение приведенных значений скорости звука, обсудите в заключении возможные причины такого расхождения;

7) обсудите точность измерений и природу погрешности, с которой измерена скорость звука в данной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение звуковой волны.

2. В чем отличие продольных волн от поперечных? Какой волной является звук?

3. Возможно ли возникновение поперечных волн в газах?

4. В каких средах скорость звука выше: твердых или газообразных?
5. В каком газе (гелии или азоте) скорость звука больше (температуры газов одинаковы)? Чем обусловлено различие?
6. Как зависит скорость звука от температуры воздуха?
7. Каковы возможные источники погрешностей в данной работе?
8. Каковы могут быть причины неверного измерения времени прохождения звуком расстояния между стержнями?

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 4. Волны. Оптика. М.: Астрель, 2004.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Механика. М.: Мир, 1979.

Работа 2.6

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАНОВКИ «КОБРА 3»

Цель: экспериментальная проверка справедливости закона Шарля для воздуха; определение универсальной газовой постоянной и термического коэффициента давления газа.

Оборудование: стеклянный корпус, Н-образная опора, газовый шприц на 100 мл, нагреватель, блок измерения давления, трубка-переходник для подключения датчика давления, термопарный датчик температуры ($-10...120\text{ }^{\circ}\text{C}$), магнит, магнитная мешалка, воронка, штатив, зажимы, универсальный блок «Кобра 3», источник питания 12 В, персональный компьютер с программным обеспечением для изучения уравнения состояния газа.

ВВЕДЕНИЕ

Системы, состоящие из очень большого числа частиц (молекул, атомов, электронов и др.), называются *макросистемами*. Примером может служить, например, газ или жидкость. Состояние макросистемы характеризуется величинами, которые называют *термодинамическими параметрами системы* (температура T , давление p , объем V и т.п.), причем эти параметры связаны друг с другом, так что изменение одного из них влечет за собой изменение других.

Из трех агрегатных состояний вещества наиболее простым является газообразное, так как в этом случае силы, действующие между молекулами, очень малы (т.е. при определенных условиях ими можно пренебречь). Будем считать, что межмолекулярные силы в газе полностью отсутствуют. Для простоты пренебрежем также размерами молекул, т.е. будем считать их материальными точками. При этих предположениях молекулы газа являются совершенно свободными, т.е. движутся равномерно и прямолинейно. Предположим также, что столкновения молекул газа друг с другом и со стенками сосуда – абсолютно упругие. Газ, обладающий такими свойствами, называется *идеальным газом*. Идеальный газ представ-

ляет собой абстрактную модель, применяемую для описания реальных газов. Любой реальный газ по мере убывания его плотности приближается по своим свойствам к идеальному. Некоторые газы (например, воздух, кислород, азот, гелий) при комнатной температуре и атмосферном давлении весьма близки к идеальному газу.

Равновесным называют такое состояние системы, при котором все ее макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными в отсутствии внешнего воздействия, при этом давление и температура имеют одинаковые значения во всех частях объема. Уравнение, связывающее температуру, давление и объем идеального газа в состоянии теплового равновесия, называется его *уравнением состояния*. Например, законы Бойля–Мариотта и Гей-Люссака представляют собой уравнения состояния идеального газа для случаев, когда один из параметров газа постоянен. Закон Бойля–Мариотта заключается в следующем: *произведение объема V газа на его давление p зависит только от температуры t :*

$$pV = \text{const}, \quad t = \text{const}. \quad (2.6.1)$$

Переход газа из одного состояния в другое, происходящий при постоянной температуре, носит название *изотермического процесса*.

Закон Гей-Люссака гласит, что *при постоянном давлении p объем V данной массы газа меняется линейно с температурой t :*

$$V = V_0(1 + \alpha_p t), \quad p = \text{const}, \quad (2.6.2)$$

причем коэффициент объемного расширения газа α_p для всех идеальных газов один и тот же. Процесс, протекающий при постоянном давлении, называется *изобарическим*.

Если переход газа из одного состояния в другое совершается при постоянном объеме, то такой переход называется *изохорическим процессом*. В этом случае выполняется закон Шарля: *для данной массы газа при постоянном объеме V давление газа p изменяется линейно с температурой t :*

$$p = p_0(1 + \alpha_V t), \quad V = \text{const}, \quad (2.6.3)$$

где p_0 – давление газа при 0°C ; p – давление газа при температуре t ; α_V – термический коэффициент давления (изохорный коэффициент давления). Этот закон был открыт Шарлем* в 1787 г.

* Jacques Alexandre Césaire Charles (1746–1823) – французский ученый-изобретатель.

Из закона Шарля следует, что

$$\alpha_V = \frac{1}{p_0} \left(\frac{p - p_0}{t} \right)_V. \quad (2.6.4)$$

Термический коэффициент давления α_V представляет собой относительное изменение давления при изменении температуры на 1 К при изохорическом процессе. Относительное изменение давления определяется по отношению к давлению, соответствующему нормальным условиям, т.е. при 0 °С.

Экспериментально установлено, что для идеального газа

$$\alpha_V = \alpha_p = \alpha = 1/273,15 \text{ К}^{-1}. \quad (2.6.5)$$

Согласно формуле (2.6.3), изохорический процесс изображается на графике прямыми линиями (изохорами, где $V_1 < V_2 < V_3$) (рис. 2.6.1), проходящими наклонно к оси температуры и пересекающими ее в точке $t = -1/\alpha = -273,15 \text{ °С}$, определяемой из условия $1 + \alpha t = 0$. Если перенести начало отсчета в эту точку, то происходит переход к шкале Кельвина, причем $T = t + 1/\alpha$. Точка $t = -273,15 \text{ °С}$ принята за начало отсчета новой шкалы температур, называемой *термодинамической*, или *абсолютной* шкалой (шкалой Кельвина). Температура, отсчитываемая по этой шкале, называется *термодинамической*; нуль этой шкалы называется *нулем Кельвина*.

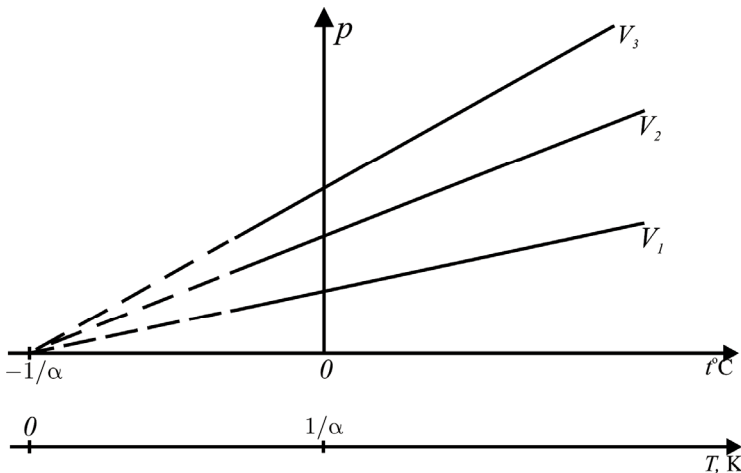


Рис. 2.6.1

Подставив в формулы (2.6.2) и (2.6.3) термодинамическую температуру, получим более удобный вид законов Гей-Люссака и Шарля:

$$V = V_0(1 + \alpha_p t) = V_0(1 + \alpha (T - 1/\alpha)) = V_0 \alpha T, \quad (2.6.6)$$

$$V = p_0(1 + \alpha_V t) = p_0(1 + \alpha (T - 1/\alpha)) = p_0 \alpha T, \quad (2.6.7)$$

или $V/T = \text{const}$ для $p = \text{const}$ и $p/T = \text{const}$ для $V = \text{const}$.

Для определения макроскопического состояния идеального газа достаточно задать два из трех термодинамических параметров, так как третий параметр однозначно определяется двумя другими из уравнения состояния газа.

Давление, концентрация молекул газа n и температура связаны между собой следующим уравнением:

$$p = nkT, \quad (2.6.8)$$

где k – постоянная Больцмана, равная $1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К.

Если в объеме V содержится N частиц, то $n = N/V$, и тогда

$$pV = NkT. \quad (2.6.9)$$

Это уравнение содержит все три параметра состояния и является уравнением состояния идеального газа.

Согласно закону Авогадро, в одинаковых объемах идеальных газов при одинаковых температуре и давлении содержится одно и то же число молекул. Отсюда следует, согласно (2.6.9), что при одинаковых температурах произведение pV для одного моля различных идеальных газов имеет одно и то же значение. Для одного моля идеального газа уравнение состояния запишется в виде

$$pV = RT, \quad (2.6.10)$$

где постоянная R , ввиду закона Авогадро, имеет одно и то же значение для всех газов. Это было указано Д.И. Менделеевым. Уравнение (2.6.10) обычно называют *уравнением Клапейрона–Менделеева*, а постоянную $R = (8,31343 \pm 0,00035)$ Дж/(К·моль) – *универсальной газовой постоянной*.

Если газ содержит ν молей, то уравнение Клапейрона примет вид

$$pV = \nu RT. \quad (2.6.11)$$

Экспериментальное наблюдение закона Шарля. Согласно (2.6.7), график зависимости $p(T)$ при изохорическом процессе пред-

ставляет собой прямую линию (см. рис. 2.6.1). Коэффициент $(dp/dT)_{V,v}$ равен тангенсу угла наклона прямой φ

$$\operatorname{tg} \varphi = (dp/dT)_{V,v}. \quad (2.6.12)$$

Поэтому, вычислив $\operatorname{tg} \varphi$, можно по формуле (2.6.4) рассчитать термический коэффициент давления газа как

$$\alpha_V = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{p_0}, \quad (2.6.13)$$

где p_0 – значение давления воздуха при нормальных условиях (при температуре 0°C).

Из уравнения (2.6.11) следует, что тангенс угла наклона φ равен также

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{vR}{V_1}, \quad (2.6.14)$$

где V_1 – исходный объем воздуха в сосуде. Поэтому, рассчитав $\operatorname{tg} \varphi$ для графика функции $p(T)$, можно определить также и значение универсальной газовой постоянной R при данном постоянном количестве воздуха, занимающего объем V_1 , как

$$R = \frac{V_1 \cdot \operatorname{tg} \varphi}{v}. \quad (2.6.15)$$

Количество вещества v в сосуде можно определить следующим образом. В соответствии с уравнением (2.6.11), термодинамические параметры исходного состояния (p_1 , V_1 , T_1) и параметры, соответствующие нормальным условиям ($p_0 = 10^5$ Па, V_0 , $T_0 = 273$ К), связаны между собой: $p_1 V_1 / T_1 = p_0 V_0 / T_0$. Так как $V_0 = v V_m$, где $V_m = 22,4$ л – объем одного моля газа, получаем:

$$v = \frac{p_1 V_1 T_0}{p_0 T_1 V_m}. \quad (2.6.16)$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Общий вид установки для экспериментального исследования газовых законов представлен на рис. 2.6.2.

Наблюдение изохорического процесса производится при зафиксированном поршне (т.е. поддерживая $V = \text{const}$) при включенном

нагревателе. При этом датчики давления и температуры автоматически фиксируют зависимость $p(T)$. Количество воздуха в шприце при этом остается неизменным, т.е. $v = \text{const}$.

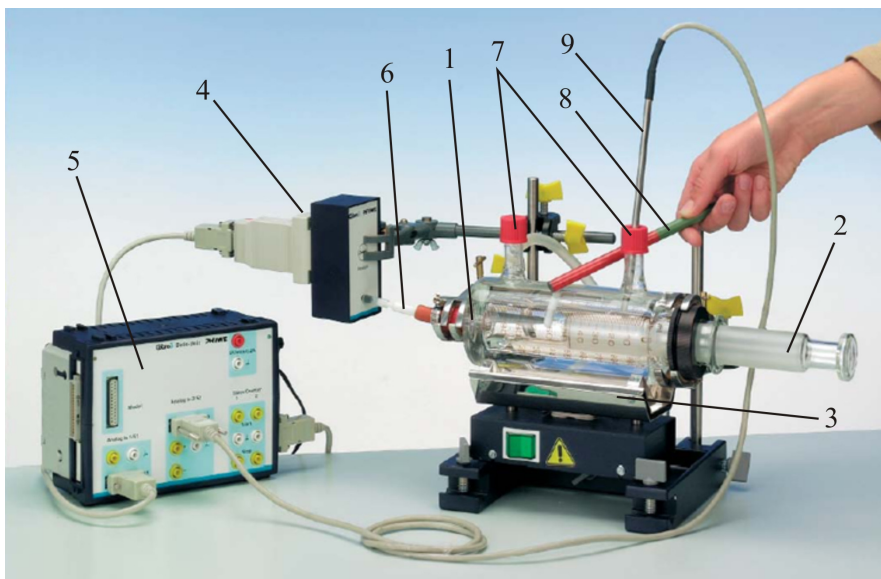


Рис. 2.6.2

В стеклянном корпусе 1 находится шприц с подвижным поршнем 2. Под стеклянным корпусом расположен нагревательный элемент 3. Короткая резиновая трубка-переходник 6 соединяет шприц с датчиком давления 4, который подключают к входу S1 базового блока «Кобра 3» 5. Датчик давления позволяет автоматически производить измерение давления во внутренней камере шприца. Через одно из отверстий 7 стеклянная емкость заполняется водой. В воду помещается магнитная мешалка. Поднося магнит 9, к стеклянному корпусу, можно обеспечивать равномерный прогрев воздуха во внутренней камере шприца. Во второе из отверстий 7, закрытое специальной пробкой, помещается термометрический датчик 9, подключенный к разъему S2 блока «Кобра 3».

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

В ходе работы вода, налитая в стеклянный корпус, установленный над нагревателем, нагревается до температуры 100 °С, поэтому существует опасность ожога.

Выполняя работу, следует:

быть внимательным, собранным и осторожным;

не делать резких движений;

не прикасаться к горячей поверхности нагревателя и к нагреваемому стеклянному корпусу с водой;

при возникновении опасных ситуаций немедленно обращаться к ведущему занятия преподавателю или дежурному сотруднику лаборатории.

ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

Прежде всего, следует подготовить к работе электронные приборы системы измерения температуры и давления.

Убедитесь, что персональный компьютер, входящий в состав лабораторной установки, включен и находится в режиме ожидания.

Убедитесь, что базовый блок «Кобра 3» включен (у включенного прибора светится зеленый светодиод в правом верхнем углу лицевой панели блока). Если вышеупомянутые устройства не включены, попросите сотрудников лаборатории подготовить их к работе.

Запустите программу для проведения измерений. Для этого на рабочем столе компьютера выберите ярлык программы «Phywe measure 4» (в виде желтой латинской буквы **m**). На экране возникнет диалоговое окно программы, обслуживающей измерения с помощью блока «Кобра 3».

В меню, расположенном в верхней части окна, выберите пункт «Прибор → Кобра3 Идеальный газ» и щелкните по нему левой кнопкой «мыши». На экране появится диалоговое окно для работы с измерителями температуры и давления, использующимся в данной работе. Окно содержит элементы управления, с помощью которых можно задавать режим измерений. В закладке «Каналы» установите настройки измерений в соответствии с рис. 2.6.3.

На рис. 2.6.3 показано окно настроек для изучения изохорического процесса.

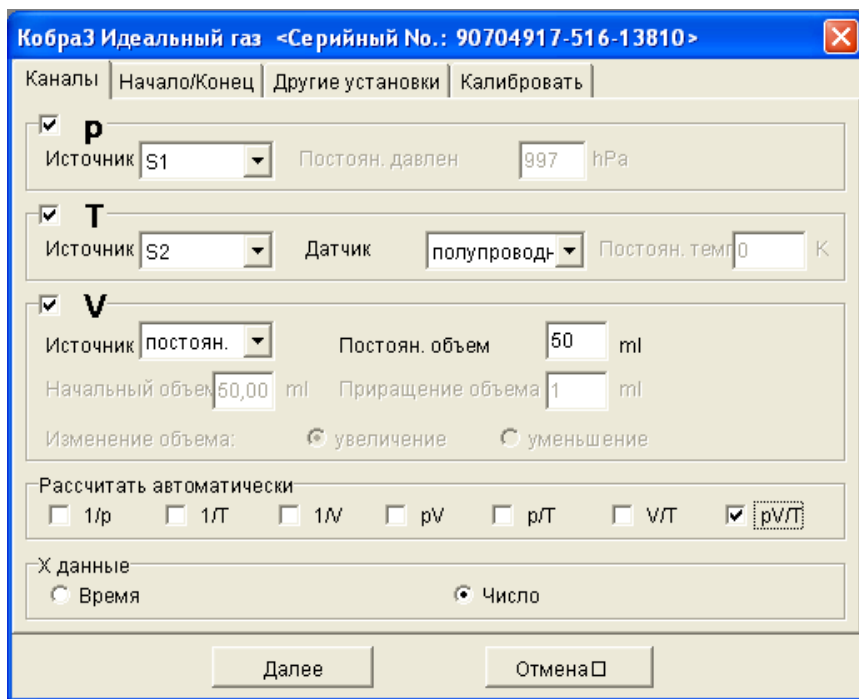


Рис. 2.6.3

В закладке «Начало/Конец» выберите «По нажатию клавиши».

В закладке «Другие установки» поставьте галочку в поле «Цифр. дисплей 1». В появившемся диалоговом окне «Канал» выберите «Давление p ». Затем поставьте галочку в поле «Цифр. дисплей 2». В появившемся окне выберите «Температура T ».

Поставьте галочку в поле «Диаграмма 1», затем в появившемся диалоговом окне «Параметры дисплея» заполните поля в соответствии с рис. 2.6.4. В разделе «Канал» в поле «Давление p » задается диапазон значений давления (рекомендуется установить от 900 до 1400). В разделе «ось X» в полях задается число измерений. Рекомендуется в качестве максимального значения выбрать 20. В поле «Режим» установите «не автодиапазон» (рис. 2.6.5).

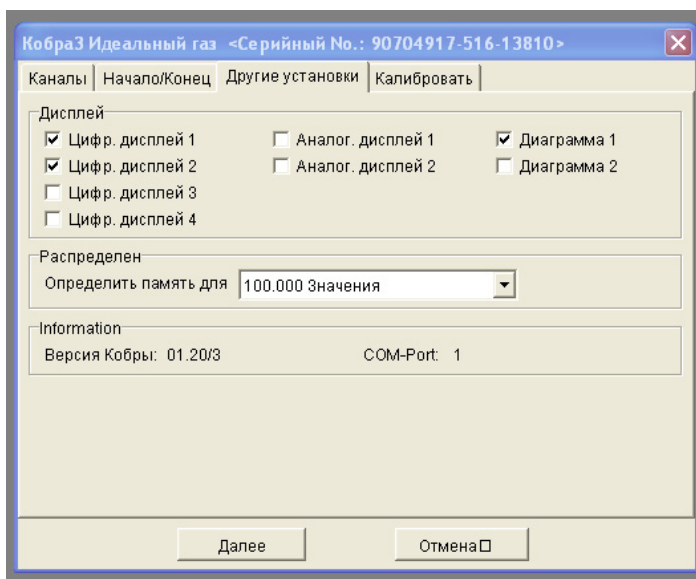


Рис. 2.6.4

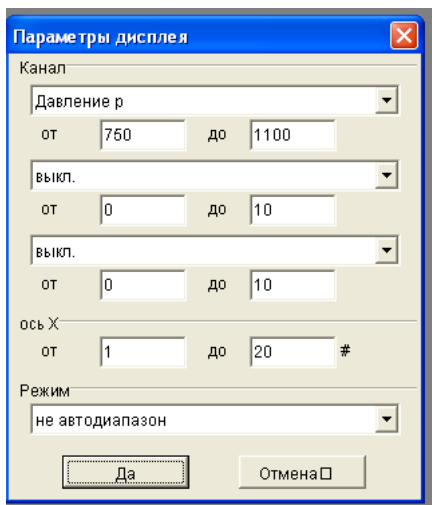


Рис. 2.6.5

Поместив стеклянную воронку в отверстие 7, заполните стеклянную емкость дистиллированной водой, поместите в воду магнитную мешалку, выньте воронку и закройте отверстие крышкой.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

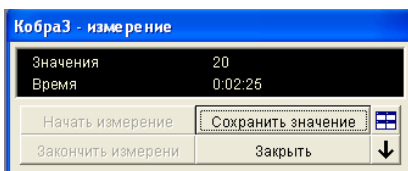
Убедитесь, что поршень 2 закреплен в положении $V_1 = 50$ мл. В обратном случае обратитесь к сотруднику лаборатории.

Откалибруйте датчик. Для этого в закладке «Калибровать» введите в соответствующие поля значения комнатной температуры и давления, измеренные термометром и барометром соответственно. Нажмите «Далее».

На экране появится четыре окна: «температура T », «давление p », «Измерение» и окно для построения графика. Расположите окна на экране в удобном порядке.

Сохраните исходные данные измерения температуры T_1 , p_1 , нажав кнопку «Сохранить значения» или Enter в окне «Измерения» (рис. 2.6.6).

Рис. 2.6.6



Рассчитайте число молей воздуха в шприце по формуле (2.6.16). Объем воздуха в шприце $V_1 = 50$ мл.

Внимание! При выполнении дальнейших действий будьте внимательны, собранны и аккуратны.

Включите плитку.

Примечание. В процессе измерений не забывайте перемешивать воду в стеклянном корпусе при помощи магнитной мешалки.

После каждого увеличения температуры на $\Delta T = 5$ К сохраняйте результаты измерения давления и температуры, нажимая кнопку «Сохранить значения» или Enter.

После достижения температуры 370 К выключите нагреватель.

По окончании измерений нажмите кнопку «Закреть» в окне «Измерения» (см. рис. 2.6.6). На экране появится окно с графиком зависимости p и T от числа измерений.

Вызовите контекстное меню, поместив курсор мыши в окно с графиками. Выберите «Таблица данных...». На экране появится таблица с результатами измерений.

Для сохранения изменений в другой программе в пункте меню выберите «Управление каналами → Экспорт данных» и поставьте метки в полях «Копировать в буфер» и «Экспортировать как число» (рис. 2.6.7).

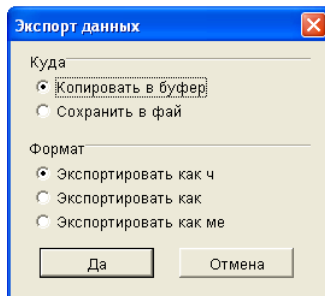


Рис. 2.6.7

Откройте программу, в которой будете обрабатывать данные, и нажмите «Вставить».

Постройте график зависимости $p(T)$.

Примечание. Для построения графиков можно воспользоваться возможностями программы Phyuwe measurе 4. Выберите пункт меню «Измерение → Управление каналами». Используя стрелки, заполните поля в окне «Управление каналами» (рис. 2.6.8).

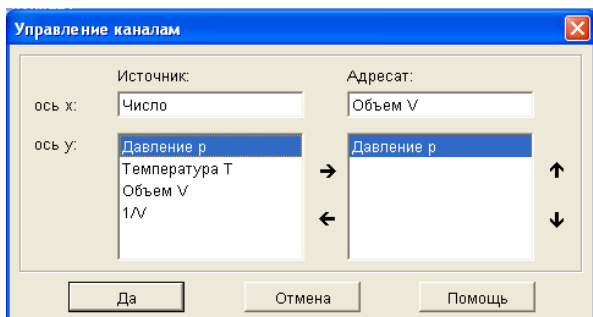


Рис. 2.6.8

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Определите тангенс угла наклона полученной прямой $p(T)$.

Рассчитайте универсальную газовую постоянную по формуле (2.6.15).

Постройте график зависимости pV/T от T для изохорического процесса. Сделайте вывод о характере зависимости.

Рассчитайте объем воздуха V_0 , соответствующий исследуемому числу молей газа при температуре 0°C .

По графику $p(T)$ экстраполяцией область значений $T = 273\text{ K}$ определите значение p_0 .

Рассчитайте термический коэффициент давления воздуха по формуле (2.6.13), используя рассчитанное значение $\tan \varphi$ для графика зависимости $p(T)$. Сравните полученный результат с теоретическим значением.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется термодинамическими параметрами системы?
2. Что такое идеальный газ? При каких условиях реальный газ можно считать идеальным?
3. Сформулируйте закон Бойля–Мариотта.
4. Сформулируйте закон Гей-Люссака.
5. Сформулируйте закон Шарля.
6. Что называется молем вещества?
7. Изобразите графики изотермического, изобарного и изохорического процессов на диаграммах $p(V)$, $p(T)$, $V(T)$.
8. Что называется уравнением состояния идеального газа?
9. Выведите законы Бойля–Мариотта, Гей-Люссака и Шарля из уравнения Менделеева–Клапейрона.
10. Объясните физический смысл термического коэффициента давления газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. М.: Наука, 1977.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. М.: Наука, 1990.

Работа 2.7

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Цель: экспериментальное определение C_V методом электрического нагревания.

Оборудование: сосуд объемом 10 л с вводом электронагревателя, 3-ходовой кран, масляный манометр, источник питания с встроенным измерителем временных интервалов, переключатель, вольтметр, миллиамперметр, соединительные провода.

ВВЕДЕНИЕ

Самый распространенный (хотя и не единственный) способ повышения (или понижения) температуры тела – подведение к нему (или отъем от него) некоторого количества тепла. Количественной характеристикой температурного «отклика» тела на подведенное тепло является теплоемкость этого тела в данном процессе подведения тепла:

$$C = \frac{d'Q}{dT},$$

где dT – приращение температуры, обусловленное сообщением телу элементарного количества тепла $d'Q$.

Согласно первому началу термодинамики подведенное тепло распределяется между приращением внутренней энергии тела dU и совершением данным телом работы над окружающими телами $d'A$:

$$d'Q = dU + d'A.$$

Элементарная работа в квазистатическом процессе расширения (или сжатия) газа может быть записана как $d'A = p \cdot dV$, где p – давление; dV – приращение объема газа.

Внутренняя энергия идеального газа U (*идеальный газ* – модель, которая с хорошей точностью описывает свойства большинства

реальных, т.е. наблюдаемых в природе, газов вблизи нормальных условий) пропорциональна абсолютной температуре T :

$$U = \frac{i}{2} \nu RT,$$

где ν – число молей газа; R – универсальная газовая постоянная; i – целочисленный параметр, определяемый числом степеней свободы молекул газа. Для атмосферного воздуха, состоящего в основном из жестких двухатомных молекул азота и кислорода, $i = 5$.

Таким образом, выражение для теплоемкости газа в произвольном квазистатическом процессе может быть записано в виде

$$C = \frac{\frac{i}{2} \nu R dT + p dV}{dT} = \frac{i}{2} \nu R + p \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_{pr}.$$

Значок « pr », стоящий у производной объема по температуре, указывает на то, что берется значение этой производной для конкретного процесса, протекающего в газе. В разных процессах зависимость объема газа от температуры может быть разной, соответственно, разными могут быть значения производной функции, выражающей эту зависимость, т.е. теплоемкость одного и того же газа в разных процессах имеет разные значения.

В настоящей работе для нас наиболее интересны два процесса: изохорический (протекающий при постоянном объеме) и изобарический (при постоянном давлении). В изохорическом процессе $V = \text{const}$, т.е. $\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_V = 0$, и теплоемкость идеального газа при постоянном объеме равна

$$C_V = \left(\frac{d'Q}{dT} \right)_V = \left(\frac{dU + p dV}{dT} \right)_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} \nu R. \quad (2.7.1)$$

Согласно уравнению состояния идеального газа (уравнению Клапейрона–Менделеева)

$$V = \frac{\nu RT}{p}.$$

Если давление газа поддерживается постоянным ($p = \text{const}$), то

$$\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p = \frac{\nu R}{p}$$

и выражение для теплоемкости идеального газа при постоянном давлении приобретает вид

$$C_p = \frac{i}{2} \nu R + \nu R = C_V + \nu R.$$

Настоящая работа посвящена измерению теплоемкости воздуха при постоянном объеме и сравнению измеренного значения с теоретическим значением, основанным на модели идеального газа.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ

Как показано во введении, для идеального газа

$$C_V = \frac{\Delta U}{\Delta T},$$

где ΔU и ΔT – малые приращения внутренней энергии и температуры соответственно. Это соотношение верно и для процессов, в которых меняются все параметры состояния идеального газа. При этом приращение температуры ΔT связано с приращениями объема ΔV и давления Δp , что позволяет предложить метод определения C_V без измерения величины ΔT .

Согласно первому началу термодинамики в любом квазистатическом процессе в газе $\Delta U = \Delta'Q - p\Delta V$. Из уравнения Клапейрона–Менделеева простым дифференцированием легко получить

$$\Delta T = \frac{1}{\nu R} (p\Delta V + V\Delta p),$$

и тогда выражение для молярной теплоемкости при постоянном объеме приобретает вид

$$C_V^{\text{мол}} = R \frac{\Delta'Q - p\Delta V}{p\Delta V + V\Delta p}. \quad (2.7.2)$$

В экспериментальной установке, используемой в данной работе (эта установка описана далее), тепло газу сообщается посредством кратковременного пропускания электрического тока через нагреватель-проводник, находящийся в газе, поэтому $\Delta'Q = U \cdot I \cdot \Delta t$, где U – электрическое напряжение на нагревателе; I – ток через нагреватель; Δt – время протекания тока.

Малые приращения давления газа в установке измеряются с помощью жидкостного (масляного) манометра: при повышении давления газа из-за полученного тепла газ частично вытесняет жидкость в манометре в наклонную трубку, при этом несколько увеличивается объем газа. Конструкция масляного манометра такова, что приращения давления и объема связаны простой зависимостью: $\Delta V = \alpha \cdot \Delta p$, причем $\alpha = 0,855 \text{ см}^3/\text{гПа}$ (гПа – гектопаскаль, $1 \text{ гПа} = 100 \text{ Па}$).

Подставив в формулу (2.7.2) вместо приращения объема ΔV его выражение через Δp , получим:

$$C_V^{\text{мол}} = R \left(\frac{UI}{(V + \alpha p) \frac{\Delta p}{\Delta t}} - \frac{\alpha p}{V + \alpha p} \right), \quad (2.7.3)$$

где U – напряжение на нагревателе, В; I – ток через нагреватель, А; V – объем сосуда, м^3 ; p – атмосферное давление, Па.

Таким образом, измерение молярной теплоемкости газа при постоянном объеме сводится к измерению величины $\Delta p/\Delta t$ – отношения приращения давления газа к времени работы нагревателя.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для измерения теплоемкости воздуха при постоянном объеме изображена на рис. 2.7.1.

Воздух, теплоемкость которого измеряется, заключен в сосуде 1, имеющем объем $V = 10 \text{ л}$. Сосуд сообщается через трехпозиционный кран 2 с масляным манометром 3. Шкала манометра – подвижная. Это дает возможность совмещать нулевую отметку шкалы с уровнем масла в капилляре. Тогда давление воздуха в сосуде будет соответствовать атмосферному. Горизонтальное положение манометра по уровню обеспечивается регулировочными винтами.

В нижней части сосуда смонтированы герметичные электрические вводы для подачи напряжения на спираль нагревателя 4. Там же установлен стеклянный кран 5 для сообщения сосуда с атмосферой.

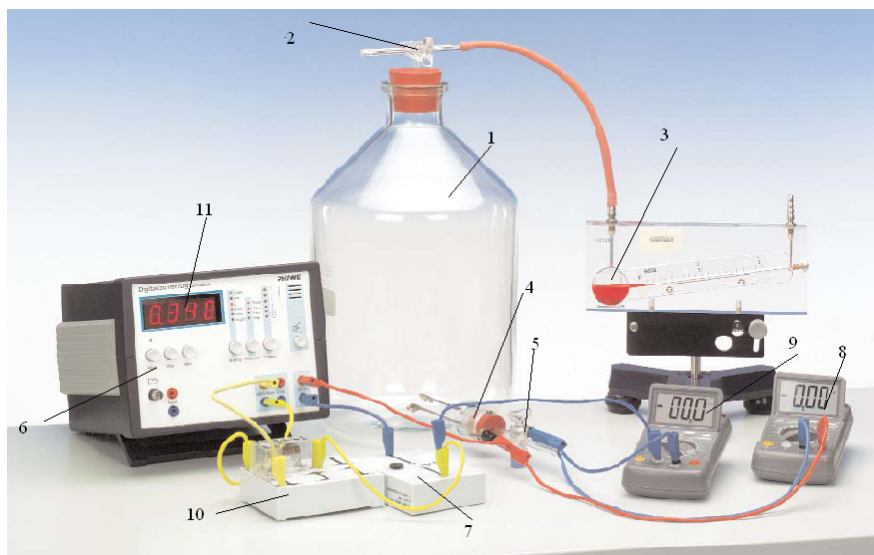


Рис. 2.7.1

Источник напряжения для питания нагревателя смонтирован внутри корпуса электронного блока 6. Нагреватель подключается к источнику питания и отключается от него переключателем 7. Напряжение на нагревателе и ток через нагреватель измеряются вольтметром 8 и амперметром 9 соответственно.

В корпусе электронного блока 6 смонтирован измеритель временных интервалов. Сигналы о начале и конце измеряемого интервала времени подаются на соответствующие входы на передней панели электронного блока через двухканальный переключатель 10. Длительность измеренного временного интервала высвечивается в цифровой форме на передней панели 11 корпуса электронного блока.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

В установке отсутствуют высоковольтные, высоко- и низкотемпературные элементы, поэтому достаточно руководствоваться ин-

струкцией по технике безопасности, изученной на вводном занятии в лаборатории. Все электрические соединения выполнены персоналом лаборатории при монтаже установки, и студентам изменять их при выполнении работы не следует.

Рукоятку стеклянного крана следует вращать плавно и осторожно, не прилагая чрезмерных усилий.

ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Подготовка установки к измерениям

1. Убедитесь, что ручка переключателя 7 находится в положении 1 (выключено).

2. Убедитесь, что нижний кран 5 закрыт, а кран 2 находится в нейтральном положении, при котором в сосуде и манометре устанавливается атмосферное давление.

3. Убедитесь, что уровень масла в манометре соответствует нулевой отметке шкалы.

4. Включите электронный блок 6 (переключатель расположен на задней панели прибора). Кнопкой «Function» установите режим измерения времени «Timer» (ms). Нажимая несколько раз кнопку «Trigger», установите режим запуска. Нажмите кнопку «Reset».

5. Включите амперметр и вольтметр нажатием кнопки «Power». Установите пределы измерений 20 А и 20 В.

Задание 2. Измерение приращения давления воздуха в сосуде при кратковременном нагревании

1. Нажмите кнопку «Start» измерителя временных интервалов.

2. Поверните верхний кран на 90 град. против часовой стрелки (при этом сосуд с воздухом будет соединен только с манометром) и кратковременно, примерно на 0,5–1 с, включите нагрев спирали, переведя ручку переключателя П в положение 2, и быстро верните в исходное положение 1.

3. Запишите показания манометра Δp и измерителя временных интервалов Δt в заранее подготовленную табл. 2.7.1.

4. Нажмите кнопку «Reset» на электронном блоке и установите верхний кран на сосуде в нейтральное положение (при этом давле-

ние в сосуде сравнивается с атмосферным и масляный манометр устанавливается в нулевое положение).

Таблица 2.7.1

№	Δp , мбар	Δt , мс	$\Delta p/\Delta t$, Па/с
1			
2			
3			

5. Повторите пп. 1–4 не менее 10 раз, записывая результаты в табл. 2.7.1. При этом не стремитесь к тому, чтобы интервалы времени Δt были одинаковыми. Определенный разброс значений Δt вполне допустим и даже желателен, близкими друг к другу должны оказаться значения отношения $\Delta p/\Delta t$.

6. После завершения серии измерений включите нагреватель и запишите в лабораторный журнал показания амперметра I и вольтметра U , после чего нагреватель отключите.

7. Запишите в лабораторный журнал величину атмосферного давления p , измеренную с помощью барометра, висящего на стене лаборатории.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Для всех выполненных измерений рассчитайте и запишите в табл. 2.7.1 величину $\Delta p/\Delta t$. При этом используйте соотношение $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.

2. Методом Корнфельда вычислите среднее значение

$$\left\langle \frac{\Delta p}{\Delta t} \right\rangle = \frac{(\Delta p/\Delta t)_{\max} + (\Delta p/\Delta t)_{\min}}{2}$$

и погрешность

$$\Delta \left(\frac{\Delta p}{\Delta t} \right) = \frac{(\Delta p/\Delta t)_{\max} - (\Delta p/\Delta t)_{\min}}{2}.$$

3. По формуле (2.7.3) вычислите значение теплоемкости воздуха при постоянном объеме C_V . При расчете не забудьте перевести

значения коэффициента α в единицы $\text{м}^3/\text{Па}$, а атмосферное давление p – в паскали.

4. Вычислите абсолютную погрешность измеренного значения теплоемкости по формуле:

$$\Delta C_V = \frac{R \cdot I \cdot U}{(V + \alpha p) \langle \Delta p / \Delta t \rangle^2} \cdot \Delta(\Delta p / \Delta t).$$

5. Вычислите доверительную вероятность, соответствующую найденному доверительному интервалу:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1},$$

где n – число выполненных измерений.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам проделанной работы напишите в лабораторном журнале заключение, в котором:

1) укажите, что (какая физическая величина) измерялось в данной работе;

2) укажите, каким методом выполнялись измерения;

3) приведите полученное в работе значение молярной теплоемкости C_V с погрешностью и доверительной вероятностью, соответствующей представленному доверительному интервалу;

4) по формуле (2.7.1) рассчитайте теоретическое значение C_V для воздуха и сравните его с результатом своего измерения (если различие экспериментального и теоретического значения выходит за пределы погрешности измерения, обсудите возможные причины этого расхождения);

5) обсудите точность измерений и природу погрешности, с которой измерена теплоемкость в данной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение молярной теплоемкости идеальных газов.
2. Что такое теплоемкость газа при постоянном объеме?
3. При каких условиях для реальных газов можно использовать уравнение состояния идеального газа?

4. При каких условиях теплоемкость C_V зависит от температуры?
5. Чему равно теоретическое значение C_V воздуха и как оно определяется?
6. Какой метод определения C_V воздуха используется в работе?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. М.: Наука, 1998.
2. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2006.
2. Калашников Н.П., Смондырев М.А. Основы физики. В 2 т. Т. 1. М.: Дрофа, 2007.

Работа 2.8

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЕМКОСТИ МЕТАЛЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТАНОВКИ «КОБРА 3»

Цель: измерение теплоемкости алюминия, железа и меди, по результатам проведенных экспериментов проверка справедливость закона Дюлонга–Пти.

Оборудование: калориметр, термометрический датчик, нагреватель, металлические образцы, химический стакан, штатив, блок «Кобра 3», персональный компьютер, электронные весы.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейший из параметров состояния любого термодинамического тела – температура – может изменяться при обмене энергией между рассматриваемым телом и окружающей его средой, в частности при обмене теплом. *Теплоемкостью тела* называют отношение элементарного количества тепла $d'Q$, полученного телом, к приращению температуры тела dT , вызванному получением этого количества тепла:

$$C = d'Q / dT .$$

Теплоемкость конкретного тела определяется химической природой и физическим состоянием вещества, из которого состоит тело, его массой и характером процесса, в ходе которого тело получает тепло.

Чтобы избавиться от зависимости теплоемкости от массы, вводят удельную теплоемкость (теплоемкость единицы массы вещества)

$$c = \frac{1}{m} \frac{d'Q}{dT}$$

и молярную теплоемкость (теплоемкость одного моля вещества)

$$C_m = \frac{M}{m} \frac{d'Q}{dt} .$$

Согласно первому началу термодинамики полученное телом тепло идет на приращение внутренней энергии тела dU и на совершение работы над окружающими телами:

$$d'Q = dU + d'A.$$

Если процесс, в ходе которого тело получает тепло, равновесный (квазистатический), и если в ходе этого процесса изменяется объем тела, то выражение для элементарной работы имеет вид

$$d'A = p dV,$$

где p – давление, оказываемое рассматриваемым телом на окружающие тела; dV – приращение объема тела.

Внутренняя энергия в общем случае зависит от температуры и объема тела:

$$U = U(T, V).$$

В некоторых случаях, например в случае идеального газа, внутренняя энергия определяется только температурой и от объема не зависит:

$$U_{\text{иг}} = U_{\text{иг}}(T).$$

Таким образом, теплоемкость, т.е. температурный «отклик» на подведенное тепло, определяется тем, в каком соотношении это тепло распределяется между приращением внутренней энергии и совершением работы. Это распределение подведенного тепла зависит от того, насколько меняется объем тела в процессе подведения тепла, т.е. теплоемкость определяется, кроме всего прочего, характером термодинамического процесса, совершаемого телом.

Поскольку объем газов может меняться в очень широких пределах, зависимость величины теплоемкости от характера процесса для газообразных веществ оказывается существенной. В то же время изменение объема конденсированных (жидких и твердых) тел при нагревании пренебрежимо мало, из-за чего зависимость теплоемкости от характера процесса незаметна. Поэтому говорят просто о теплоемкости конденсированных тел без оговорок о характере процесса. Однако теплоемкость конденсированных тел не является постоянной величиной, она зависит от температуры. Измерения показывают, что для химически простых кристаллических тел (например, металлических) эта зависимость имеет характерный вид (рис. 2.8.1, где Θ_D – так называемая характеристическая температура, ее значения различны для различных веществ). При низких

температурах теплоемкость весьма сильно зависит от температуры, при сравнительно высоких температурах «выходит на плато», т.е. остается постоянной при изменениях температуры. Примечательным является тот факт, что *максимальное (высокотемпературное) значение молярной теплоемкости химически простых кристаллических тел оказывается одинаковым для тел разной химической природы и равно примерно $C_{\text{мол}} \approx 25$ Дж/(моль·К)*. Этот факт был экспериментально установлен в 1819 г. французскими физиками П.Л. Дюлонгом и А.Т. Пти и носит название закона Дюлонга и Пти. Температурная зависимость теплоемкости кристаллов была теоретически объяснена в 1912 г. голландским физиком П. Дебаем на основе квантовых представлений о колебаниях кристаллической решетки (квантовая теория теплоемкости Дебая).

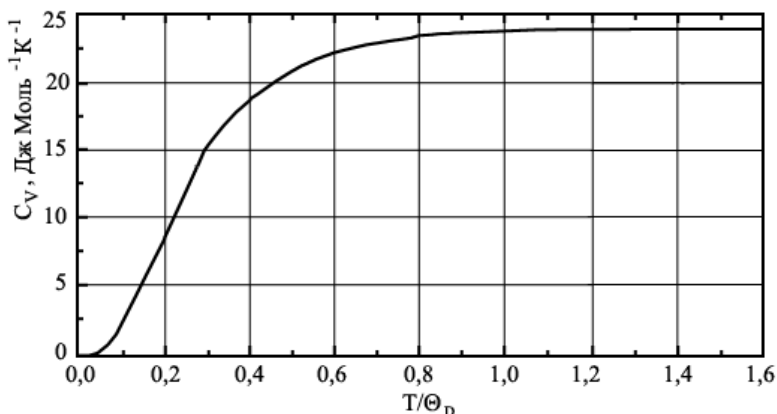


Рис. 2.8.1

Настоящая лабораторная работа посвящена измерению теплоемкости ряда простых веществ (алюминия, меди и железа) и проверке закона Дюлонга и Пти.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОЕМКОСТИ

Применяемый в данной работе метод измерения теплоемкости состоит в следующем. Образец (тело, теплоемкость которого измеряется) массой $m_{\text{обр}}$ нагревают до некоторой заданной начальной

температуры $T_{\text{обр}}$ (например, температуры кипения воды при атмосферном давлении, $100\text{ }^{\circ}\text{C} = 373\text{ K}$). Нагретый образец помещают в калориметр (теплоизолированный сосуд с водой), имеющий некоторую начальную температуру $T_{\text{нач}}$. В результате теплообмена образец остывает, а корпус калориметра и содержащаяся в нем вода нагреваются, и через некоторое время в калориметре, содержащем образец, устанавливается термическое равновесие, при котором образец, корпус калориметра и содержащаяся в нем вода имеют общую температуру $T_{\text{рав}}$. Измерив эту температуру, легко рассчитать удельную теплоемкость материала образца $c_{\text{обр}}$.

Теплоемкость корпуса калориметра $C_{\text{кал}}$ будем предполагать измеренной ранее и известной (в данной установке $C_{\text{кал}} = 80\text{ Дж/К}$). Количество тепла, отданное образцом в процессе установления равновесия, может быть записано следующим образом:

$$Q_{\text{отд. обр}} = m_{\text{обр}} \cdot c_{\text{обр}} \cdot (T_{\text{обр}} - T_{\text{рав}}).$$

Количество тепла, полученное водой и корпусом калориметра:

$$Q_{\text{пол. кал}} = c_{\text{кал}} \cdot (T_{\text{рав}} - T_{\text{нач}}) + m_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot (T_{\text{рав}} - T_{\text{нач}}),$$

где $m_{\text{в}}$ и $c_{\text{в}}$ – масса воды и удельная теплоемкость воды соответственно. Приравнявая эти количества тепла друг другу, получаем уравнение относительно искомой величины $c_{\text{обр}}$, решение которого имеет вид

$$c_{\text{обр}} = \frac{C_{\text{кал}} + m_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}}}{m_{\text{обр}}} \cdot \frac{T_{\text{рав}} - T_{\text{нач}}}{T_{\text{обр}} - T_{\text{рав}}}. \quad (2.8.1)$$

Измерительная система, используемая в настоящей работе, позволяет в автоматическом режиме измерить зависимость от времени температуры воды в калориметре после погружения в нее нагретого образца. По графику этой зависимости, выведенному на экран монитора, можно определить начальную температуру воды $T_{\text{нач}}$ и конечную (после установления равновесия в калориметре) $T_{\text{рав}}$ и затем вычислить удельную теплоемкость материала образца по формуле (2.8.1).

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Общий вид установки для измерения теплоемкости металлических образцов представлен на рис. 2.8.2.



Рис. 2.8.2

В центре установки расположен калориметр *1*, в который погружен закрепленный на штативе *2* термометрический датчик *3*. Правее калориметра расположен штатив *4*, на котором установлен химический стакан с водой *5*, в воду погружен металлический образец *6* в виде трех брусков, соединенных в гирлянду отрезком проволоки. Под стаканом с водой расположен нагреватель *7*. На рисунке представлен нагреватель в виде газовой горелки, но в зависимости от комплектации нагревателем может служить либо спиртовая горелка, либо электрический нагреватель. Термометрический датчик *3* подключен к базовому блоку «Кобра 3» *8*, который служит для преобразования сигнала термометрического датчика в

цифровую форму и для связи с персональным компьютером (компьютер на рис. 2.8.2 не представлен). Значения температуры из блока «Кобра 3» передаются в компьютер, где специально созданная для данной лабораторной работы программа визуализирует зависимость температуры от времени и фиксирует значения температуры, необходимые для нахождения теплоемкости образцов.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

В ходе работы вода, налитая в стакан, установленный на нагревателе, и погруженные в воду образцы нагреваются до температуры 100 °С, поэтому существует опасность ожога.

Выполняя работу, следует:

- быть внимательным, собранным и осторожным;
- не делать резких движений;
- не прикасаться к горячей поверхности нагревателя и к нагреваемому стакану с водой;
- перемещая нагретые образцы из стакана в калориметр, не прикасаться образцами к стенкам стакана, чтобы не опрокинуть или не разбить стакан с кипятком;
- при возникновении опасных ситуаций немедленно обращаться к ведущему занятия преподавателю или дежурному сотруднику лаборатории.

ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

Прежде всего следует подготовить к работе электронные приборы системы измерения температуры.

1. Убедитесь, что персональный компьютер, входящий в состав лабораторной установки, включен и находится в режиме ожидания.
2. Убедитесь, что базовый блок «Кобра 3» включен (у включенного прибора светится зеленый светодиод в правом верхнем углу лицевой панели блока). Если вышеупомянутые устройства не включены, попросите сотрудников лаборатории подготовить их к работе.
3. Найдите на рабочем столе компьютера иконку в виде желтой латинской буквы **m** с надписью «Измерение» и дважды щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране возникнет диалоговое

окно программы, обслуживающей измерения с помощью блока «Кобра 3», с заголовком «Phywe measure 4».

4. В меню, расположенном в верхней части окна, найдите опцию «Прибор» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране появится «выпадающее» меню, в котором перечислены программы, управляющие различными измерительными приборами, входящими в комплект оборудования от фирмы Phywe.

5. Найдите в этом меню строку «Кобра3 – Температура» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране появится настроечное окно для работы с измерителем температуры, использующимся в данной работе (рис. 2.8.3). Окно содержит элементы управления, с помощью которых можно задавать режим измерений. По умолчанию при запуске программы устанавливаются значения параметров, необходимые для выполнения данной работы, так что менять эти установки не следует.

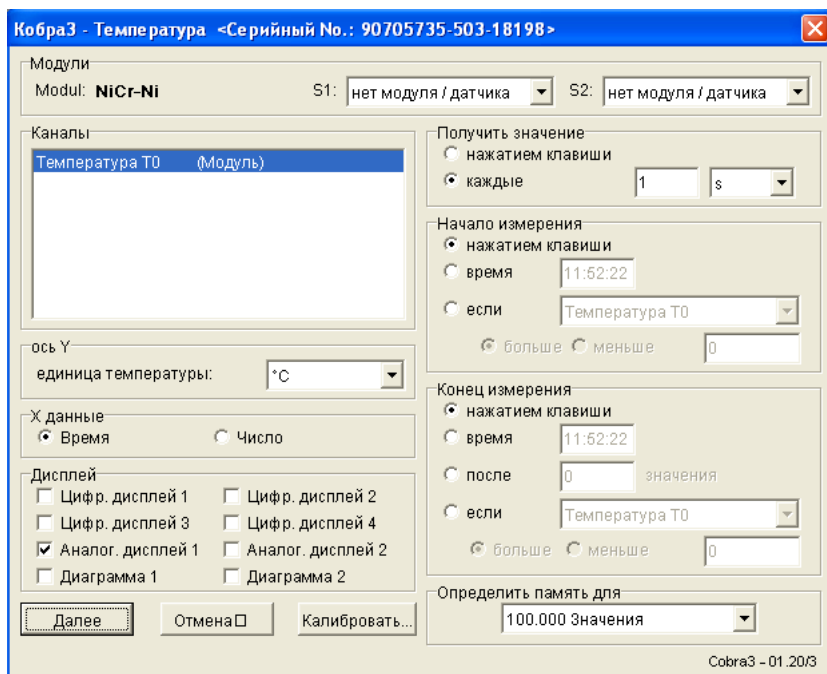


Рис. 2.8.3

Теперь следует подготовить к работе физическую часть лабораторной установки.

6. С помощью мерного стакана налейте в калориметр 300 мл воды из-под крана. Объем налитой в калориметр воды запишите в заранее подготовленную табл. 2.8.1 в лабораторном журнале.

7. Выберите (согласовав с преподавателем) одну из связок предлагаемых в работе образцов, взвесьте ее с помощью электронных весов, стоящих на лабораторном столе, массу образца запишите в табл. 2.8.1.

8. Убедитесь, что химический стакан (5 на рис. 2.8.2) наполнен водой примерно на $\frac{2}{3}$ объема. При необходимости попросите сотрудников лаборатории долить воды.

9. Связку образцов повесьте на горизонтальный фиксатор штатива 4 так, чтобы образцы оказались полностью погруженными в воду.

10. В левом нижнем углу главного настроечного окна термодатчика на экране монитора (см. рис. 2.8.3) найдите клавишу «Далее» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». Настроечное окно исчезнет с экрана, вместо него появятся два других. Одно из них – информационное, на нем индицируется значение температуры воды в калориметре, измеряемое термодатчиком. Второе – малых размеров окошко с заголовком «Кобра3 – измерение» – предназначено для запуска процесса измерения зависимости температуры от времени. Пронаблюдайте за показаниями термодатчика на экране дисплея и убедитесь, что эти показания остаются постоянными с точностью до десятых долей градуса.

11. Зажгите горелку 7, расположенную под стаканом 5, (или включите электронагреватель) и нагрейте воду в стакане с погруженной в нее связкой образцов до кипения.

Таблица 2.8.1

Объем воды в калориметре, мл	
Масса воды в калориметре, кг	
Масса образца, кг	

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1.левой кнопкой «мыши» щелкните по кнопке «Начать измерение» на малом окошке «Кобра3 – измерение». С этого момента

запись зависимости температуры воды в калориметре от времени началась.

2. Подождите 5–10 с, чтобы образец полностью прогрелся до температуры кипящей воды.

3. Выключите нагреватель воды.

4. Осторожно извлеките образец из сосуда с кипящей водой и поместите его в калориметр. Проследите, чтобы образец был полностью погружен в воду и не касался температурного датчика в калориметре.

5. Следите за повышением температуры в калориметре по показаниям изображения стрелочного прибора на дисплее компьютера. Периодически (два раза в минуту) помешивайте воду в калориметре легкой пластмассовой ложечкой.

6. Когда температура перестанет расти и даже обнаружит тенденцию к снижению, щелкните левой кнопкой «мыши» по клавише «Прекратить измерения». На экране появится график зависимости температуры воды в калориметре от времени (рис. 2.8.4).

7. Попросите преподавателя, ведущего занятия в вашей подгруппе, оценить график. Если график будет признан неудовлетворительным, измерение придется повторить.

8. В случае одобрения графика преподавателем следует определить численные значения $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{рав}}$. Для этого найдите на панели инструментов (в верхней части экрана, справа) иконку в виде белого прямоугольника, ограниченного жирной черной линией. Щелкните по этой иконке левой кнопкой «мыши» и на экране (поверх графика) появится прямоугольник, две вершины которого, лежащие на одной диагонали, обозначены цифрами «1» и «2», а в верхней правой части экрана появится окошко, где представлены координаты этих вершин в единицах, которые отложены по осям графика. Там же приведены значения разностей одноименных координат вершин.

9. Если подвести к одной из этих вершин курсор «мыши», то, нажав и удерживая нажатой левую кнопку, можно перемещать эту вершину по экрану с помощью «мыши». Добейтесь такого положения прямоугольника, при котором его нижняя горизонтальная сторона соответствует температуре $T_{\text{нач}}$, а верхняя – температуре $T_{\text{рав}}$ (рис. 2.8.5).

10. Запишите в первую строку табл. 2.8.2 в своем лабораторном журнале высвеченные на экране значения $T_{\text{нач}}$ и $T_{\text{рав}}$.

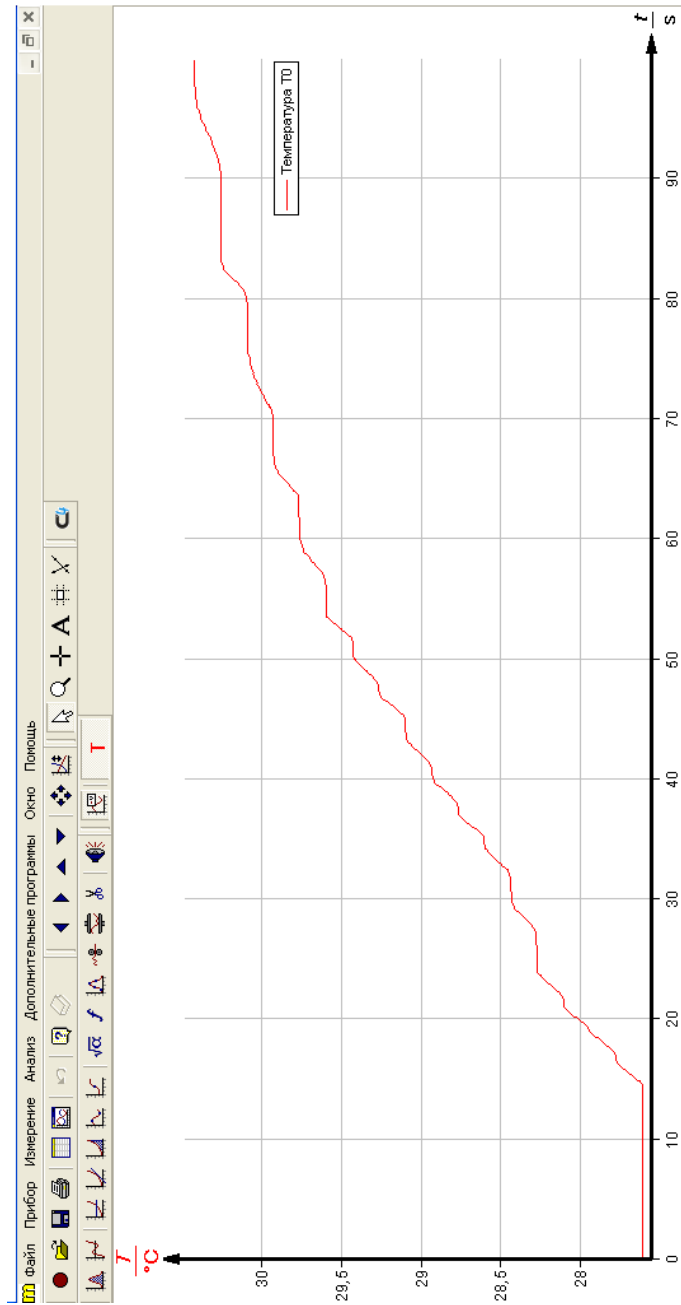


Рис. 2.8.4

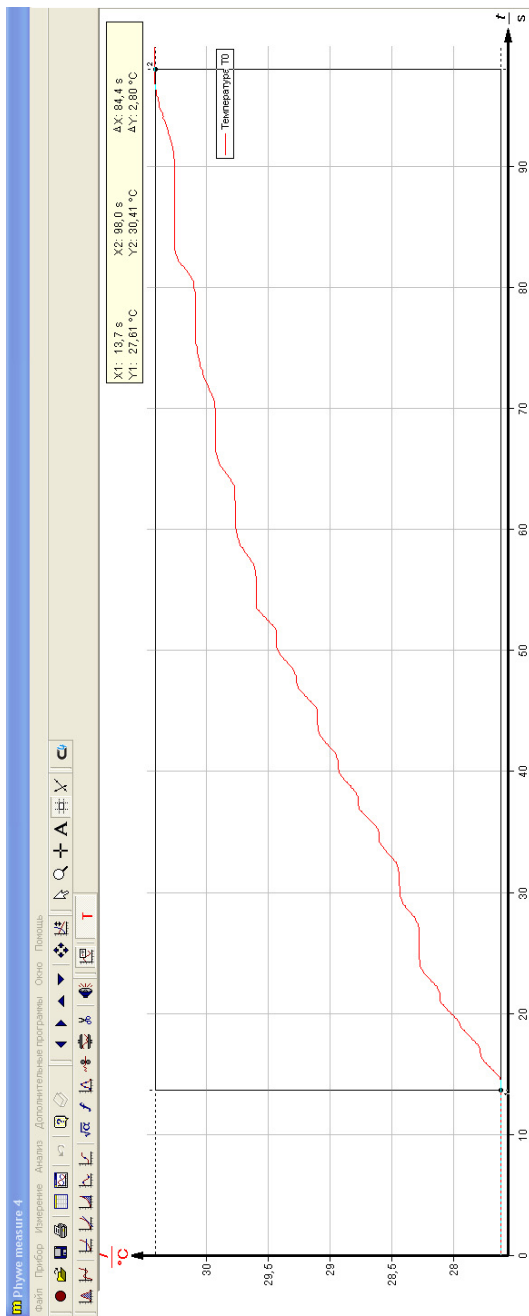


Рис. 2.8.5

Таблица 2.8.2

Номер измерения	$T_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{рав}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T = T_{\text{рав}} - T_{\text{нач}}, ^\circ\text{C}$	$C, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
1				
2				
3				

Выполните измерение удельной теплоемкости того же образца еще два раза. Для этого:

- извлеките связку с образцами из калориметра и поместите его в химический стакан с водой, стоящий на нагревателе, включите нагреватель;
- в верхней строке меню на экране дисплея компьютера выберите пункт «Файл» (крайняя левая позиция), щелкните по нему «мышью», на выпавшем меню выберите верхнюю строку («Новое измерение»);
- когда вода с погруженным в нее образцом закипит, выполните пп. 1–10 раздела «Порядок выполнения работы».

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Вычислите значения теплоемкости образца для всех выполненных измерений по формуле (2.8.1), используя данные, занесенные в табл. 2.8.1 и 2.8.2, и значение теплоемкости калориметра $C_{\text{кал}} = 80 \text{ Дж/К}$.

2. Обработайте результаты измерений по методу Корнфельда, а именно:

вычислите среднее значение теплоемкости образца по формуле

$$\langle c \rangle = \frac{c_{\text{max}} + c_{\text{min}}}{2},$$

где c_{max} и c_{min} – максимальное и минимальное значение теплоемкости из табл. 2.8.2 соответственно;

вычислите полуширину доверительного интервала для теплоемкости по формуле

$$\Delta c = \frac{c_{\text{max}} - c_{\text{min}}}{2};$$

вычислите доверительную вероятность, соответствующую найденному доверительному интервалу:

$$\alpha = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1}.$$

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам проделанной работы напишите в лабораторном журнале заключение, в котором:

- 1) укажите, что (какая физическая величина) измерялось в данной работе;
- 2) укажите, каким методом выполнялись измерения;
- 3) приведите полученное в работе значение удельной теплоемкости с погрешностью и доверительной вероятностью, соответствующей представленному доверительному интервалу;
- 4) по справочным таблицам определите (и укажите в заключении) материал, из которого изготовлены экспериментальные образцы, использовавшиеся в данной работе;
- 5) обсудите точность измерений и природу погрешности, с которой измерена теплоемкость в данной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение теплоемкости термодинамического тела, молярной и удельной теплоемкости вещества.
2. Зависит ли теплоемкость тела от характера процесса, в ходе которого тело получает тепло?
3. Какова причина зависимости теплоемкости от характера процесса?
4. Возможно ли отрицательное значение теплоемкости? При каких условиях оно возникает?
5. Существенна ли зависимость теплоемкости от характера процесса в случае конденсированных тел?
6. Изобразите примерный вид графика зависимости теплоемкости химически простого кристаллического тела от температуры.
7. В чем состоит закон Дюлонга и Пти?

8. Предполагая известной зависимость теплоемкости тела от температуры $C(T)$, напишите выражение для количества тепла, которое необходимо сообщить телу для нагревания его от температуры T_1 до температуры T_2 .

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3. Молекулярная физика и термодинамика. М.: Астрель, АСТ, 2003.
2. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2006.

Работа 2.9

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЛЕКУЛ ГАЗА ПО СКОРОСТЯМ

Цель: изучение распределения молекул идеального газа по скоростям и его основных характеристик.

Оборудование: установка для моделирования теплового движения, источник питания, стеклянные шарики, стальные шарики, строботахометр, пробирки, линейка, миллисекундомер, кисточка.

ВВЕДЕНИЕ

Функция распределение молекул идеального газа по скоростям. Молекулы идеального газа находятся в непрерывном беспорядочном движении. Сталкиваясь друг с другом и со стенками сосуда, они меняют свою скорость, как по направлению, так и по величине. Однако если газ находится в равновесном состоянии, то термодинамические параметры газа остаются неизменными, а такое возможно только при наличии равновесного распределения молекул газа по скоростям. Это распределение должно оставаться неизменным во времени и однородным в пространстве, что позволяет оставаться неизменными во времени и пространстве таким термодинамическим параметрам, как температура и давление. Такое распределение было впервые получено Дж. Максвеллом в 1859 г.

В этой модели газ рассматривается как совокупность большого числа одинаковых абсолютно упругих молекул, находящихся в сосуде с заданной температурой стенок. Для данного газа можно определить среднее число молекул, скорости которых лежат в интервале скоростей от \vec{v} до $\vec{v} + d\vec{v}$. Если полное число частиц в сосуде N , то число частиц dN , имеющих скорости в интервале $d\vec{v}$, определяется выражением

$$dN = NF(\vec{v})d\vec{v}, \quad (2.9.1)$$

где $F(\vec{v})$ – функция распределения молекул по скоростям, а $d\vec{v} = dv_x dv_y dv_z$ – элемент объема в пространстве скоростей. Тогда

вероятность $dP(\vec{v}, \vec{v} + d\vec{v})$ того, что молекула имеет скорость, лежащую в интервале от \vec{v} до $\vec{v} + d\vec{v}$, определяется отношением числа частиц удовлетворяющих условию к полному числу частиц

$$dP(\vec{v}, \vec{v} + d\vec{v}) = \frac{dN}{N} = F(\vec{v}) d\vec{v}. \quad (2.9.2)$$

В одномерном случае вероятность $dP(v_x, v_x + dv_x)$ того, что составляющая скорости молекулы, попадает в интервал от v_x до $v_x + dv_x$ должна, аналогично предыдущему случаю, быть пропорциональна ширине рассматриваемого интервала, причем коэффициент пропорциональности $\phi(v_x)$ должен зависеть от величины v_x , т.е.

$$dP(v_x, v_x + dv_x) = \phi(v_x) dv_x, \quad (2.9.3)$$

где $\phi(v_x)$ – одномерная функция распределения молекул газа по проекции скорости на ось x . Зная функцию распределения молекул по проекции скорости на ось x , можно найти вероятность $P(v_{x1} < v_x < v_{x2})$ того, что проекция скорости лежит в произвольном интервале от v_{x1} до v_{x2} :

$$P(v_{x1} < v_x < v_{x2}) = \int_{v_{x1}}^{v_{x2}} \phi(v_x) dv_x. \quad (2.9.4)$$

Вероятность того, что проекция скорости молекулы может принять хотя бы какое-нибудь значение из всех возможных – достоверное событие, поэтому

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(v_x) dv_x = 1. \quad (2.9.5)$$

Это соотношение называется *условием нормировки*.

Вероятность того, что значение скорости лежит в интервале от \vec{v} до $\vec{v} + d\vec{v}$, связана с вероятностями того, что проекции скорости на оси x , y и z лежат, соответственно, в интервалах от v_x до $v_x + dv_x$, от v_y до $v_y + dv_y$ и от v_z до $v_z + dv_z$, следующим соотношением

$$dP(\vec{v}, \vec{v} + d\vec{v}) = dP(v_x, v_x + dv_x) \times \\ \times dP(v_y, v_y + dv_y) dP(v_z, v_z + dv_z). \quad (2.9.6)$$

Оси декартовой системы координат равноправны, поэтому функции распределения молекул по проекциям скорости на все оси декартовой системы координат должны определяться одинаковыми функциями. Тогда для функций распределения должно выполняться следующее соотношение

$$F(\vec{v}) = \varphi(v_x) \varphi(v_y) \varphi(v_z). \quad (2.9.7)$$

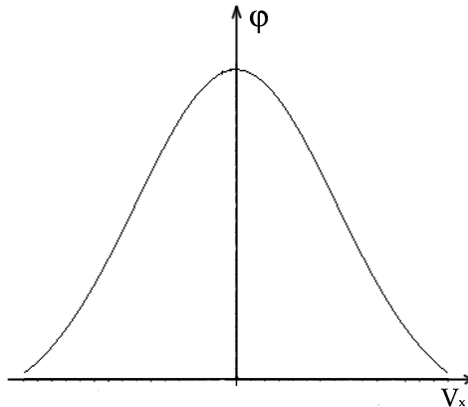
Используя данное соотношение, можно получить для функции распределения по проекции скорости следующий вид:

$$\varphi(v_x) = A \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right). \quad (2.9.8)$$

Из условия нормировки для коэффициента A получается выражение

$$A = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}.$$

Рис. 2.9.1



Таким образом, нормированная функция распределения по проекции скорости на ось x имеет вид

$$\varphi(v_x) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right). \quad (2.9.9)$$

Полученная функция – четная, ее вид приведен на рис. 2.9.1.

Тогда для функции распределения по скоростям из соотношения (2.9.7) следует

$$\begin{aligned} F(\vec{v}) &= \left(\sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}\right)^3 \exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right) \times \\ &\times \exp\left(-\frac{mv_y^2}{2kT}\right) \exp\left(-\frac{mv_z^2}{2kT}\right) = \\ &= \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right). \end{aligned} \quad (2.9.10)$$

Полученная функция уже удовлетворяет условию нормировки, т.е. $\int F(\vec{v}) d\vec{v} = 1$.

Функция распределение молекул идеального газа по модулю скорости. Полученная функция распределения молекул по скорости зависит только от модуля скорости, что позволяет легко получить функцию распределения молекул по абсолютному значению скорости (по модулю скорости). Для этого запишем элемент объема в пространстве скоростей в сферической системе координат

$$d\vec{v} = v^2 \sin\theta dv d\theta d\varphi$$

и проинтегрируем функцию распределения молекул по скорости по полярному и азимутальному углам. Это отвечает тому, что проводим суммирование по всем возможным направлениям вектора скорости, оставляя для модуля скорости возможными значения в пределах от v до $v + dv$. После интегрирования получаем для вероятности $dP(v, v + dv)$ молекуле иметь модуль скорости, лежащий в пределах интервала dv ,

$$dP(v, v + dv) = F(\vec{v}) 4\pi v^2 dv. \quad (2.9.11)$$

Отношение вероятности к ширине интервала определяет функцию распределения молекул по модулю скорости

$$F(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) 4\pi v^2. \quad (2.9.12)$$

Условие нормировки для данной функции также выполняется автоматически, вид функции приведен на рис. 2.9.2.

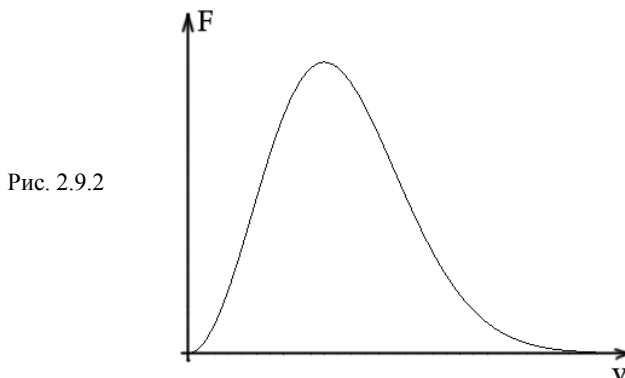


Рис. 2.9.2

Распределение Максвелла является статистическим законом, т.е. его точность возрастает при увеличении числа частиц в исследуемом газе.

Характерные скорости распределения Максвелла. Распределение молекул и по проекции скорости, и по ее модулю можно характеризовать несколькими характерными скоростями: наиболее вероятной, средней и средней квадратичной. Рассмотрим эти скорости для функции распределения молекул по модулю скорости.

1. *Наиболее вероятной* называется скорость, которую имеют большинство молекул, т.е. это значение скорости, при которой функция распределения молекул по модулю скорости принимает максимальное значение. Для нахождения этой скорости необходимо приравнять нулю производную от функции распределения:

$$\frac{dF(v)}{dv} = 0. \quad (2.9.13)$$

Решение этого уравнения определяет наиболее вероятную скорость

$$v_{\text{вер}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}. \quad (2.9.14)$$

Зная наиболее вероятную скорость можно также найти максимальное значение функции распределения молекул по модулю скорости

$$F(v_{\text{вер}}) = \frac{4}{\sqrt{\pi e}} \sqrt{\frac{m}{2kT}} = \frac{4}{\sqrt{\pi e}} \frac{1}{v_{\text{вер}}}. \quad (2.9.15)$$

Из выражений (2.9.14) и (2.9.15) видно, что при возрастании температуры значение наиболее вероятной скорости растет, а максимум функции распределения уменьшается. Аналогичные изменения происходят при уменьшении массы молекулы. И наоборот, при уменьшении температуры (увеличении массы молекулы) наиболее вероятная скорость уменьшается, а высота пика растет. Необходимо помнить, что площадь под кривой функции распределения молекул по модулю скорости определяет вероятность частицы иметь какую-либо скорость, т.е. вероятность достоверного события, поэтому она всегда остается неизменной и равна единице.

2. Средняя скорость $\langle v \rangle$ по определению равна

$$\langle v \rangle = \int v dP = \int_0^{\infty} v F(v) dv. \quad (2.9.16)$$

Вычисление записанного интеграла дает для средней скорости значение

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}. \quad (2.9.17)$$

Стоит обратить внимание на то, что средняя скорость частиц всегда превышает наиболее вероятную

$$\frac{\langle v \rangle}{v_{\text{вер}}} = \sqrt{\frac{8}{2\pi}} = 1,13.$$

3. Средняя квадратичная скорость $v_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\langle v^2 \rangle}$. Среднее от квадрата скорости молекулы также находится интегрированием

$$\langle v^2 \rangle = \int_0^{\infty} v^2 F(v) dv.$$

В результате для средней квадратичной скорости молекулы получаем значение

$$v_{\text{ср. кв}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}. \quad (2.9.18)$$

Значение средней квадратичной скорости больше и значения наиболее вероятной скорости, и значения средней скорости

$$v_{\text{ср. кв}} = 1,22 v_{\text{вер}} = 1,09 \langle v \rangle.$$

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для изучения закона распределения молекул газа по скоростям используется механическая модель. На рис. 2.9.3 приведена схема установки для моделирования распределения Максвелла.

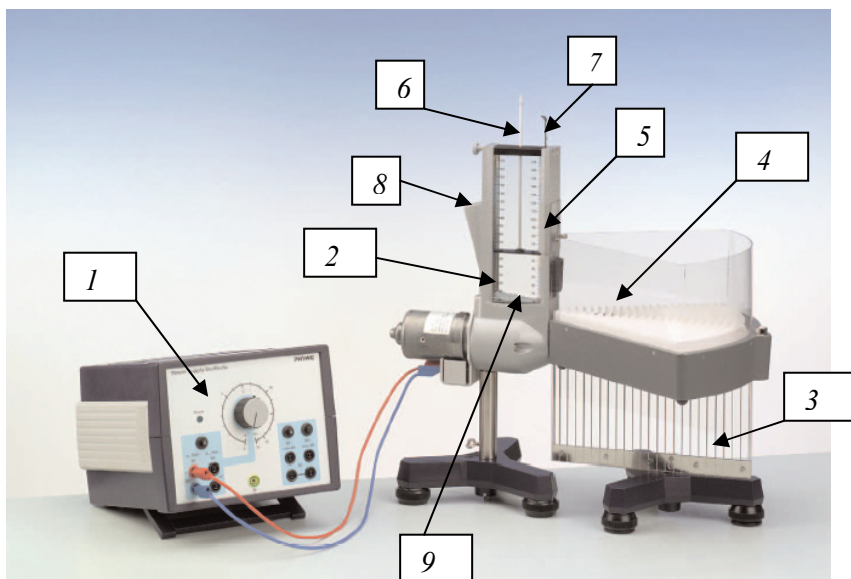


Рис. 2.9.3

Роль молекул играют шарики, определенное количество которых засыпается во внутреннее пространство прибора 2. Шарики приводятся в движение из-за колебательного движения основания 9 и абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Таким образом, имитируется тепловое движение молекул.

Интенсивность «теплого» движения можно изменять, меняя напряжение, подаваемое на прибор от источника 1. Величина подаваемого напряжения U и высота H поршня 6 (рабочие параметры) влияют на движение шариков, моделируя различную интенсивность теплового движения. Шарики засыпаются в прибор через отверстие 8.

Если регулятор 7 переместить вверх, то выходное отверстие прибора будет открыто и шарики, вылетая из отверстия кюветы 5, попадут в верхний приемник 4, разделенный на 24 отсека. Верхний приемник жестко крепится на нижнем приемнике 3, отсеки которого имеют цилиндрическую форму и совпадают с отсеками верхнего приемника. Каждый верхний отсек заполняется шариками, имеющими определенное значение горизонтальной скорости. Эта скорость должна быть достаточной для перемещения по горизонтали на расстояние от выходного отверстия кюветы до соответствующего отсека приемника, независимо от направления отклонения в горизонтальной плоскости. Все шарики, попавшие в отсеки верхнего приемника, осыпаются через отверстия в дне в отдельные отсеки нижнего приемника с прозрачными стенками. Полученное в результате этого распределение шариков по отсекам нижнего приемника подобно распределению Максвелла для скоростей молекул газа.

ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Подготовка установки

1. Перед началом работы необходимо установить горизонтальное положение установки при помощи регулировочных винтов в ее основании и основании нижнего приемника.

2. Расположите регистрирующее устройство так, чтобы оно плотно прилегало к прибору, и измерьте разницу высот Δh между выпускным отверстием и приемником.

3. Для исследования распределения молекул по скоростям необходимо, чтобы плотность молекул оставалась постоянной в течение всего эксперимента. Поэтому нужно пополнять количество шариков во внутренней камере прибора. Для этого перед началом работы необходимо подготовить 12 пробирок, поместив в них приблизительно по 50 шариков.

4. Поршень 6 с помощью регулировочного винта установите на высоте $H = 6,0$ см.

Задание 2. Получение модели распределения Максвелла

1. Включите строботаксометр и установите рабочую частоту $\nu_1 = 50$ Гц.

2. При закрытом выходном отверстии (регулятор 7 находится в нижнем положении) включите источник питания и, регулируя выходное напряжение, добейтесь того, чтобы основание внутренней камеры прибора казалось неподвижным. В этом случае частота колебаний основания совпадает с частотой мигания лампы строботаксометра.

3. Дождитесь, пока все шарики придут в движение, затем, перемещая регулятор 7 вверх, откройте выходное отверстие, и одновременно включите секундомер.

4. В течение 30 мин наблюдайте за заполнением отсеков нижнего приемника, каждые 5 мин добавляя во внутреннюю камеру прибора шарики из одной пробирки. По окончании эксперимента выключите секундомер и уменьшите напряжение на источнике до нуля. Закройте выходное отверстие, перемещая регулятор 7 вниз.

5. С помощью кисточки стряхните шарики из ячеек верхнего приемника в нижний приемник. Аккуратно снимите верхний приемник.

6. Измерьте линейкой высоту столбиков во всех заполненных ячейках нижнего приемника и занесите результаты в табл. 2.9.1.

Таблица 2.9.1

Номер ячейки i	Высота столбика h_i , мм	Скорость шарика v_i , м/с	Значение функции распределения $F(v_i)$, с/м
1			
2			
...			

7. Проведите аналогичные измерения для частоты $\nu_2 = 70 \text{ Гц}$. В этом случае время эксперимента должно составлять 15 мин, а добавлять шарики нужно каждые 2,5 мин. Результаты измерения занесите в таблицу, аналогичную табл. 2.9.1.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Число шариков N_1 , попавших в первый отсек, моделирует число молекул, скорости которых имеют значения от нуля до v_1 . Число шариков N_2 , попавших во второй отсек, моделирует число молекул со скоростями от v_1 до v_2 и т.д. Обозначим общее число шариков (молекул) через N . Отношение N_i / N есть вероятность того, что молекулы модельного газа имеют скорости в интервале от v_i до $v_i + \Delta v$. А значение функции распределения можно найти, разделив вероятность на ширину интервала Δv :

$$F(v) = N_i / (N \cdot \Delta v). \quad (2.9.19)$$

Изменение скорости Δv в пределах одной ячейки определяется шириной ячейки Δs . А значение скорости v_i шарика, попавшего в i -й отсек, можно найти, зная его дальность полета s_i , отвечающее каждой ячейке, которое легко определить, умножив ширину каждой ячейки верхнего приемника на ее номер:

$$v_i = \frac{\Delta s \cdot i}{t}, \quad (2.9.20)$$

$$\Delta v = \frac{\Delta s}{t}. \quad (2.9.21)$$

Для определения времени движения шарика воспользуемся измеренной в задании 1 разницей высот между выходным отверстием и основанием верхнего приемника шариков Δh :

$$t = \sqrt{2\Delta h / g} , \quad (2.9.22)$$

где g – ускорение свободного падения.

Подставив (2.9.21) в (2.9.19) и (2.9.20), получаем

$$v_i = \Delta s \cdot i \cdot \sqrt{g / (2\Delta h)} , \quad (2.9.23)$$

$$\Delta v = \Delta s \cdot \sqrt{g / (2\Delta h)} . \quad (2.9.24)$$

Так как для обработки результатов нам необходимо только отношение числа частиц в каждой ячейке к полному числу частиц вылетевших в течение эксперимента, то мы можем не вычислять число частиц, а воспользоваться высотой столбика шариков в каждой ячейке

$$N_i / N = \frac{h_i}{\sum h_i} , \quad (2.9.25)$$

где суммирование ведется по номерам всех заполненных ячеек.

По формулам (2.9.23) и (2.9.19), (2.9.24), (2.9.25) рассчитать скорости шариков, попавших в i -й отсек и значение функции распределения, отвечающее этой скорости. Построить экспериментальную зависимость функции распределения для обеих рабочих частот.

Максимум кривой соответствует наиболее вероятной скорости $v_{\text{вер}}$. Закон распределения Максвелла можно переписать, учитывая выражение (2.9.14) для наиболее вероятной скорости $v_{\text{вер}}$ как

$$F(v) = \left(\frac{1}{\pi v_{\text{вер}}} \right)^{3/2} 4\pi v^2 \exp \left(-\frac{v^2}{v_{\text{вер}}^2} \right) . \quad (2.9.26)$$

Таким образом, зная значение наиболее вероятной скорости, можно рассчитать теоретический вид распределения Максвелла и сравнить его с полученным экспериментально распределением. Для этого в тех же осях, что и экспериментальные графики необходимо построить рассчитанные по формуле (2.9.26) теоретические.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков физический смысл функции распределения молекул газа по скоростям?
2. Какой вид имеет распределение молекул газа по скоростям?
3. Каков физический смысл площади, ограниченной кривой графика распределения молекул по скоростям и осью абсцисс?
4. Что такое наиболее вероятная скорость? Как ее определить по графику распределения Максвелла?
5. Запишите формулы для расчета характерных скоростей распределения Максвелла.
6. Каково соотношение между характерными скоростями распределения Максвелла?
7. Выведите формулу для получения наиболее вероятной скорости.
8. Как влияет повышение температуры на вид распределения Максвелла? Сделайте рисунок для двух различных температур.
9. Как влияет повышение массы молекул газа на вид распределения Максвелла? Сделайте рисунок для молекул двух различных масс.
10. Во сколько раз и как изменится средняя скорость движения молекул при переходе от кислорода к водороду?
11. При каких условиях распределение молекул газа по скоростям описывается распределением Максвелла?
12. Почему распределение Максвелла называют равновесным?
13. В чем заключается идея метода по моделированию распределения молекул газа по скоростям, использованного в работе?
14. Почему во время эксперимента необходимо поддерживать постоянную плотность частиц в устройстве для моделирования распределения?
15. Как в эксперименте рассчитывается скорость шарика, попадающего в каждый отсек?
16. Чему равно среднее значение проекции скорости на ось декартовой системы координат?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика. М.: Астрель, 2008.
2. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

Дополнительная

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010.

Работа 2.10

БАРОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМУЛА. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ БОЛЬЦМАНА

Цель: изучение распределения молекул идеального газа по координатам и его основных характеристик.

Оборудование: прибор для моделирования теплового движения, источник питания, стробоскоп, фотодатчик, миллисекундомер, стеклянные и стальные шарики.

ВВЕДЕНИЕ

Любые макроскопические тела, находящиеся в поле внешних сил, стремятся занять положение, отвечающее минимальной

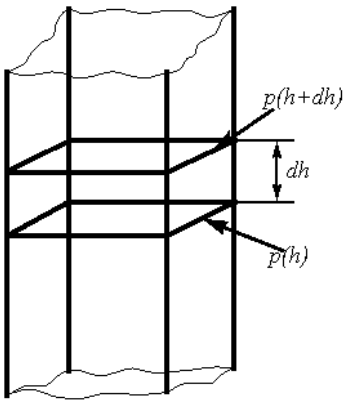


Рис. 2.10.1

потенциальной энергии, т.е., оказываясь в поле тяжести Земли, они занимают положение, отвечающее минимальной высоте. Но молекулы идеального газа участвуют в постоянном хаотическом тепловом движении и не могут упасть на поверхность Земли, даже находясь в поле силы тяжести. В отсутствие внешних силовых полей за счет теплового движения молекулы газа распределяются в пространстве равномерно, но в случае действия внешнего силового поля их распределение в пространстве меняется. Установим характер их распределения, рассмотрев вертикальный столб воздуха с площадью поперечного сечения S , находящийся в поле действия силы тяжести.

Выделим элементарный объем газа высоты dh , и рассмотрим силы, действующие на него (рис. 2.10.1). Масса рассматриваемого

элемента газа $dm = \rho S dh$. Так как выделенный элемент находится в равновесии, то суммарная сила должна быть равна нулю:

$$-dm \cdot g + p(h)S - p(h + dh)S = 0.$$

Подставляя выражение для массы и сокращая выражение на S , получаем

$$\rho g dh = p(h) - p(h + dh) = -dp. \quad (2.10.1)$$

Давление, создаваемое газом, связано с концентрацией молекул n уравнением состояния идеального газа $p = nkT$, считая, что температура не меняется, получаем

$$dp = kT dn. \quad (2.10.2)$$

Плотность газа также можно выразить через его концентрацию и массу молекулы газа m :

$$\rho = m \cdot n. \quad (2.10.3)$$

Подставляя выражения (2.10.2) и (2.10.3) в уравнение (2.10.1), получаем дифференциальное уравнение, связывающее концентрацию с высотой

$$\frac{dn}{n} = -\frac{mg}{kT} dh.$$

Решая это уравнение, получаем зависимость концентрации молекул от высоты в поле силы тяжести в приближении изотермической атмосферы

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right), \quad (2.10.4)$$

где n_0 – концентрация молекул на нулевой высоте.

Соотношение (2.10.4) может быть представлено через молярную массу M газа, а не через массу каждой молекулы. Учитывая что $m = M / N_A$, получаем

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{N_A kT}\right) = n_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right). \quad (2.10.5)$$

Соотношения (2.10.4) и (2.10.5), определяющие зависимость концентрации молекул от высоты в поле силы тяжести Земли, называются *распределением Больцмана в поле силы тяжести*.

Из формулы (2.10.4) следует, что с понижением температуры число частиц на высотах, отличных от нуля, убывает, а при температуре, равной абсолютному нулю, вообще обращается в нуль. При абсолютном нуле все молекулы упали бы на земную поверхность, так как при нулевой температуре интенсивность теплового движения обращается в нуль. При высоких температурах, напротив, концентрация n слабо убывает с высотой, так что молекулы оказываются почти равномерно распределенными по высоте.

Этот факт имеет простое физическое объяснение. Каждое конкретное распределение молекул по высоте устанавливается в результате действия двух тенденций: 1) притяжение молекул к Земле (характеризуемое силой mg) стремится расположить их на поверхности Земли; 2) тепловое движение (характеризуемое величиной kT) стремится разбросать молекулы по всем высотам. Чем больше m и меньше T , тем сильнее преобладает первая тенденция, и молекулы сгущаются у поверхности Земли. При высоких температурах превалирует тепловое движение, и молекулы стремятся, как можно равномернее распределиться в занимаемом им сосуде, т.е. концентрация молекул медленно убывает с увеличением высоты.

Если число частиц остается неизменным, то при изменении температуры меняется концентрация частиц на нулевом уровне. Выясним, как они связаны между собой.

Полное число частиц определяется через концентрацию следующим интегралом

$$N = \int n dV = \int_0^{\infty} n(h) S dh, \quad (2.10.6)$$

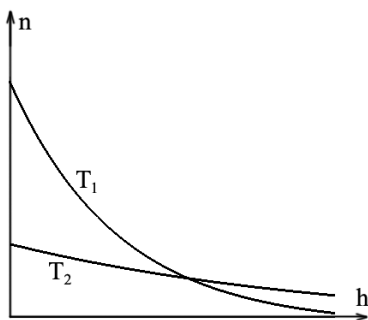


Рис. 2.10.2

где S — площадь сечения рассматриваемого столба воздуха. Записанный интеграл пропорционален площади под графиком зависимости концентрации молекул от высоты, т.е. площадь под кривой не должна изменяться при увеличении и уменьшении температуры (рис. 2.10.2). Это возможно только при изменении концентрации на нулевой высоте.

Рассмотрение интеграла (2.10.6) определяет концентрацию на нулевой высоте $n_0 = \frac{Nmg}{SkT}$, т.е. отношение концентраций на нулевой высоте связано с температурами следующим образом:

$$\frac{n_0}{n'_0} = \frac{T'}{T}. \quad (2.10.7)$$

На рис. 2.10.2 приведены графики зависимости концентрации молекул идеального газа от высоты для двух температур, отличающихся в три раза.

Барометрическая формула. Зная зависимость концентрации молекул от высоты в поле силы тяжести, при помощи уравнения состояния идеального газа легко можно получить зависимость давления создаваемого столбом газа от высоты. Концентрация $n(h)$ молекул на высоте h

$$n(h) = \frac{p(h)}{kT}, \quad (2.10.8)$$

концентрация n_0 молекул на нулевой высоте

$$n_0 = \frac{p_0}{kT}, \quad (2.10.9)$$

где p_0 – давление, создаваемое газом на нулевой высоте.

Подставляя выражения (2.10.8) и (2.10.9) в зависимость (2.10.4) и предполагая, что температура на различной высоте одинакова, получаем

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right). \quad (2.10.10)$$

Соотношение (2.10.10), аналогично распределению Больцмана, может быть представлено через молярную массу газа, а не через массу каждой молекулы

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{Mgh}{RT}\right). \quad (2.10.11)$$

Таким образом, для изотермической атмосферы зависимость давления от высоты может быть описана соотношениями (2.10.10) и (2.10.11), называемыми *барометрическими формулами*.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для изучения закона распределения молекул идеального газа по высоте в поле тяжести Земли используется механическая модель. На рис. 2.10.3 приведена экспериментальная установка для моделирования распределения Больцмана.

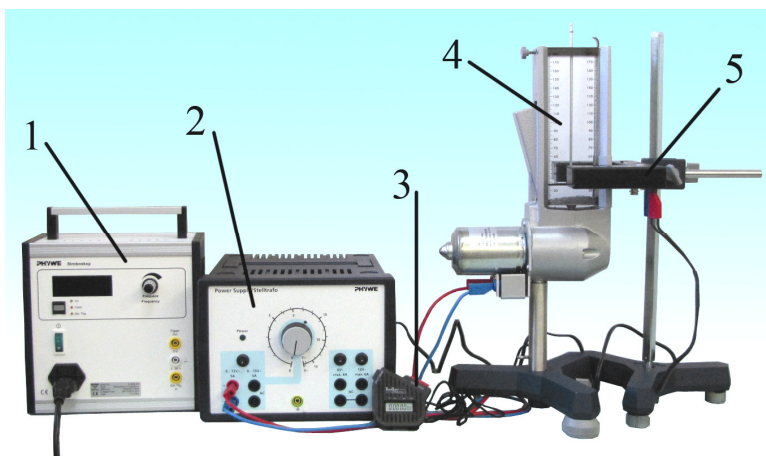


Рис. 2.10.3

Роль молекул играют стальные или стеклянные шарики, определенное количество которых помещено во внутреннее пространство прибора для моделирования теплового движения 4. Шарики приводятся в движение благодаря колебаниям основания прибора и абсолютно упруго сталкиваются друг с другом и со стенками сосуда. Таким образом, имитируется тепловое движение молекул, интенсивность которого, т.е. температура газа, будет определяться частотой колебаний основания. Интенсивность «теплового» движения можно изменять, меняя напряжение, подаваемое на прибор от источника питания 2. Измерение частоты колебаний основано на стробоскопическом эффекте: если при освещении основания стробоскопом 1 оно кажется неподвижным, то частота колебаний основания и частота вспышек лампы стробоскопа совпадают.

Для определения концентрации молекул на определенной высоте в данной работе используется фотодатчик (рис. 2.10.4). При ус-

тановке переключателя 2 в режим «Count», фотодатчик фиксирует количество пересечений шариками луча фотодатчика. Количество пересечений отражается на дисплее 1. Для того, чтобы обнулить показания прибора, необходимо нажать клавишу «Set» 3. Конструкция установки позволяет легко перемещать фотодатчик по вертикали. Для измерения высоты фотодатчика удобнее всего воспользоваться шкалой, нанесенной на переднюю стеклянную стенку внутреннего пространства прибора, моделирующего тепловое движение. Таким образом, проводя измерения количества пересечений шариками луча фотодатчика за равные промежутки времени на различной высоте, можно определить зависимость концентрации молекул идеального газа от высоты в поле тяжести Земли. Равные промежутки времени отсчитываются при помощи секундомера 3 (см. рис. 2.10.3).

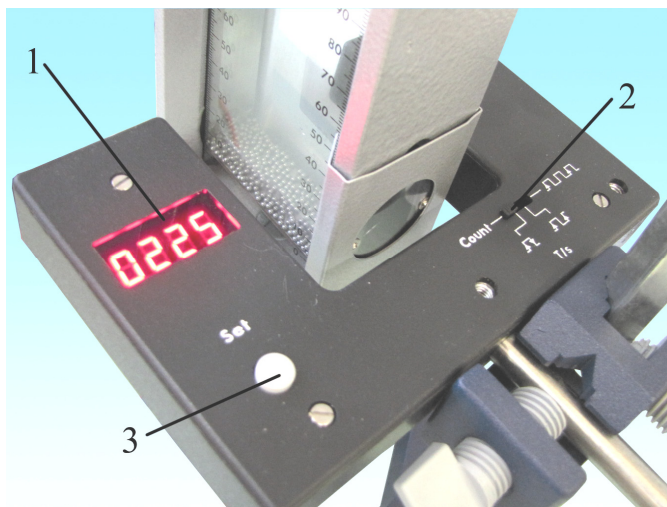


Рис. 2.10.4

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. При работе со стробоскопом соблюдать осторожность, не попадания света стробоскопа в глаза.
2. При перемещении фотодатчика вдоль кронштейна следить за тем, чтобы его плоскость была горизонтальна.

3. При подаче питания на прибор, моделирующий тепловое движение, напряжение увеличивать плавно.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Убедиться в том, что поршень прибора для моделирования теплового движения находится на высоте 150 мм, а переключатель фотодатчика установлен в положении «Count».

2. Включить стробоскоп и выставить на нем частоту $\nu_1 = 70$ Гц.

3. Осветить стробоскопом основание прибора для моделирования теплового движения и, регулируя напряжение на источнике, добиться кажущейся неподвижности основания. Выключить стробоскоп. При проведении измерений напряжение не изменять.

4. Поместить фотодатчик на высоте 15 мм (высота измеряется по нижней горизонтальной плоскости датчика).

Таблица 2.10.1

$\nu_1 = 70$ Гц								
№ п/п	h , мм	N_1	N_2	N_3	$\langle N \rangle$	ΔN	$\ln N$	$\Delta(\ln N)$
1	15							
2	30							
2	45							
...	...							
...	...							

5. Одновременно запустить секундомер и нажать кнопку «Set» на фотодатчике. Измерить количество пересечений шариками луча фотодатчика в течение 30 с (показания фотодатчика по прошествии 30 с). Результаты занести в табл. 2.10.1. Повторить измерения еще два раза.

6. Перемещая датчик по вертикали с шагом 15 мм, проводить измерения, описанные в п. 5, до тех пор, пока количество пересечений не станет меньше 30.

7. Провести измерения, описанные в пп. 2–6, для частоты $\nu_2 = 90$ Гц. Результаты занести в таблицу, составленную по образцу табл. 2.10.1.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЯ

Как уже было сказано, если количество пересечений на различных высотах измеряется в течение равных промежутков времени, то зависимость количества пересечений от высоты будет пропорциональна зависимости концентрации молекул от высоты. Из зависимости (2.10.4), полученной в теоретическом введении к работе, следует, что

$$\ln N = \text{const} - \frac{mgh}{kT},$$

т.е. зависимость логарифма количества пересечений от высоты также должна быть линейной, а угловой коэффициент этой прямой

равен $\alpha = \frac{mg}{kT}$. Для построения графика необходимо вычислить

среднее значение количества пересечений на каждой высоте и его погрешность. Погрешность вычисляется методом Корнфильда

$$\Delta N = \frac{N_{\max} - N_{\min}}{2}.$$

Затем необходимо вычислить натуральный логарифм количества

пересечений и его погрешность $\Delta(\ln N) = \frac{\Delta N}{N}$. Полученные значения

занесите в табл. 2.10.1 и таблицу, построенную в п. 7 аналогично табл. 2.10.1. Постройте полулогарифмический график зависимости количества пересечений от высоты для каждой частоты. Убедитесь в том, что графики линейны.

Методом парных точек определите угловой коэффициент графика зависимости логарифма количества пересечений от высоты и его погрешность. Вычисления необходимо провести для обеих частот.

В силу того, что частота колебаний основания прибора моделирующего тепловое движение определяет температуру газа, то отношение угловых коэффициентов графиков должно быть равно обратному отношению частот.

Вычислите отношение угловых коэффициентов графика и его погрешность

$$\eta_{\text{эксп}} = \frac{\alpha_1}{\alpha_2},$$

$$\Delta\eta_{\text{эксп}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha_1}{\alpha_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\alpha_2}{\alpha_2}\right)^2}.$$

Вычислите теоретическое значение отношения угловых коэффициентов

$$\eta_{\text{теор}} = \frac{v_2}{v_1}.$$

Сравните экспериментальные и теоретические значения.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Результаты данной работы должны быть представлены в виде двух полулогарифмических графиков зависимости количества пересечений от высоты для частот $\nu_1 = 70$ Гц и $\nu_2 = 90$ Гц, а также угловых коэффициентов этих графиков и экспериментального и теоретического значений отношения угловых коэффициентов. В заключении к работе должно быть проведено обсуждение формы графиков, обсуждение погрешности и сравнение теоретических и экспериментальных данных.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Можно ли проводить измерения количества пересечений шариками луча фотодатчика на разных высотах в течение разного времени? Обоснуйте свой ответ.
2. На какой высоте нужно прекратить измерения количества пересечений шариками луча фотодатчика?
3. Какой вид имеет зависимость логарифма количества пересечений от высоты?
4. Чему равен угловой коэффициент зависимости логарифма количества пересечений от высоты?
5. Как угловой коэффициент зависимости логарифма количества пересечений от высоты зависит от массы шариков? А от час-

тоты колебаний основания прибора для моделирования теплового движения?

6. Как распределены молекулы идеального газа в отсутствии внешних силовых полей?

7. При изменении температуры газа меняется ли давление газа на нулевой высоте? А концентрация молекул?

8. Что происходит с концентрацией газа на нулевой высоте при уменьшении температуры?

9. Какой эффект используется для определения частоты колебаний основания прибора, моделирующего тепловое движение молекул?

10. Каким образом в данной работе можно менять «температуру газа»?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Кн. 3. Молекулярная физика и термодинамика. М.: Астрель, 2008.

2. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

Дополнительная

1. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010.

Работа 2.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА

Цель: найти зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры и концентрации раствора.

Оборудование: динамометр торсионный с пределом измерения 10 мН и ценой наименьшего деления 0,1 мН; кольцо для измерения коэффициента поверхностного натяжения, диаметр кольца $d = (19,65 \pm 0,05)$ мм; штатив с зажимами; магнитный смеситель с подогревом; стеклянные емкости на 1000 и 560 мл; стеклянные трубки; одноходовой кран; лабораторный термометр с пределом 250 °С; фильтрационный насос (пластиковый).

ВВЕДЕНИЕ

На молекулу жидкости действуют силы со стороны окружающих молекул. Пренебрегая размерами молекул, рассмотрим влияние сил молекулярного притяжения. Во взаимодействии участвует сразу много молекул. Окружим каждую молекулу сферой молекулярного действия. Если молекула находится внутри жидкости и удалена от поверхности на расстояние больше радиуса сферы молекулярного действия, то эти силы уравниваются. Радиус сферы молекулярного действия точно не определен. Ориентировочно он порядка 10^{-7} см. Вне сферы силы притяжения считаются равными нулю.

Вблизи границы жидкости с газом или твердым телом в приграничном слое, толщина которого равна радиусу сферы молекулярного действия, появляется результирующая сила молекулярного действия на молекулу, направленная внутрь жидкости (рис. 2.11.1).

Величина результирующей силы молекулярного взаимодействия f максимальна, когда молекула находится у самой границы. Молекулы поверхностного слоя обладают избыточной по сравне-

нию с молекулами в глубине жидкости потенциальной энергией. Эту энергию называют *свободной*. Отсюда следует: чтобы молекулы из объема перевести в поверхностный слой, внешние силы должны совершить работу.

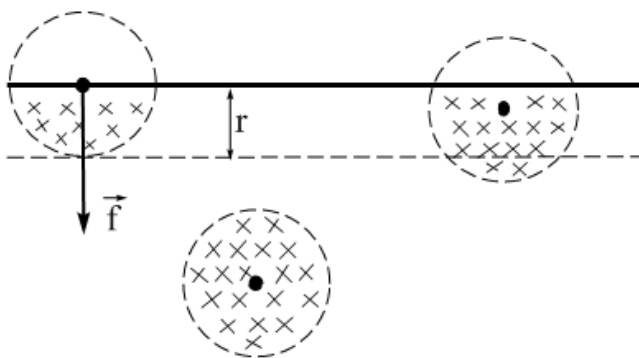


Рис. 2.11.1

Работа, которую надо совершить над жидкостью, чтобы изотермически и равновесно увеличить поверхность жидкости на единицу при сохранении ее объема неизменным, называется *коэффициентом поверхностного натяжения*.

Понятие «свободная энергия» введено Гельмгольцем:

$$F = U - TS,$$

где F – свободная энергия системы; U – внутренняя энергия системы; T – абсолютная температура системы; S – энтропия.

Используя свободную энергию, первое и второе начала термодинамики, можно прийти к выводу: при изотермическом равновесном процессе убыль свободной энергии равна работе, произведенной силами молекулярного взаимодействия:

$$-dF = \delta A. \quad (2.11.1)$$

Работа по увеличению площади поверхности жидкости внешними силами равна работе сил молекулярного взаимодействия с противоположным знаком, т.е. $A_{\text{внеш. сил}} = -A_{\text{мол. сил}}$. Следовательно, $\Delta F = A_{\text{внеш. сил}}$.

Свободную энергию жидкости, на которую не действуют внешние силы, можно представить в виде суммы: $F = F_{\text{об}} + F_{\text{пов}}$, где $F_{\text{об}}$ – объемная составляющая свободной энергии; $F_{\text{пов}}$ – поверхностная составляющая при постоянных плотности ρ и температуре T . Объемная свободная $F_{\text{об}}$ энергия пропорциональна объему жидкости, поверхностная свободная энергия $F_{\text{пов}}$ пропорциональна площади поверхности жидкости, т.е.

$$F_{\text{пов}} = \alpha S, \quad (2.11.2)$$

где α – коэффициент поверхностного натяжения (буквой S здесь и далее будем обозначать площадь поверхности жидкости).

Если объем жидкости достаточно велик, то поверхностной свободной энергией можно пренебречь. Напомним, что объем пропорционален третьей степени линейных размеров системы, а поверхность пропорциональна второй степени линейных размеров. Если объем жидкости мал, то основной вклад в свободную энергию вносит поверхностная свободная энергия.

Таким образом, коэффициент поверхностного натяжения жидкости можно определить как свободную энергию жидкости, приходящуюся на единицу ее поверхности.

Если жидкость находится в форме тонких пленок, то можно пренебречь объемной свободной энергией. Толщина пленок жидкости в этом случае не должна быть меньше диаметра сферы молекулярного действия.

В качестве примера возьмем кольцо диаметром d и опустим его в поверхностный слой смачивающей его жидкости. Это один из способов определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости по отрыву кольца.

При соприкосновении твердого тела с жидкостью поверхностная свободная энергия жидкости и форма поверхности жидкости зависят от силы взаимодействия молекул жидкости друг с другом, с молекулами твердого тела и с молекулами пара, с которыми жидкость граничит.

Для характеристики сил взаимодействия молекул служит краевой угол θ . Этот угол отсчитывается внутри жидкости между касательными к поверхности твердого тела и к поверхности жидкости.

Если краевой угол $0 < \theta < \pi/2$, то говорят о частичном смачивании поверхности твердого тела; если $\theta = 0$, то имеет место полное смачивание (рис. 2.11.2).

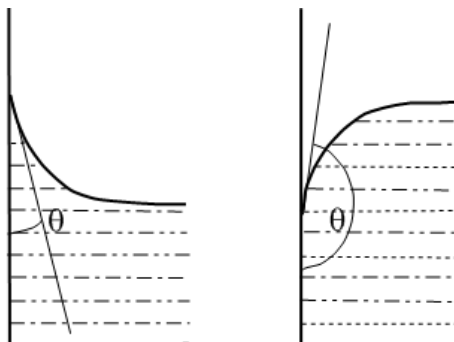


Рис. 2.11.2

В состоянии равновесия свободная энергия системы должна быть минимальна, и поверхность жидкости стремится к сокращению. Поэтому должны быть силы, стремящиеся сократить поверхность. Эти силы называют *силами поверхностного натяжения*. Они направлены по касательной к поверхности жидкости. Следовательно, коэффициент поверхностного натяжения можно определить как силу, действующую на единицу длины контура поверхности. Коэффициенты поверхностного натяжения жидкостей, указанные в справочниках, относятся к случаям, когда жидкости граничат с собственным паром.

С повышением температуры различие в плотности жидкости и ее насыщенного пара уменьшается, пропадает граница между жидкой и газообразной фазой вещества, как следствие, уменьшается коэффициент поверхностного натяжения и при критической температуре, характерной для каждого вещества, он становится равным нулю.

Когда кольцо, опущенное в жидкость, начнем медленно поднимать над поверхностью жидкости, вместе с ним начнет подниматься пленка жидкости, обволакивающая кольцо. Если кольцо при помощи легкой нити прикреплено к динамометру, то при подъеме показания динамометра будут постепенно увеличиваться. Максимальное показание динамометра достигается в момент разрыва пленки и отрыва кольца.

Полагаем смачивание полным. Рассмотрим силы, действующие на кольцо и динамометр (рис. 2.11.3).

На рисунке показано определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва кольца. Указаны силы, действующие

на кольцо в момент отрыва пленки жидкости: mg – сила тяжести (приложена к центру масс кольца); f – сила поверхностного натяжения (действует по всему периметру кольца, как внешнему, так и внутреннему); F_n – сила натяжения нити; f_0 – результирующая сила, действующая на динамометр со стороны кольца.

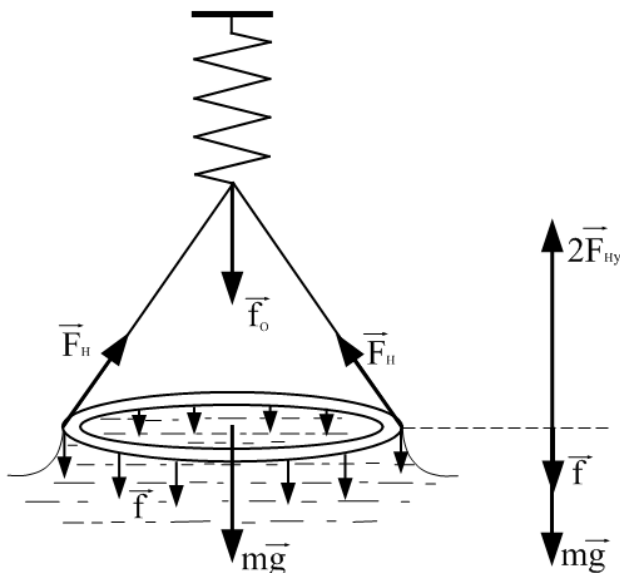


Рис. 2.11.3

В соответствии с определением коэффициента поверхностного натяжения силу f можно представить в виде

$$f = \alpha \cdot L, \quad (2.11.3)$$

где L – длина контура поверхности, вдоль которого действует сила. В данном случае L равна длине внешней и внутренней окружности кольца, в случае тонкого кольца можно взять среднее значение диаметра кольца, тогда

$$f = \alpha(\pi d_1 + \pi d_2) \approx \alpha \cdot 2\pi d, \quad (2.11.4)$$

где d_1 – внешний диаметр; d_2 – внутренний диаметр; d – средний диаметр кольца.

Пренебрегая силой тяжести кольца mg (приложенной к центру масс кольца), для момента отрыва кольца можно получить следующее выражение коэффициента поверхностного натяжения:

$$\alpha = \frac{f}{2\pi d}. \quad (2.11.5)$$

Поверхностно-активные вещества. Уменьшение поверхностной свободной энергии может происходить не только за счет сокращения площади поверхности жидкости, но и при добавлении другой жидкости с меньшим коэффициентом поверхностного натяжения. Молекулы добавленной жидкости стремятся расположиться в поверхностном слое. Объясняется это тем, что взаимодействие добавленных молекул с молекулами растворителя меньше сил взаимодействия между молекулами растворителя. Как следствие, выход на поверхность молекул поверхностно-активного вещества уменьшает коэффициент поверхностного натяжения раствора. К поверхностно-активным веществам по отношению к воде являются многие жиры, соли, спирты и эфиры.

Есть вещества (например, раствор сахара, некоторых солей), которые увеличивают коэффициент поверхностного натяжения растворителя. Они концентрируются в глубине раствора, выталкивая на поверхность поверхностно-активные вещества. Примером может служить добавление соли в мыльный раствор, что вызывает выталкивание на поверхность мыла, являющегося поверхностно-активным веществом. Коэффициент поверхностного натяжения мыльно-солевого раствора уменьшается.

Для таких растворов существует эмпирическое уравнение Шишковского:

$$\alpha_0 - \alpha = A \cdot \ln(1 + B \cdot c), \quad (2.11.6)$$

где α_0 – коэффициент поверхностного натяжения растворителя (воды); α – коэффициент поверхностного натяжения раствора; A и B – эмпирические константы, причем A мало меняется от вещества к веществу, B зависит от поверхностной активности вещества; c – концентрация раствора.

Если для некоторых растворов $Bc \gg 1$, то выражение (2.11.6) можно упростить, оно примет вид

$$\alpha = K - A \cdot \ln c, \quad (2.11.7)$$

где K – коэффициент поверхностного натяжения, он уменьшается экспоненциально с увеличением концентрации: $K = \alpha_0 - A \ln B$.

Зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры. С повышением температуры коэффициент поверхностного натяжения вещества должен уменьшаться, при достижении критической температуры он равен нулю, так как исчезает разница плотности жидкости и ее пара, значит, исчезает поверхность, разделяющая обе фазы состояния. Приближенная зависимость коэффициента поверхностного натяжения дана уравнением, установленным физиком Р. Этвешем*:

$$\alpha = B(T_{\text{к}} - T - \tau) \left(\frac{\rho}{M} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (2.11.8)$$

где B – постоянный коэффициент, практически он одинаков для всех жидкостей и равен $0,975 \cdot 10^{-7}$ Дж/К моль^{2/3}; $T_{\text{к}}$ – критическая температура жидкости; ρ – плотность жидкости; M – молярная масса; τ – небольшая величина, имеющая размерность температуры. При температуре, близкой к критической, уравнение Шишковского не применимо, так как противоречит равенству $\alpha = 0$ при критической температуре.

Из уравнения Этвеша следует:

$$\frac{d\alpha}{dT} = -B \left(\frac{\rho}{M} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (2.11.9)$$

что показывает большую зависимость коэффициента поверхностного натяжения жидкости от температуры при большей ее плотности и меньшей ее массы. Это эмпирическое уравнение хорошо подтверждается практикой.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Специальная установка для определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости показана на рис. 2.11.4.

Установка включает в себя: 1 – торсионный динамометр; 2 – ручку регулировки торсионного динамометра; 3 – рычаг торсионного динамометра; 4 – нить, к которой прикреплено кольцо; 5 – термометр; 6 –

* Роланд ЭТВЕШ (1848–1919 гг.) – венгерский физик, его имя присвоено Будапештскому университету.

нагреватель-мешалку; 7 – емкость (кристаллизатор) с исследуемой жидкостью (верхняя емкость); 8 – стеклянную трубку, погруженную в исследуемую жидкость; 9 – односторонний кран, регулирующий вытекание исследуемой жидкости; 10 – емкость для стекания исследуемой жидкости (нижняя емкость); 11 – резиновый шланг.

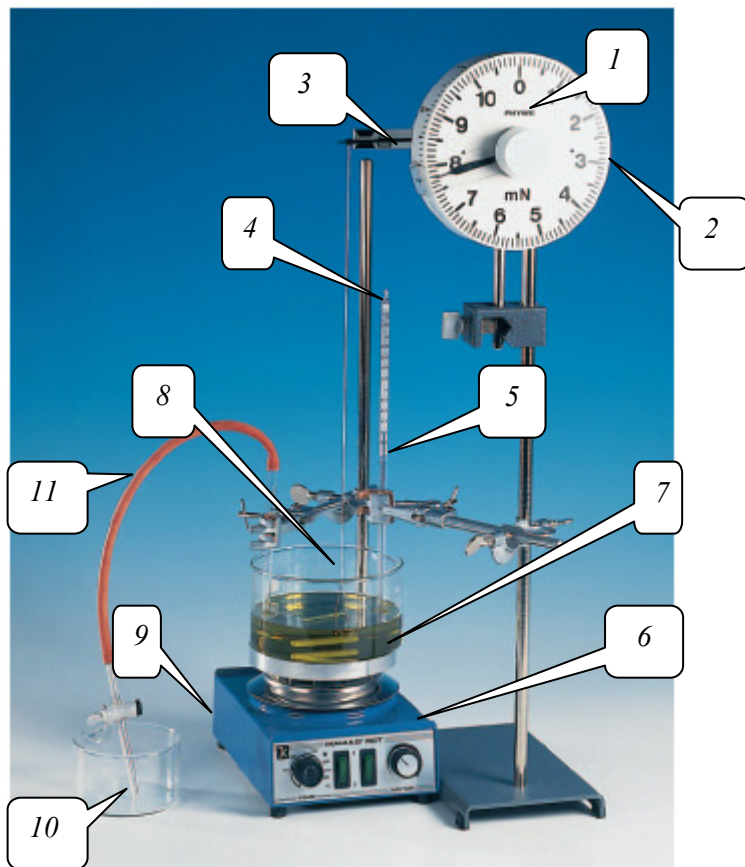


Рис. 2.11.4

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

Включают в себя все требования техники безопасности, с которыми студент ознакомлен на вводной беседе. Дополнительное требование: осторожное обращение с подогретыми жидкостями.

ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задание 1. Исследование температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости

1. Перед началом эксперимента проверьте заполнение жидкостью шланга 11 и одноходового крана 9. Кран должен быть закрыт и помещен в нижнюю емкость.

2. Налейте исследуемую жидкость в верхнюю емкость (1000 мл) и поставьте на мешалку-нагреватель. Рекомендуем использовать воронку.

3. Если шланг и одноходовой кран не заполнены жидкостью, проделайте следующие операции:

- нажмите на грушу насоса;
- подсоедините насос к свободному концу крана;
- откройте одноходовой кран;
- медленно нажимайте на указатель ↓, находящийся на насосе, до тех пор, пока исследуемая жидкость не заполнит резиновый шланг и одноходовой кран;
- закройте одноходовой кран;
- отсоедините насос.

4. Прикрепите кольцо на шелковой нити к рычагу динамометра, пропустив петлю нити в прорезь рычага. Кольцо должно быть погружено в жидкость на глубину 1,0–1,5 см от поверхности жидкости.

5. Плавно и без усилий вращая ручку 2 регулировки динамометра (см. рис. 2.11.4), установите стрелку на отметке «0». Установите рычаг торсионного динамометра в пределах белого сектора между черными метками 3 (см. рис. 2.11.4), осторожно вращая черную ручку на задней панели динамометра.

6. Зафиксируйте температуру по термометру, погруженному в жидкость, и занесите данные в табл. 2.11.1.

7. Откройте одноходовой кран. Жидкость начнет вытекать в нижнюю емкость, уровень жидкости в верхней емкости начнет плавно понижаться. В процессе вытекания жидкости нарушается равновесие сил и необходимо удерживать рычаг торсионного динамометра в пределах белого сектора между черными метками 3, вращая ручку 2 (см. рис. 2.11.4). В момент отрыва кольца от поверхности жидкости показания динамометра численно равны силе f отрыва кольца. После этого сразу закройте одноходовой кран. Данные занесите в табл. 2.11.1.

Таблица 2.11.1

№ п/п	t , °C	Показания динамомет- ра в момент отрыва кольца, мН			Средняя сила $\langle f \rangle$ отрыва кольца, мН	Абсо- лютная погреш- ность Δf , мН	$\langle f \rangle \pm \Delta f$, мН	Коэффици- ент поверх- ностного натяжения $\langle \alpha \rangle \pm \Delta \alpha$, Н/м
1								
2								
...								
...								
8								

8. Вылейте жидкость из нижней емкости в верхнюю. Удобно использовать воронку. Ручкой 2 регулировки динамометра выставить стрелку на отметку «0».

9. Для заданной температуры повторите измерения 5 раз, выполняя все действия, описанные в пп. 1–8.

Примечание. Не забывайте после каждого определения силы отрыва кольца переливать жидкость в верхнюю емкость и выставлять «0».

10. Поместите магнит в исследуемую жидкость, включите нагреватель-мешалку. Если исследуемая жидкость – вода, то рекомендуемая скорость (set speed) не более 750 об./мин, ручка регулировки температуры (heater) – в положении не более 100 °C.

11. Измерения для воды рекомендуем проводить в интервале 15–80 °C с одинаковыми интервалами в 10 °C. После окончания измерений одноходовой кран закрыть.

Будьте осторожны при проведении измерений с горячей водой.

12. Рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости при различных температурах по формуле (2.11.5). Вычислите абсолютную погрешность коэффициента поверхностного натяжения α по относительной погрешности силы отрыва кольца $\langle f \rangle$, пренебрегая погрешностью измерения диаметра кольца. Данные занести в табл. 2.11.1.

13. Постройте график зависимости коэффициента поверхностного натяжения α от температуры t , используя метод парных точек.

Напоминаем, что в данном методе в пару берутся экспериментальные точки с одинаковой разностью температур (эквидистантные точки) и эта разность должна быть не менее половины всего

интервала значений температур данного задания. Количество пар можно взять не более пяти. Вспомогательные прямые не проводят на графике. Наилучшая прямая должна проходить через центр тяжести экспериментальных точек, т.е. через точку с координатами $\langle \alpha \rangle$ и $\langle t \rangle$, рассчитанными по результатам табл. 2.11.1.

14. Рассчитайте по эмпирической формуле Р. Этвеша (2.11.9) тангенс угла наклона для воды.

15. Сравните тангенс угла наклона da/dt экспериментального графика с результатом предыдущего расчета.

В заключении проанализируйте полученный результат сравнения.

Задание 2. Исследовать влияние поверхностно-активных веществ на коэффициент поверхностного натяжения на примере водного раствора додецилсульфата натрия при комнатной температуре

1. Замените резиновый шланг II и стеклянную трубку δ (см. рис. 2.11.4) на чистые.

2. Проведите измерения силы отрыва кольца для жидкостей с известными концентрациями, следуя указаниям пп. 1–8 задания 1.

3. Для каждой жидкости с заданными концентрациями повторите измерения 5 раз.

4. Проведите аналогичные измерения с жидкостью неизвестной концентрации.

Данные занесите в табл. 2.11.2.

Таблица 2.11.2

№ п/п	Концентрация c , г/мл	Показания динамометра в момент отрыва кольца, мН						Средняя сила отрыва $\langle f \rangle$, мН	Абсолютная погрешность $\Delta \langle f \rangle$, мН	$\langle f \rangle \pm \Delta f$, мН	Коэффициент поверхностного натяжения раствора $\alpha \pm \Delta \alpha$, Н/м	$\ln c$
1												
2												
...												
6												

Примечание. Не забывайте после каждого измерения силы отрыва кольца переливать жидкость в верхнюю емкость и выставлять «0» на шкале динамометра.

5. Рассчитайте коэффициенты поверхностного натяжения растворов по формуле (2.11.5).

6. Определите абсолютные погрешности силы отрыва кольца $\Delta \langle f \rangle$ и $\Delta \langle \alpha \rangle$ для всех концентраций, пренебрегая погрешностью измерения диаметра кольца. Результаты расчетов занесите в табл. 2.11.2.

7. Постройте график зависимости коэффициента поверхностного натяжения раствора от натурального логарифма концентрации соли c . Используйте метод парных точек (см. задание 1, п. 13).

8. Определите по графику неизвестную концентрацию раствора c_x , ее абсолютную погрешность.

В заключении отразите анализ полученного графика.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте определение коэффициента поверхностного натяжения через работу внешних сил над системой, находящейся при постоянной температуре T и постоянном объеме.

2. Получите из определения свободной энергии 1-го и 2-го начал термодинамики выражение: $\delta A_{\text{мол. сил}} = -dF$.

3. Какая составляющая свободной энергии $F_{\text{пов}}$ или $F_{\text{об}}$ вносит основной вклад в их сумму, если объем жидкости велик? Объем жидкости мал? Обоснуйте ответ.

4. Дайте определение коэффициента поверхностного натяжения жидкости через свободную поверхностную энергию.

5. Определите коэффициент поверхностного натяжения через силу поверхностного натяжения, возникающую в плоскости, касательной к поверхности жидкости.

6. На проволочный каркас натянута мыльная пленка, на которую положили петлю из легкой нити. Петля может иметь произвольную форму. Какую форму примет петля, если пленку проколоть внутри петли?

7. Объясните, почему жидкости малых объемов в свободном состоянии стремятся приобрести форму шара.

8. Почему сила, действующая на молекулу жидкости в пограничном слое, направлена внутрь объема жидкости, если она граничит с собственным паром?

9. От каких параметров жидкости зависит коэффициент поверхностного натяжения?

10. Сделайте самостоятельно вывод формулы (2.11.5).
11. Исходя из различных определений коэффициента поверхностного натяжения, дайте возможные размерности в системе СИ.
12. Покажите равенство выражений $\alpha = A/S$ и $\alpha = f/L$ для случая отрыва кольца при его поднятии на малую высоту h .
13. Что такое краевой угол смачивания?
14. Каковы источники случайных и систематических ошибок в данном методе определения коэффициента поверхностного натяжения?
15. Почему загрязненная поверхность кольца и кюветы могут повлиять на результат измерений?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975.
2. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.
3. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2004.
4. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Физматгиз, 1976.

Дополнительная

1. Лабораторный практикум по общей физике. Т. 1. Термодинамика и молекулярная физика / Под ред. проф. А.Д. Гладуна. М.: МФТИ, 2003.
2. Руководство к лабораторным занятиям по физике / Под ред. Л.Л. Гольдина. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1973.
3. Светозаров В.В. Элементарная обработка результатов измерений. М.: МИФИ, 2005.
4. Храмов Ю.А. Физики: биографический справочник. М.: Наука, 1983.

Работа 2.12

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ МЕТОДОМ ОТРЫВА КОЛЬЦА С ПРИМЕНЕНИЕМ УСТАНОВКИ «КОБРА 3»

Цель: измерение коэффициента поверхностного натяжения воды.

Теоретическое введение следует изучить по описанию работы 2.11. Там же приведены контрольные вопросы и список рекомендуемой литературы.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для измерения коэффициента поверхностного натяжения жидкости с использованием компьютерной измерительной системы «Кобра 3» представлена на рис. 2.12.1.

На подъемной платформе 1, высоту которой можно изменять поворотом рукоятки 2, установлен сосуд (чашка Петри) с исследуемой жидкостью (в нашем случае – водой). Рядом с подъемной платформой установлен штатив 3, на котором закреплен электронный датчик силы 4 (динамометр, выдающий электрический сигнал, пропорциональный приложенной силе). На чувствительный элемент датчика силы подвешивается кольцо 5 – часть установки, на которую будет действовать сила поверхностного натяжения жидкости. Электрический сигнал от датчика силы подается на один из аналоговых входов универсального электронного блока «Кобра 3» 6, предназначенного для связи экспериментальной установки с персональным компьютером (компьютер на рисунке не показан).

В ходе выполнения работы экспериментатор поворотом рукоятки 2 поднимает платформу 1 до положения, в котором кольцо 5 оказывается погруженным в жидкость, затем плавно опускает платформу, в результате чего кольцо поднимается над поверхностью жидкости, увлекая за собой поверхностную пленку. При этом датчик силы 4 регистрирует величину возникающей силы по-

верхностного натяжения, действующей на кольцо, а блок «Кобра 3» выдает на своем выходе цифровой код, соответствующий измеряемой силе. Этот код по кабелю передается на один из USB-портов компьютера. Написанная для данной работы компьютерная программа позволяет выводить на экран монитора измеренное значение силы, записывать величину силы в заданные моменты времени и выводить на экран график зависимости измеряемой силы от времени.

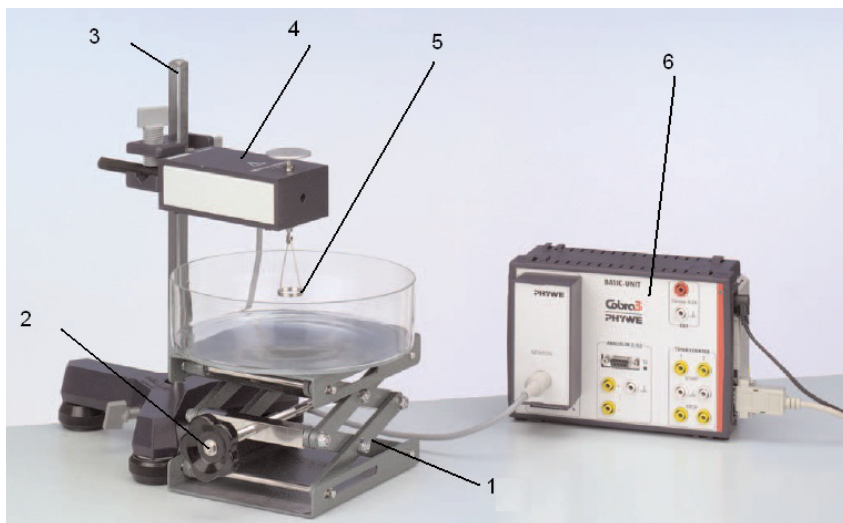


Рис. 2.12.1

ПОДГОТОВКА УСТАНОВКИ К РАБОТЕ

1. Убедитесь, что чашка Петри на подъемной платформе наполнена водой примерно на $\frac{2}{3}$ ее объема.
2. Убедитесь, что персональный компьютер, входящий в состав лабораторной установки, включен и находится в режиме ожидания.
3. Убедитесь, что базовый блок «Кобра 3» включен (у включенного прибора светится зеленый светодиод в правом верхнем углу лицевой панели блока). Если вышеупомянутые устройства не включены, попросите сотрудников лаборатории подготовить их к работе.

4. Найдите на рабочем столе компьютера иконку в виде желтой латинской буквы **m** с надписью «Измерение» и дважды щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране возникнет диалоговое окно программы, обслуживающей измерения с помощью блока «Кобра 3», с заголовком «Phuwe measure 4».

5. В меню, расположенном в верхней части окна, найдите опцию «Прибор» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране появится «выпадающее» меню, в котором перечислены программы, управляющие различными измерительными приборами, входящими в комплект оборудования от фирмы Phuwe.

6. Найдите в этом меню строку «Сила/Тесла» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». На экране появится настроенное окно для работы с измерителем силы, использующимся в данной работе (рис. 2.12.2). Окно содержит элементы управления, с помощью которых можно задавать режим измерений. По умолчанию при запуске программы устанавливаются значения параметров, необходимые для выполнения данной работы, так что менять эти установки не следует.

7. Поворотом рукоятки установите подъемную платформу на высоту, при которой верхняя кромка кольца окажется на 1–2 мм ниже поверхности жидкости.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. В нижней части настроенного окна (см. рис. 2.12.2) найдите клавишу «Далее» и щелкните по ней левой кнопкой «мыши». Настроенное окно исчезнет с экрана, вместо него появятся два других (рис. 2.12.3). Одно из них – информационное, на нем индицируется значение силы, действующей на датчик. Это попросту сила тяжести кольца за вычетом архимедовой силы, действующей на часть кольца, погруженную в воду. Второе (малых размеров окошко с заголовком «Кобра3 – измерение») предназначено для запуска процесса измерения зависимости силы от времени. Пронаблюдайте за показаниями датчика силы на экране дисплея и убедитесь, что эти показания остаются постоянными с точностью до тысячных долей ньютона.

Внимание! При выполнении дальнейших действий будьте внимательны, собранны и аккуратны.

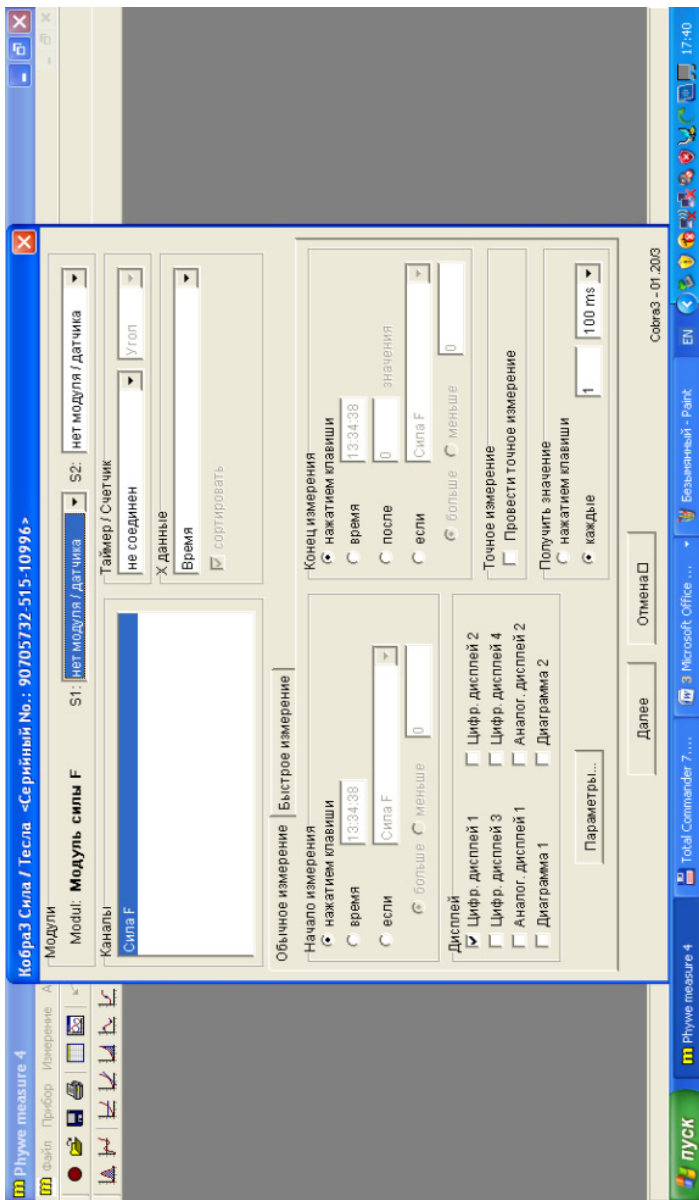


Рис. 2.12.2

2. Щелкните левой кнопкой «мыши» по клавише «Начать измерение» окна с заголовком «Кобра3 – измерение». Запись зависимости силы, действующей на кольцо от времени началась.

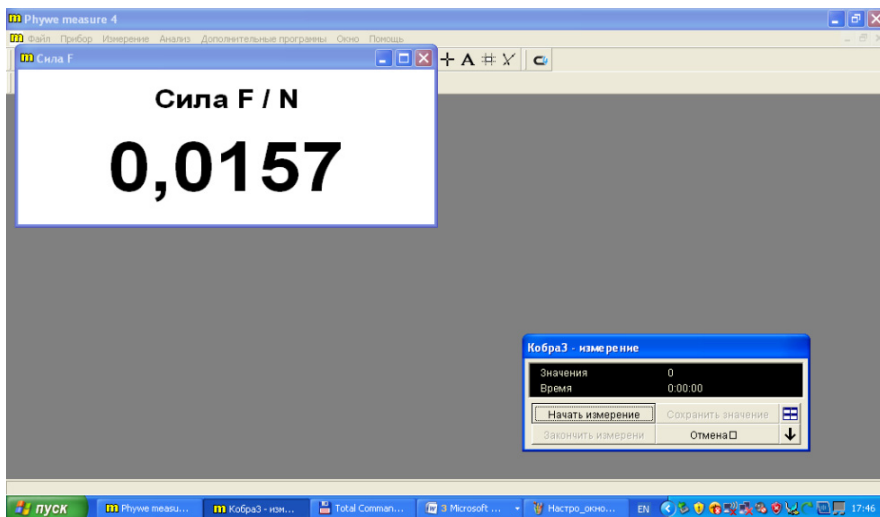


Рис. 2.12.3

3. Плавно вращая рукоятку против движения часовой стрелки, опустите подъемную платформу до положения, при котором кольцо окажется на высоте 3–4 мм над поверхностью воды. Обратите внимание, как в ходе в процессе понижения уровня воды кольцо «вытягивает» за собой поверхностную пленку. Характерная длительность опускания платформы 3–5 с.

4. После того, как кольцо оторвется от поверхностной пленки, плавно вращая рукоятку по часовой стрелке, поднимите платформу до положения, при котором верхняя кромка кольца окажется на глубине 1–2 мм под поверхностью воды.

5. Повторите 8–10 раз пп. 3 и 4, после чего щелкните левой кнопкой «мыши» по клавише «Закончить измерение» на управляющем окне с заголовком «Кобра 3 – измерение». После этого

запись зависимости силы от времени закончится и на экране появится график этой зависимости (рис. 2.12.4).

6. Полученная зависимость обычно подвержена сильным флуктуациям (случайным отклонениям от среднего значения) и для удобства дальнейшей работы график следует сгладить. Для сглаживания на инструментальной панели в верхней части открытого на экране окна найдите иконку программы сглаживания (на ней изображен отрезок кривой линии, «зажатый» между двумя горизонтально расположенными пластинами). После щелчка по этой иконке на экране возникнет окно управления режимом сглаживания (рис. 2.12.5).

7. В левой части этого окна находится шкала установки степени сглаживания. Указатель этой шкалы следует «мышью» установить в крайнее правое положение (максимальное сглаживание). В правой части окна следует щелкнуть кнопку «Переписать» для замены полученного «сырого» графика сглаженным. Сделав описанные установки, щелкните клавишу «Гладкость» в нижней части окна и на экране возникнет сглаженный график зависимости силы от времени (примерный вид графика приведен на рис. 2.12.6). По полученному графику можно определить величину силы поверхностного натяжения, возникающую при извлечении кольца из воды.

8. Для этого найдите на панели инструментов (в правой части верхние строки этой панели) иконку в виде белого прямоугольника, ограниченного жирной черной линией. Щелкните по этой иконке левой кнопкой «мыши» и на экране (поверх графика) появится прямоугольник, две вершины которого, лежащие на одной диагонали, обозначены цифрами «1» и «2», а в верхней правой части экрана появится окошко, где представлены координаты этих вершин в единицах, которые отложены по осям графика. Там же приведены значения разностей одноименных координат вершин.

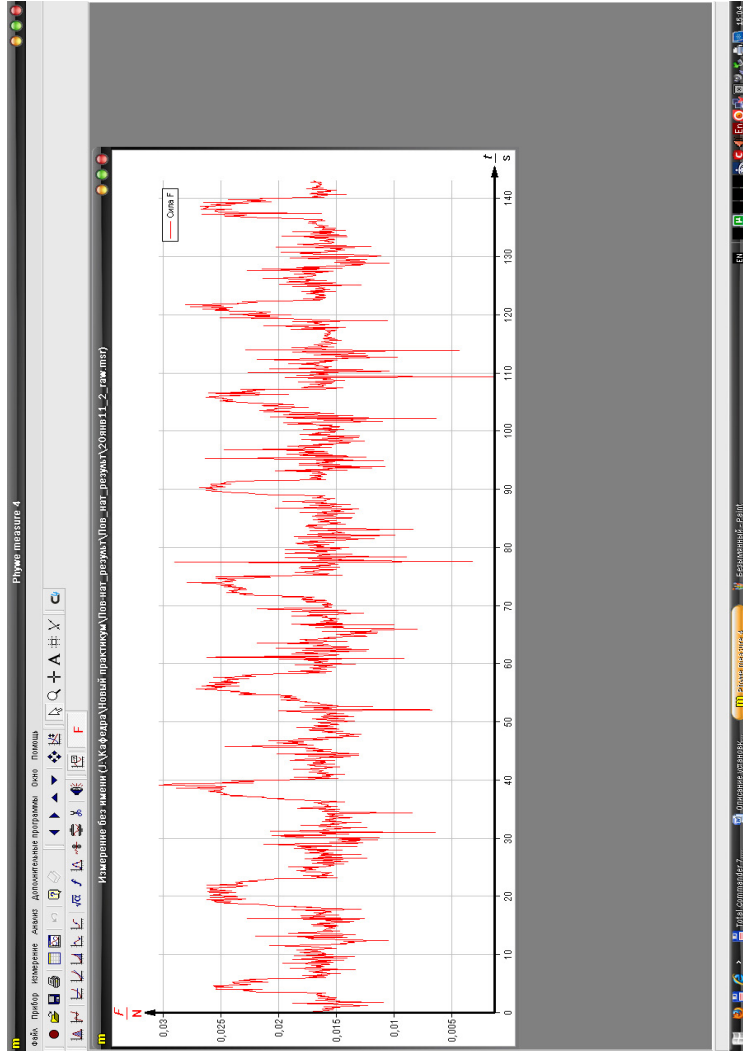


Рис. 2.12.4

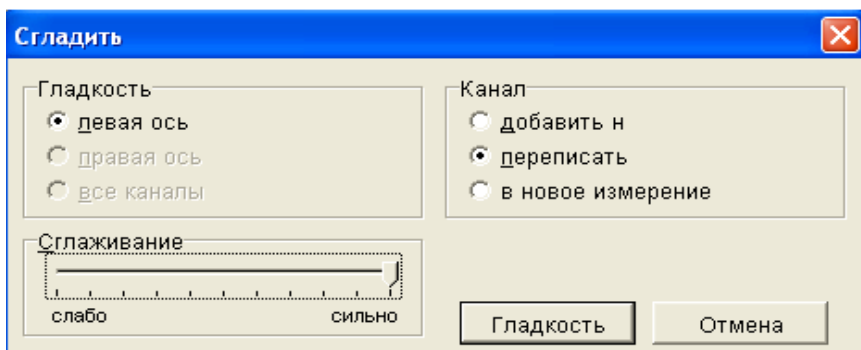


Рис. 2.12.5

Если подвести к одной из этих вершин курсор «мыши», то, нажав и удерживая нажатой левую кнопку, можно перемещать эту вершину по экрану с помощью «мыши». Добейтесь такого положения прямоугольника, при котором его нижняя горизонтальная сторона соответствует силе, действующей на датчик при погруженном в воду кольце ($F_{\text{погр}} = Y1$), а верхняя – силе в момент отрыва поверхностной пленки от кольца ($F_{\text{отр}} = Y2$) (рис. 2.12.7). Разность этих сил $\Delta F = F_{\text{отр}} - F_{\text{погр}} = \Delta Y$ равна силе поверхностного натяжения, действовавшей на кольцо в момент перед его отрывом от поверхностной пленки.

Запишите в табл. 2.12.1 значения $F_{\text{погр}}$, $F_{\text{отр}}$ и ΔF для всех «пику» полученной зависимости силы от времени. (Таблица должна быть заготовлена заранее при подготовке к работе и должна содержать не менее десяти строк.)

Таблица 2.12.1

№ п/п	$F_{\text{погр}}$, Н	$F_{\text{отр}}$, Н	ΔF , Н	α , Н/м
1				
2				
...				
...				

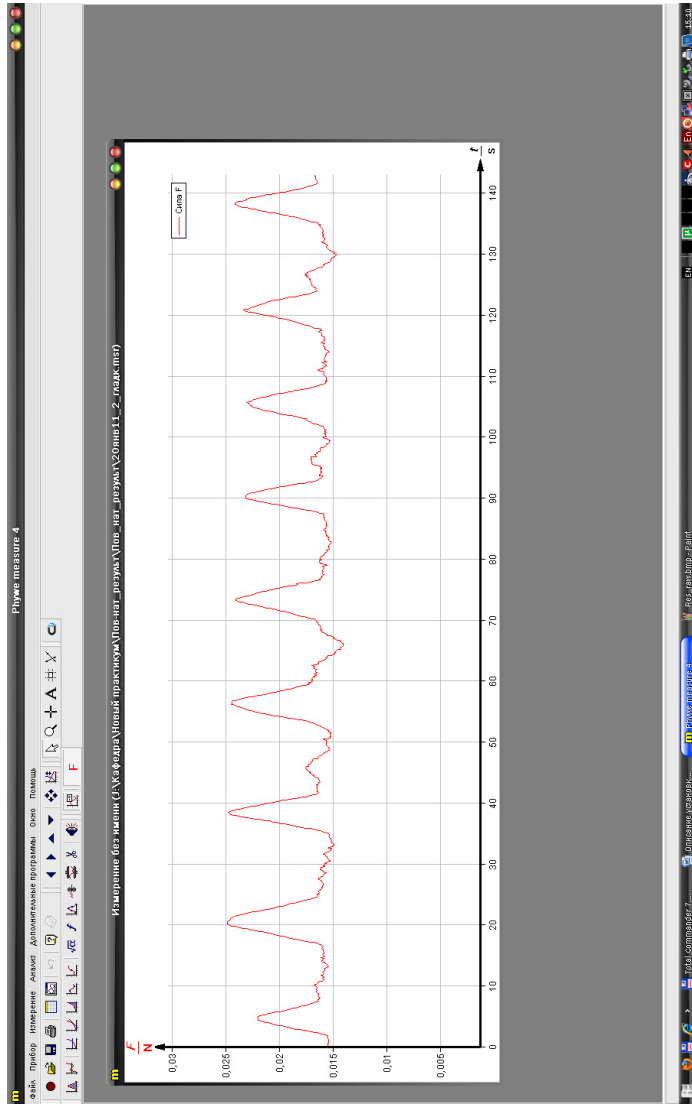


Рис. 2.12.6

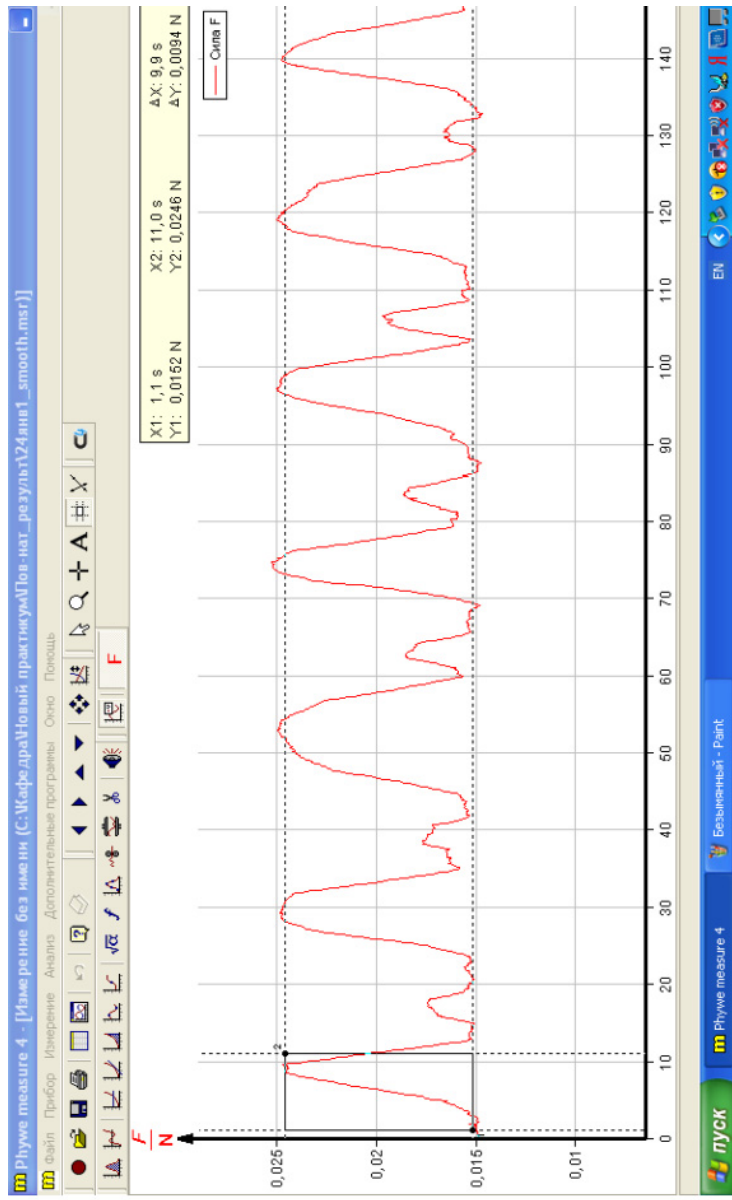


Рис. 2.12.7

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Для каждого измерения силы отрыва кольца вычислите значение коэффициента поверхностного натяжения воды по формуле:

$$\alpha = \frac{\Delta F}{2\pi d},$$

где d – диаметр кольца (кольцо – тонкое, поэтому его внутренний и наружный диаметры можно считать совпадающими). Значение d указано на лабораторном столе.

2. Обработайте полученные результаты измерений методом Корнфелда, т.е. вычислите:

среднее значение коэффициента поверхностного натяжения

$$\langle \alpha \rangle = \frac{\alpha_{\max} + \alpha_{\min}}{2};$$

абсолютную погрешность коэффициента поверхностного натяжения:

$$\Delta \alpha = \frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{2};$$

доверительную вероятность для найденного доверительного интервала:

$$p = 1 - \left(\frac{1}{2} \right)^{n-1},$$

где n – число выполненных измерений силы отрыва.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

Напишите краткое заключение по работе, в котором укажите: что и каким методом измерялось;

приведите полученный результат – значение коэффициента поверхностного натяжения с погрешностью и доверительной вероятностью, в приводимых численных значениях сохраняйте правильное количество значащих цифр;

укажите природу и источник экспериментальной погрешности;

сравните полученное значение α и значение, известное из литературы (табличное); если табличное значение не попадает в найденный Вами доверительный интервал, прокомментируйте возможные причины этого различия.

При подготовке к защите работы ответьте на контрольные вопросы, приведенные в описании работы 2.11.

Работа 2.13

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ ЖИДКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ

Цель: изучение зависимости давления насыщенных паров жидкости от температуры; определение теплоты парообразования воды, используя полученную в работе зависимость давления насыщенных паров от температуры.

Оборудование: откачиваемая колба, стеклянный стакан, спиртовой термометр, разностный манометр, кран, резиновые шланги, форвакуумный насос, электрический нагреватель, электромагнитная «мешалка».

ВВЕДЕНИЕ

Пар, находящийся в термодинамическом равновесии со своей жидкостью, принято называть *насыщенным*. Давление, при котором наблюдается равновесие, называется *давлением насыщенного пара*. Покажем, что давление насыщенного пара P зависит только от температуры T системы «жидкость – пар».

В отсутствие обмена частицами необходимыми условиями термодинамического равновесия двух тел являются равенства температур и давлений. При рассмотрении равновесия двух фаз одного и того же вещества, например жидкости (жидкая фаза) и ее пара (газовая фаза), необходимо дополнительно учитывать возможность обмена частицами. При испарении молекулы покидают жидкую фазу, переходя в газовую, при конденсации – наоборот: молекулы из газа переходят в жидкость. Пусть за время dt из жидкости в пар перешло $dN_{\text{ж-п}}$ молекул, а из пара в жидкость – $dN_{\text{п-ж}}$ молекул. Дополнительным необходимым условием равновесия жидкой и газо-

вой фаз является равенство скоростей испарения $N_{\text{исп}} = dN_{\text{ж-п}} / dt$ и конденсации $N_{\text{конд}} = dN_{\text{ж-п}} / dt$.

Таким образом, должно выполняться три условия равновесия двух фаз:

$$T_{\text{п}} = T_{\text{ж}} \equiv T ; \quad (2.13.1)$$

$$P_{\text{п}} = P_{\text{ж}} \equiv P ; \quad (2.13.2)$$

$$N_{\text{исп}}(P_{\text{ж}}, T_{\text{ж}}) = N_{\text{конд}}(P_{\text{п}}, T_{\text{п}}), \quad (2.13.3)$$

где $T_{\text{п}}, P_{\text{п}}, T_{\text{ж}}, P_{\text{ж}}$ – температура и давление пара и жидкости; T и P – их равновесные значения.

Как отмечено в (2.13.3), скорости испарения и конденсации в силу ряда причин зависят и от давления, и от температуры соответствующих фаз ($N_{\text{исп}}$ – жидкой, $N_{\text{конд}}$ – газовой). Укажем лишь на некоторые, наиболее очевидные. Чтобы покинуть жидкость, молекула должна преодолеть межмолекулярное притяжение и, следовательно, обладать достаточной для этого кинетической энергией. Чем выше температура жидкости, тем больше таких молекул и, следовательно, больше скорость испарения. Для перехода из газа в жидкость молекула должна, по крайней мере, подлететь к поверхности жидкости. Следовательно, скорость конденсации пропорциональна потоку молекул, т.е. $n \propto \langle v \rangle$. Чем выше давление газа, тем (при $T = \text{const}$) выше n и, соответственно, $N_{\text{конд}}$; чем выше температура газа, тем больше $\langle v \rangle \propto T^{1/2}$ и (при $n = \text{const}$) $N_{\text{конд}}$.

Заменив в (2.13.3) давления и температуры фаз на их равновесные значения P и T , из (2.13.1) и (2.13.2) получаем уравнение:

$$N_{\text{исп}}(P, T) - N_{\text{конд}}(P, T) = 0, \quad (2.13.4)$$

связывающее давление насыщенного пара P с температурой системы T :

$$P = P(T). \quad (2.13.5)$$

Таким образом, давление насыщенного пара зависит только от температуры системы «жидкость – пар». Соответствующая зависимости (2.13.5) кривая на плоскости (P, T) называется *кривой испарения*.

Задача данной работы состоит в экспериментальном получении (путем прямых измерений P и T) кривой испарения (2.13.5).

Для испарения жидкости при постоянной температуре необходимо подводить теплоту, частично расходуемую на преодоление молекулами, покидающими жидкость, сил межмолекулярного притяжения (внутренняя теплота испарения Q_1) и частично – на работу расширения образующегося пара до равновесного при данных P и T значения объема (внешняя теплота испарения Q_2). Суммарное количество теплоты $Q = Q_1 + Q_2$, необходимое для изотермического испарения одного моля жидкости, называется *молярной теплотой испарения* (парообразования). Теплота, необходимая для изотермического испарения единицы массы жидкости, называется *удельной теплотой парообразования* q . Очевидно, что

$$q = Q / M, \quad (2.13.6)$$

где M – масса моля.

Используя первое начало термодинамики $d'Q = dU + PdV$ и учитывая, что в силу (2.13.5) изотермическое ($T = \text{const}$) испарение является одновременно и изобарическим ($P = \text{const}$), для теплоты парообразования Q получаем

$$Q = U_{\text{п}} - U_{\text{ж}} + P(V_{\text{п}} - V_{\text{ж}}), \quad (2.13.7)$$

где $U_{\text{п}}$, $U_{\text{ж}}$ и $V_{\text{п}}$, $V_{\text{ж}}$ – внутренняя энергия и объем моля пара и моля жидкости. Второе слагаемое в (2.13.7) есть работа при изобарическом увеличении объема от $V_{\text{ж}}$ до $V_{\text{п}}$, т.е. внешняя теплота испарения

$$Q_2 = P(V_{\text{п}} - V_{\text{ж}}). \quad (2.13.8)$$

Соответственно, первое слагаемое, равное приращению внутренней энергии, есть внутренняя теплота испарения Q_1 :

$$Q_1 = U_{\text{п}} - U_{\text{ж}}. \quad (2.13.9)$$

С ростом температуры различия между жидкостью и паром уменьшаются, поэтому, как видно из (2.13.7), с ростом температуры уменьшается теплота парообразования Q . В критической точке Q обращается в нуль, и кривая испарения (2.13.5) обрывается.

В данной работе исследуется зависимость от T давления насыщенного водяного пара в узком (≈ 20 – 50 °C или ≈ 300 – 330 K) интервале температур, низких по сравнению с критической (для воды $T_{\text{кр}} = 647,3$ K). В этих условиях Q можно приближенно считать постоянной; давление насыщенного пара невелико, и для его вычис-

ления можно с хорошей точностью использовать уравнение состояния идеального газа:

$$PV_{\Pi} = RT, \quad (2.13.10)$$

наконец, вдали от $T_{\text{кр}}$ $V_{\Pi} \gg V_{\text{ж}}$. Отсюда для Q_2 имеем

$$Q_2 \approx PV_{\Pi} \approx R < T >, \quad (2.13.11)$$

где $< T > = (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) / 2$ – середина исследуемого температурного интервала.

В оговоренных выше условиях уравнение Клапейрона–Клаузиуса

$$\frac{dP}{dT} = \frac{Q}{T(V_{\Pi} - V_{\text{ж}})} \approx \frac{Q}{TV_{\Pi}} \approx \frac{Q}{T} \cdot \frac{P}{RT} \quad (2.13.12)$$

позволяет получить приближенный вид кривой испарения. Интегрируя уравнение (2.13.12) ($Q = \text{const}$), имеем

$$\ln P = C - \frac{Q}{R} \cdot \frac{1}{T}. \quad (2.13.13)$$

Из (2.13.13) следует, что $\ln(P)$ линейно зависит от $1/T$. Если эту зависимость представить на графике, то угловой коэффициент прямой будет равен (Q/R) . Определив этот коэффициент, можно рассчитать молярную Q и удельную $q = Q/M$ теплоты парообразования воды.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

На рис. 2.13.1 показаны: 1 – форвакуумный насос (кнопка «Включено/Выключено» находится на верхней горизонтальной поверхности насоса); 2 – стеклянный стакан для воды, которая греет воду в колбе 3; 3 – откачиваемая колба с водой и ее паром для определения температурной зависимости насыщенного водяного пара от температуры; 4 – спиртовой термометр для определения температуры воды, находящейся в термодинамическом равновесии со своим паром; 5 – кран, соединяющий/отсоединяющий колбу 3 и форвакуумный насос; 6 – разностный манометр, его стрелка «на нуле» при равенстве давлений в колбе 3 и в окружающем воздухе (давление в окружающем воздухе (в мм рт. ст.) определяется по имеющемуся в

лаборатории барометру); 7 – электрический нагреватель для повышения температуры воды в стакане 2; 8 – пульт управления работой нагревателя и электромагнитной «мешалкой»; 9 – стеклянный стакан для хранения запаса воды, заливаемой в стакан 2.

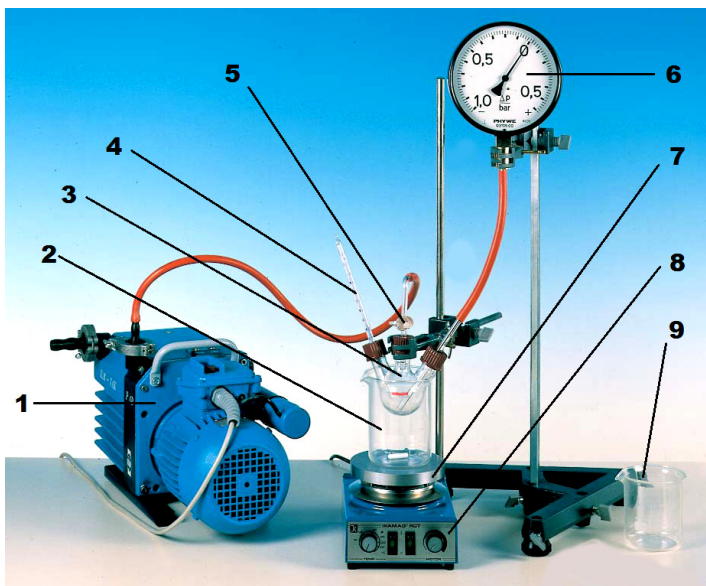


Рис. 2.13.1

Основной частью установки является частично заполненная дистиллированной водой стеклянная колба 3, которая погружена в водопроводную воду, налитую в стакан 2. Колба 3 соединена шлангом (через кран 5) с форвакуумным насосом 1 и другим шлангом – с манометром 6. В колбу 3 вставлен спиртовый термометр 4, нижний конец которого должен быть погружен в находящуюся в колбе воду. Термометр показывает температуру этой воды.

Все соединения вакуумно прочные, т.е. в достаточной мере препятствующие неконтролируемому проникновению в колбу 3 окружающего воздуха после ее откачки. Это необходимо для того, чтобы над водой в колбе 3 находились только пары воды, а не газовая смесь: проникающий извне воздух и пары воды. Точнее, это обеспечивает пренебрежимо малость парциального давления сухого

воздуха по сравнению с парциальным давлением насыщенного водяного пара. Наличие в колбе сухого воздуха, очевидным образом, приведет к тому, что манометр 6 будет показывать давление, равное сумме парциальных давлений водяного пара и воздуха, а не давление водяного пара, что приведет к искажению результатов измерения давления.

На дне стакана 2 лежит белая палочка – «мешалка». Это заключенный в пластмассовую оболочку постоянный магнит, который можно привести во вращательное движение, повернув ручку «мотор» на пульте управления 8. Это правая ручка на пульте управления, она включает и регулирует скорость вращения «мешалки», служащей для перемешивания воды в стакане 2, с целью ускорения нагрева воды в колбе 3.

Левая ручка на пульте 8 включает нагреватель 7 и регулирует скорость нагрева.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

В ходе работы вода, налитая в стакан, установленный на нагревателе, доводится до температуры 90 °С, поэтому существует опасность ожога.

Выполняя работу, следует:

- быть внимательным, собранным и осторожным;
- не делать резких движений;
- не прикасаться к горячей поверхности нагревателя и к нагреваемому стакану с водой;
- не нагревать воду в стакане до кипения;
- при возникновении опасных ситуаций немедленно обращаться к ведущему занятия преподавателю или дежурному сотруднику лаборатории.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перед началом работы необходимо выполнить ряд действий.

А. Убедитесь в том, что верхний уровень воды в стакане 2 совпадает с меткой на стакане;

Б. Проверьте по термометру 4, что температура воды в колбе 3 ниже 40 °С.

Если хотя бы один из пунктов А или Б не выполнен, то обратитесь к лаборанту, вам сменят воду в стакане 2.

Если пункты А и Б выполнены, то нужно перейти к следующему пункту.

В. Убедитесь в том, что кран 5 перекрыт: ручка крана перпендикулярна стеклянной трубке, в которую он впаив. Если кран открыт, то закройте кран: осторожно поверните ручку крана в перпендикулярное к трубке положение.

После выполнения пунктов А, Б и С установка готова к работе.

2. Приступайте к работе. Подайте напряжение на установку, включив «пакетник».

А. Сначала включите форвакуумный насос, потом откройте кран 5, после чего поворотом левой ручки на пульте 8 включите нагрев воды в стакане 2, установив среднюю скорость нагрева. Правой ручкой на пульте 8 включите «мешалку», установив среднюю скорость ее вращения.

Таблица 2.13.1

1	2	3	4	5	6	7
№ п/п	$t, ^\circ\text{C}$	T, K	$\frac{1000}{T}, \frac{1}{\text{K}}$	P , делений по шкале манометра	$P, 10^5 \text{Па}$	$\ln(P)$
1	40					
2	45					
3	50					
4	55					
5	60					
6	65					
7	70					
8	75					
9	80					
10	85					

Б. Следите за ростом температуры воды в колбе 3. Для десяти значений температуры, указанных во втором столбце табл. 2.13.1, запишите показания манометра (в делениях его шкалы) в пятом столбце. Если прозевали указанное во втором столбце значение температуры, то зачеркните его, напишите рядом то значение температуры, для которого успели определить давление, и запишите в

пятый столбец это значение давления. Вычисления, необходимые для заполнения третьего, четвертого, шестого и седьмого столбцов, могут быть выполнены вне лаборатории при оформлении работы.

В. По окончании измерений последовательно выключите: «мешалку»; нагреватель; форвакуумный насос. Обесточьте установку, выключив «пакетник». Откройте кран 5 и оставьте установку остывать в таком виде.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Постройте график зависимости давления насыщенного водяного пара P от его абсолютной (в кельвинах) температуры T .

2. Постройте график зависимости $\ln(P)$ от $10^3/T$. Определите (с учетом масштаба по осям) угловой коэффициент k получившейся прямой. Найдите k либо проведя по экспериментальным точкам прямую «на глазок», либо методом парных точек, либо методом наименьших квадратов.

3. Вычислите молярную и удельную теплоты парообразования $Q = R \cdot k$ (где k – определенный в предыдущем пункте угловой коэффициент прямой) и $q = Q/M$.

4. По формуле (2.13.11) вычислите внешнюю теплоту парообразования Q_2 . Вычислите внутреннюю теплоту парообразования $Q_1 = Q - Q_2$ и их отношение $\alpha = Q_1/Q_2$.

5. Оцените по графику (по разбросу экспериментальных точек относительно проведенной прямой) абсолютную ΔQ и относительную δQ погрешности определения Q .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое насыщенный пар?
2. Сформулируйте условия термодинамического равновесия жидкости и ее пара.
3. Что называется теплотой парообразования?
4. В чем заключается различие между внешней и внутренней теплотой парообразования?
5. Как изменяется теплота парообразования с ростом температуры?

6. Что такое критическая температура?
7. Чему равна критическая температура воды?
8. Чему равна теплота парообразования при критической температуре?
9. Возможно ли изотермическое испарение некоторой массы жидкости без подвода тепла извне?
10. Удельная теплота парообразования воды в 10 раз превышает удельную теплоту парообразования бензина. Чем это объяснить?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.
2. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Бинном. Лаборатория знаний, 2004.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975.
2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Физматгиз, 1976.

Работа 2.14

ИЗУЧЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННЫХ ПАРОВ ЖИДКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ПАРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Цель: *определение теплоты парообразования воды, используя полученную в работе зависимость давления насыщенных паров от температуры в интервале температур $100 \div 250$ °C.*

Оборудование: прочный герметичный сосуд с водой, манометр, термометр, электронагреватель.

Теоретическое введение изучите по описанию работы 2.13.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка очень проста, вся она показана на рис. 2.14.1: 1 – манометр (проградуирован в барах: 1 бар составляет 10^5 Па, поэтому никакие дополнительные градуировки и пересчеты не требуются, например 24 по шкале это $24 \cdot 10^5$ Па); 2 – стальной цилиндр, частично заполненный водой, давление пара которой показывает манометр 1; 3 – термометр с верхним пределом измерений в 250 °C (превышать это значение температуры в процессе работы категорически не следует – термометр погибнет безвозвратно); 4 – керамический нагреватель (в процессе работы нагревается «до красна» – трогать пальцами для проверки: работает или не работает – действительно не

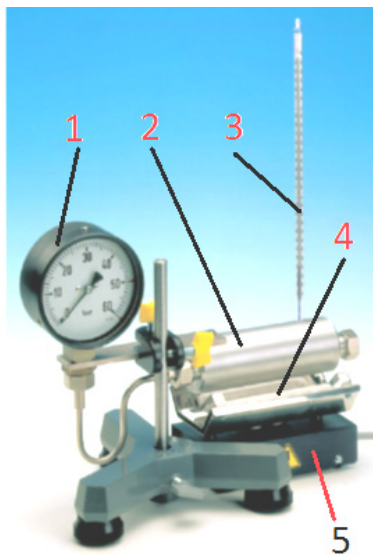


Рис. 2.14.1

рекомендуется); 5 – блок питания нагревателя с кнопкой его включения/выключения: если нагреватель включен, то кнопка светится.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Перед началом работы необходимо выполнить ряд действий.

1. Убедиться в том, что нагреватель выключен, температура (по термометру 3) ниже 50 град. и стрелка манометра стоит практически точно на нуле.

2. Приступить к работе. Подать напряжение на установку, включив «пакетник».

А. Приготовить таблицу для записи результатов измерений (табл. 2.14.1).

Таблица 2.14.1

1	2	3	4	5	6	7
№ п/п	$P, 10^5 \text{ Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$T, \text{ К}$	$\frac{1000}{T}, \frac{1}{\text{К}}$	$\ln(P)$	
1	1					
2	5					
3	10					
4	15					
5	20					
6	25					
7	30					
8	35					
9	40					
10	45					

Б. Включить нагреватель. Измерения следует начинать, когда стрелка манометра достигнет единицы (первое деление на шкале). При достижении стрелкой манометра выбранного вами деления сразу посмотрите на термометр и запишите соответствующую температуру. Учтите, что стрелка движется довольно быстро: не следует опаздывать с определением температуры. Необходимо сделать не менее десяти измерений, как показано в табл. 2.14.1. Записывайте давление в единицах шкалы манометра и температуру по термометру в градусах шкалы Цельсия. Остальные требуемые вычисления можно выполнить при оформлении работы вне лаборатории.

Внимание! При достижении температуры в 250 °С немедленно выключите нагреватель.

В. Дело в том, что нагрев будет в течение некоторого времени продолжаться за счет теплоты, запасенной нагревателем: в конце процесса нагрева нагреватель, как вы сможете убедиться, светится светло красным светом, т.е. его температура составляет примерно 600–700 град. Если забыть выключить нагреватель при 250 град., термометр может быть испорчен. Если все-таки перегрев имел место – немедленно обратитесь к преподавателю или сотруднику лаборатории.

Г. По окончании измерений и выключения нагревателя оставьте установку «как есть», она будет остывать.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

1. Постройте график зависимости давления насыщенного водяного пара P от его абсолютной (в кельвинах) температуры T .

2. Постройте график зависимости $\ln(P)$ от $10^3/T$. Определите (с учетом масштаба по осям) угловой коэффициент k получившейся прямой. Найдите k либо проведя по экспериментальным точкам прямую «на глазок», либо методом парных точек, либо методом наименьших квадратов.

3. Вычислите теплоты парообразования молярную $Q = R \cdot k$ (где k – определенный в предыдущем пункте угловой коэффициент прямой) и удельную $q = Q/M$. Если по горизонтальной оси откладывалась величина $10^3/T$, то формула для расчета теплоты парообразования следующая: $Q = (1000 \cdot R)/k$, где $R = 8,314$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; k – полученный вами угловой коэффициент.

4. По формуле (2.13.11) вычислите внешнюю теплоту парообразования Q_2 . Вычислите внутреннюю теплоту парообразования $Q_1 = Q - Q_2$ и их отношение $\alpha = Q_1 / Q_2$.

5. Оцените по графику (по разбросу экспериментальных точек относительно проведенной прямой) абсолютную ΔQ и относительную δQ погрешности определения Q . Если прямая была проведена «на глазок», то необходимую для этого погрешность определения углового коэффициента можно оценить следующим образом. Не выходя за рамки правил проведения прямой по точкам (см. ниже),

повернуть ее насколько возможно по часовой стрелке и против нее, что и даст минимальное k_{\min} и максимальное k_{\max} значения углового коэффициента. Тогда в рамках метода Корнфельда среднее значение углового коэффициента, его относительная и абсолютная погрешности равны, соответственно:

$$\langle k \rangle = \frac{k_{\max} + k_{\min}}{2}; \quad \delta k = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{k_{\max} + k_{\min}} \cdot 100\%; \quad \Delta k = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{2}$$

«На глазок» прямую по экспериментальным точкам следует проводить так, чтобы сверху и снизу от нее было примерно одинаковое число примерно одинаково отклоненных от проводимой прямой экспериментальных точек. Для этого, безусловно, необходимо иметь прозрачный угольник или прозрачную линейку, чтобы видеть точки, попадающие под угольник или линейку. Очевидно, что такой приближенный метод не способен дать однозначный результат, на этом и основан предложенный ранее способ оценки среднего углового коэффициента и его погрешности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как изменяется теплота парообразования с ростом температуры? Чему она равна при критической температуре?
2. Что называется внешней и внутренней теплотой парообразования?
3. Возможно ли изотермическое испарение некоторой массы жидкости температурой ниже критической, без подвода тепла извне?
4. Удельная теплота парообразования воды примерно в 10 раз превышает удельную теплоту парообразования бензина. Чем это объяснить?
5. При изохорическом нагревании некоторого объема жидкости, меньшего, чем объем сосуда, при некоторой температуре вся жидкость испарилась. Как будет меняться давление в объеме при дальнейшем повышении температуры?
6. Сформулируйте условия термодинамического равновесия жидкости и ее пара.
7. Как меняются массы жидкой и газовой фаз двухфазной системы при изотермическом увеличении объема?

8. Давление в газе при постоянных объеме и температуре пропорционально числу частиц в газе. Какие процессы поддерживают постоянство давления в двухфазной системе жидкость – газ при изменении ее объема?

9. Нарисуйте на диаграмме (p , V) участок изотермы некоторой системы, соответствующей ее двухфазному состоянию (жидкость – газ).

10. Будет ли – при постоянной температуре – оставаться постоянным давление в двухфазной системе после того, как она перейдет в однофазное состояние?

11. Нарисуйте на диаграмме (p , V) изотерму некоторой системы, начиная с объема, при котором система находится в жидком состоянии, и кончая объемом, при котором система находится в газовом состоянии.

12. На рисунке, на котором нарисована изотерма из п. 11 выше, изобразите соответствующую изотерму Ван-дер-Ваальса.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.

2. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Бин-ном. Лаборатория знаний, 2004.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975.

2. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Физматгиз, 1976.

Работа 2.15

ЭФФЕКТ ДЖОУЛЯ–ТОМСОНА

Цель: изучение эффекта Джоуля–Томсона в углекислом газе и азоте, измерение константы Ван-дер-Ваальса a для этих газов.

Оборудование: баллоны с исследуемыми газами, установка для исследования эффекта Джоуля–Томсона, двухканальный электронный термометр с датчиками температуры.

ВВЕДЕНИЕ

В обычных состояниях газообразных веществ (при давлениях, близких к атмосферному, и температурах, близких к комнатной) средние расстояния между молекулами в десятки раз превосходят размеры молекул, из-за чего молекулы в течение подавляющей доли времени своего движения не испытывают силового воздействия со стороны соседей, а взаимодействие молекул происходит в виде кратковременных столкновений. Свойства газов в таких состояниях хорошо описываются моделью идеального газа, в которой пренебрегают притяжением молекул друг к другу и суммарным объемом молекул газа по сравнению с объемом сосуда, в котором находится этот газ. В рамках этой модели параметры состояния газа связаны друг с другом уравнением Менделеева–Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT ,$$

где p – давление газа; V – его объем; m – масса газа; M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура.

Внутренняя энергия идеального газа U определяется единственным термодинамическим параметром состояния – температурой:

$$U = C_v \cdot T ,$$

где C_v – теплоемкость газа при постоянном объеме.

При охлаждении газов и повышении их плотности межмолекулярное взаимодействие начинает играть все более заметную роль и модель идеального газа нуждается в коррекции.

Несмотря на огромное разнообразие химических соединений, молекулы разных веществ (если эти молекулы достаточно просты) взаимодействуют друг с другом, в общих чертах, сходным образом. Если расстояние между молекулами относительно велико, молекулы притягиваются друг к другу, причем величина силы притяжения довольно быстро спадает по мере удаления молекул друг от друга. При сближении молекул, начиная с некоторого расстояния r_0 , притяжение сменяется отталкиванием, причем сила отталкивания очень резко возрастает при попытках дальнейшего сближения молекул. Такой характер зависимости силы взаимодействия молекул от расстояния между ними отражается графиком зависимости потенциальной энергии взаимодействия молекул от расстояния между ними (рис. 2.15.1). Расстояние r_0 , при котором потенциальная энергия достигает минимального значения, можно условно назвать *размером молекулы*.

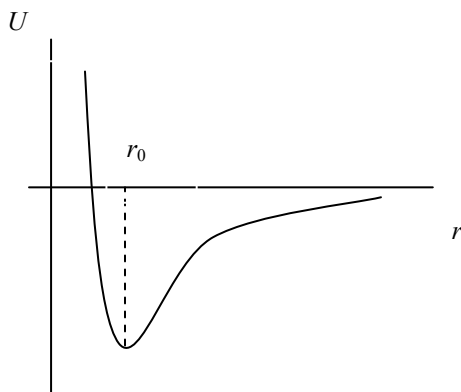


Рис. 2.15.1

Внутренняя энергия реального (т.е. существующего в природе) газа состоит из суммарной кинетической энергии движения молекул (поступательного и вращательного), энергии внутримолекулярных колебаний (она проявляется при достаточно высоких температурах) и потенциальной энергии взаимодействия молекул друг с другом. Кинетическая и колебательная часть внутренней энергии

определяется температурой газа, потенциальная энергия взаимодействия – межмолекулярными расстояниями, т.е. объемом газа. Таким образом, в общем случае внутренняя энергия газа есть функция двух переменных:

$$U = U(T, V).$$

Конкретный вид зависимости внутренней энергии газа от объема определяется химической природой газа. Однако во многих случаях удовлетворительные результаты дает модель газа, предложенная Ван-дер-Ваальсом, согласно которой внутренняя энергия любого газа может быть записана как

$$U = C_V \cdot T - \frac{v^2 a}{V},$$

а уравнение состояния имеет вид (уравнение Ван-дер-Ваальса):

$$\left(P + \frac{v^2 a}{V^2} \right) (V - vb) = vRT.$$

Здесь v – число молей в описываемой порции газа; a и b – параметры (константы Ван-дер-Ваальса), зависящие от химической природы газа и определяемые экспериментально. Константа a характеризует силы межмолекулярного взаимодействия, b связана с суммарным объемом молекул данного газа, содержащихся в одном моле.

При расширении в пустоту газ не совершает работы по перемещению окружающих тел. Если к тому же газ теплоизолирован от окружающей среды (заключен в адиабатическую оболочку), то, согласно первому началу термодинамики, его внутренняя энергия должна оставаться постоянной.

Температура идеального газа не должна меняться при расширении в вакуум. В реальном газе при таком процессе из-за увеличения расстояний между молекулами должны меняться потенциальная часть внутренней энергии и, соответственно, температура. Таким образом, по изменению температуры газа при расширении в вакуум можно судить о доле энергии взаимодействия молекул во внутренней энергии газа.

Измерять температуру газа при его расширении в вакуум весьма затруднительно с технической точки зрения. Гораздо проще осуществить процесс, при котором газ, протекая по трубопроводу под

некоторым давлением через пористую перегородку, расширяется, но не в вакуум, а в участок трубопровода, где находится тот же газ, но при меньшем давлении (рис. 2.15.2). При таком расширении каждая порция газа, протекающая через перегородку, совершает работу против внешнего давления, но по соотношению давлений и температур по разные стороны перегородки можно судить о роли межмолекулярного взаимодействия в текущем по трубопроводу газе. Такой процесс был осуществлен и исследован английскими физиками Дж. П. Джоулем и В. Томсоном и его называют *процессом Джоуля–Томсона*, а эффект понижения температуры газа при протекании через пористую перегородку – *эффектом Джоуля–Томсона*. Рассмотрим процесс Джоуля–Томсона более подробно.

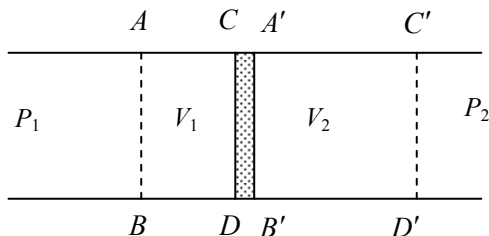


Рис. 2.15.2

Пусть по теплоизолированному трубопроводу, в котором установлена пористая перегородка, протекает газ благодаря тому, что по разные стороны перегородки поддерживаются разные давления $P_1 > P_2$ (см. рис. 2.15.2). Выделим в потоке газа слева от перегородки объем V_1 , ограниченный сечениями трубопровода AB и CD . С течением времени газ, заключенный в этом объеме, протечет через перегородку и, оказавшись справа от нее, займет объем V_2 между сечениями $A'B'$ и $C'D'$. При этом сила давления газа, находящегося слева от сечения AB , совершит над выделенной порцией газа работу $A_1' = P_1 V_1$ (соответственно, сама выделенная порция газа совершит работу $A_1 = -A_1' = -P_1 V_1$). Оказавшись правее перегородки, выделенная порция газа (заключенная теперь между сечениями $A'B'$ и $C'D'$ и занимающая объем V_2) совершит работу $A_2 = P_2 V_2$.

Поскольку тепло к газу не подводится, из первого начала термодинамики находим: $U_2 - U_1 + P_2V_2 - P_1V_1 = 0$, т.е.

$$U_1 + P_1V_1 = U_2 + P_2V_2. \quad (2.15.1)$$

Таким образом, при стационарном течении газа через пористую перегородку остается постоянной функция состояния $I = U + PV$, называемая энтальпией.

Поскольку для идеального газа $U = C_V T$ (C_V – теплоемкость при постоянном объеме, T – температура), а $PV = RT$, для идеального газа равенство (2.15.1) может выполняться только при условии $T_1 = T_2$, т.е. в случае идеального газа эффект Джоуля–Томсона не наблюдается. Если же газ описывается уравнением Ван-дер-Ваальса, температура газа по разные стороны перегородки принимает разные значения. При этом, как показывает анализ, выходящий за рамки настоящего пособия, отношение разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$ к разности давлений $\Delta P = P_2 - P_1$ имеет вид

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{bRT(V-b)^2 - 2a/V^2}{C_p(\partial P/\partial V)_T}. \quad (2.15.2)$$

Если ограничиться условиями, близкими к нормальным, когда различия в свойствах идеального и ван-дер-ваальсовского газа невелики, это сравнительно громоздкое выражение можно заметно упростить. Во-первых, можно пренебречь величиной b по сравнению с молярным объемом газа V . Во-вторых, производную $(\partial P/\partial V)_T$ можно вычислить, пользуясь уравнением состояния идеального газа. Тогда уравнение (2.15.2) приобретает вид

$$\frac{\Delta T}{\Delta P} = \frac{2a/RT}{C_p}. \quad (2.15.3)$$

Отношение $\Delta T/\Delta P$ в дальнейшем будем называть коэффициентом Джоуля–Томсона и обозначать для краткости символом μ : $\mu = \Delta T/\Delta P$. Значения молярной теплоемкости большинства газов известны из экспериментов, для азота и углекислого газа они приведены в табл. 2.15.1 (для температур вблизи 20 °C).

Таблица 2.15.1

Газ	$C_p, \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \times \text{К}}$
N ₂	28,2
CO ₂	36,7

Используя эти значения и измерив коэффициент Джоуля–Томсона, можно рассчитать значение константы Ван-дер-Ваальса a :

$$a = \frac{\mu \cdot C_p \cdot R \cdot T}{2}. \quad (2.15.4)$$

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Газовые вентили на установке следует открывать медленно и осторожно, следя за величиной давления. Превышение давления над рекомендованными в данном описании значениями приводит к неоправданному расходу газов и может вызвать разрушение установки.

2. Необходимо следить за целостностью шлангов, отводящих газы, прошедшие через пористую перегородку, за пределы лаборатории. Это особенно важно при работе с углекислым газом, так как повышенная концентрация углекислого газа во вдыхаемом воздухе вредна для здоровья.

3. Закончив измерения, необходимо закрыть вентили редукторов газовых баллонов, чтобы не допустить бесполезного выхода газа.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка для исследования эффекта Джоуля–Томсона изображена на рис. 2.15.3. Исследуемый газ из баллона 1 с редуктором 2 и регулировочным вентилем 3 по трубопроводу 4 через змеевик 5 поступает в стеклянный цилиндр 6 с пористой перегородкой 7 внутри него. На входе потока газа в цилиндр установлен манометр 8, по обе стороны пористой перегородки расположены термодатчики 9 и 10, введенные в стеклянный цилиндр через обжимные резиновые уплотнения на его торцах. Сигналы термодатчиков подаются на электронный блок измерения и визуализации температуры 11.

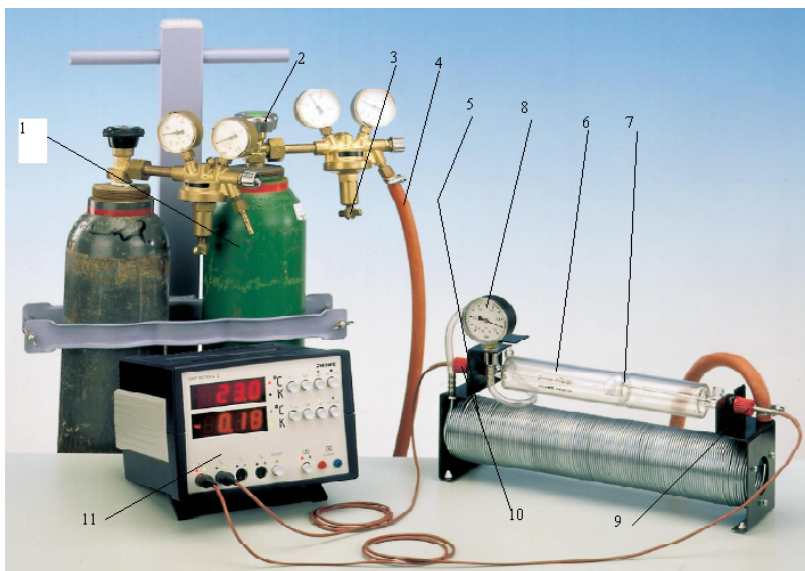


Рис. 2.15.3

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включите блок измерения температуры нажатием клавиши на задней стенке блока. Блок настроен так, что на верхнем табло высвечивается температура поступающего в стеклянный цилиндр газа (показание должно быть около $20\text{ }^{\circ}\text{C}$), на нижнем – разность температур двух термодатчиков. Начальное значение этой разности не должно превышать $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Если показания блока измерения температуры заметно отличаются от указанных, обратитесь к дежурному сотруднику лаборатории.

2. Убедитесь, что регулировочный вентиль 3 закрыт. В закрытом положении рукоятка вентиля вращается без усилия. Если рукоятка вращается туго, сделайте несколько оборотов против часовой стрелки, пока сопротивление вращению не исчезнет. Если что-либо в поведении аппаратуры вызывает сомнения, немедленно обратитесь к дежурному сотруднику или преподавателю.

3. Поверните рукоятку редуктора 2 против часовой стрелки на 1–2 об. Тем самым баллон с газом будет открыт.

4. Медленно и осторожно вращайте рукоятку регулировочного вентиля 3 по часовой стрелке, следя за показаниями манометра 8. При этом вентиль 3 начнет открываться и исследуемый газ потечет из баллона в установку. Когда давление на входе в стеклянный цилиндр (т.е. показание манометра 8) достигнет значения 0,1 бар, прекратите вращение рукоятки. Выждите 1–1,5 мин, пока значение разности температур не перестанет изменяться, после чего запишите значения давления и разности температур в соответствующие ячейки табл. 2.15.2.

Таблица 2.15.2

P , бар	0,1	0,2	0,3	0,4
ΔT , °C				

Продолжение табл. 2.15.2

P , бар	0,5	0,6	0,7
ΔT , °C			

5. Выполните операции по п. 4 для давлений 0,2; 0,3 бар и т.д. до 0,7 бар. Результаты записывайте в табл. 2.15.2.

6. Закройте регулировочный вентиль 3 (вращением его рукоятки против часовой стрелки до исчезновения сопротивления) и вентиль редуктора 2 (вращением его рукоятки по часовой стрелке до упора).

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По данным табл. 2.15.2 постройте график зависимости разности температур по разные стороны пористой перегородки ΔT от давления P газа перед перегородкой. Точки графика должны (с учетом экспериментальных погрешностей) лежать на прямой.

2. Методом парных точек найдите коэффициент наклона построенного графика и погрешность этого коэффициента. Полученный коэффициент наклона представляет собой коэффициент Джоуля–Томсона μ (см. формулы (2.15.2) и (2.15.3)).

3. Используя полученный коэффициент Джоуля–Томсона, по формуле (2.15.3) вычислите константу Ван-дер-Ваальса a и ее погрешность.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам работы напишите короткое (порядка половины страницы лабораторного журнала) заключение, в котором отразите:

постановку экспериментальной задачи (что изучалось в данной работе);

метод решения этой задачи;

основной достигнутый результат (характер зависимости разности температур от давления газа и полученное значение константы Ван-дер-Ваальса).

Сравните измеренное в работе значение a с литературным (взятым из справочных таблиц). В случае заметного (за пределами экспериментальных погрешностей) расхождения полученного и табличного значения прокомментируйте возможные причины такого расхождения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими термодинамическими параметрами состояния определяется внутренняя энергия газа в общем случае?

2. Как связана внесистемная единица давления «бар» с единицей давления системы СИ?

3. В каких физических условиях применима модель идеального газа?

4. В чем состоит модель газа Ван-дер-Ваальса? Напишите уравнение состояния газа Ван-дер-Ваальса.

5. Каков физический смысл констант Ван-дер-Ваальса a и b ?

6. Напишите выражение для внутренней энергии газа Ван-дер-Ваальса через термодинамические параметры состояния.

7. Что происходит с температурой в результате расширения в пустоту идеального газа и газа Ван-дер-Ваальса?

8. В чем состоит эффект Джоуля–Томсона?

9. Какая функция термодинамических параметров состояния газа остается неизменной при протекании газа через пористую перегородку?

10. Возможен ли эффект Джоуля–Томсона в случае протекания идеального газа?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2006.

Дополнительная

1. Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика. М.: Наука, 1976.

Работа 2.16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ ДИЛАТОМЕТРА

Цель: знакомство с явлением теплового расширения твердых тел, определение термического коэффициента линейного расширения меди.

Оборудование: dilatометр с индикатором часового типа; иммерсионный термостат А100; ванна для термостата; лабораторный термометр; измерительная труба; соединительные резиновые трубки; медный стержень.

ВВЕДЕНИЕ

Зависимость потенциальной энергии U от межатомного расстояния r в кристаллической решетке, как правило, может быть описано функцией, представленной на рис. 2.16.1. В первом приближении колебания атомов в узлах решетки можно считать гармоническими (пунктирная кривая). Положение минимума r_0 в случае малых колебаний совпадает со средней величиной межатомных расстояний. С увеличением температуры T возрастают средняя скорость атомов и, следовательно, амплитуда колебаний, в результате начинает заметнее проявляться их ангармонизм (отклонение от гармонического закона). Из графика видно, что, в силу асимметрии энергетической «ямы», при увеличении энергии колебаний среднее межатомное расстояние r становится больше, чем r_0 . Это означает, что с увеличением температуры объем V твердых тел возрастает.

Коэффициент $\alpha_{об} = (\partial V / \partial T)_p / V$ называется *термическим коэффициентом объемного расширения*, $\alpha = (\partial l / \partial T)_p / l$ – *термическим коэффициентом линейного расширения* (l – длина тела). Можно показать, что в первом приближении α не зависит от температуры, сле-

довательно, относительное удлинение тела оказывается пропорциональным приращению температуры:

$$dl / l = \alpha dt . \quad (2.16.1)$$

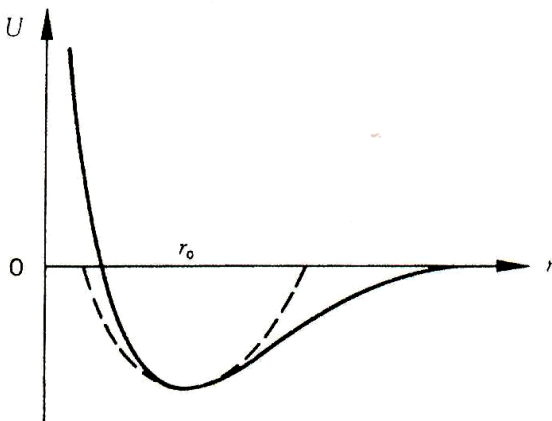


Рис. 2.16.1

При больших изменениях температуры или высокой точности измерений и расчетов следует учитывать, что, на самом деле, с увеличением температуры этот коэффициент возрастает, однако зависимость эта – чрезвычайно плавная. Так, для железа средний по интервалу температуры коэффициент линейного расширения при нагревании от 0 до 75 °С равен $1,21 \cdot 10^{-5}$ град.⁻¹, а для интервала от 0 до 750 °С – $1,52 \cdot 10^{-5}$ град.⁻¹. Поэтому считается, что при небольших изменениях температуры α не зависит от температуры, и для практических расчетов пользуются средним коэффициентом линейного расширения:

$$\alpha = (l_2 - l_1) / [l_1 (t_2 - t_1)], \quad (2.16.2)$$

где t_1 и t_2 – начальная и конечная температуры тела, °С; l_1 и l_2 – длины тела, соответствующие этим температурам.

Большинство жидкостей при нагревании ведут себя аналогичным образом, однако имеются и исключения (например, вода при температуре $t = 0 \text{--} 4$ °С).

Уравнение (2.16.2) удобно преобразовать к виду $l_2 = l_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)]$, откуда следует, что если принять длину тела l_0 при температуре 0°C за начальную, то длина тела l_t при температуре t равна

$$l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (2.16.3)$$

Выражение (2.16.3) кладется в основу практических расчетов по определению коэффициента линейного расширения тел. Действительно, если при температуре t_1 длина тела равна l_1 , а при температуре t_2 — l_2 , то на основании равенства (2.16.3)

$$l_1 = l_0(1 + \alpha t_1); \quad l_2 = l_0(1 + \alpha t_2).$$

Отсюда получаем выражение для α :

$$\alpha = (l_2 - l_1) / (l_1 t_2 - l_2 t_1). \quad (2.16.4)$$

Ввиду малости α длины l_1 и l_2 исследуемого образца в небольшом интервале температур отличаются долями процента (0,005–0,01 %), и поэтому расчетную формулу можно упростить, представив ее в виде (2.16.2). Ошибка, получающаяся при таком упрощении, много меньше погрешности метода данной работы. Поэтому в качестве расчетной формулы в данной работе используют именно формулу (2.16.2).

Термический коэффициент линейного расширения представляет собой важную характеристику твердого тела. Однако его измерения из-за малости удлинения образцов связаны с экспериментальными трудностями, а сами измерения могут быть выполнены лишь на приборах с высокой степенью точности. В настоящей работе применяется метод прямого (непосредственного) измерения удлинения образца с помощью дилатометра, прибора высокого класса точности.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Установка (рис. 2.16.2) состоит из дилатометра*, предназначенного для измерения удлинения образца при нагревании, и термостата, предназначенного для нагрева образца и поддержания его температуры.

* *Дилатометр* — «расширяю» (от лат. dilato).

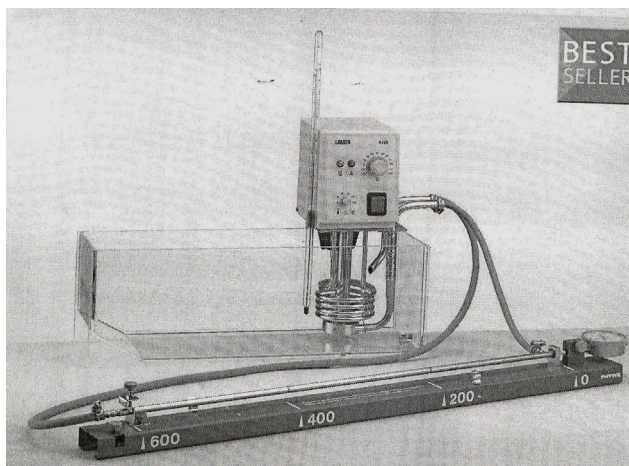


Рис. 2.16.2

Дилатометр снабжен индикатором часового типа, по которому ведутся измерения удлинения медного полого стержня, вставленного в дилатометр. Измеряемый стержень соединен с термостатом двумя резиновыми трубками, по которым осуществляется циркуляция воды. Температура измеряется по лабораторному термометру, прикрепленному к термостату.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Не трогать переключатели на задней панели термостата.
2. Не нагревать термостат выше 60 °С.
3. Не снимать соединительные резиновые трубки.

ЗАДАНИЕ

Измерение линейного расширения стержня

1. Выставить стрелку индикатора дилатометра на нуль.
2. Снять показание комнатной температуры.
3. Включить термостат в сеть.
4. Выставить на шкале термостата температуру примерно на 5 град. выше комнатной и включить электронагреватель. Когда в

термостате установится требуемая температура, нагревание его автоматически прекратится. Снять показание индикатора дилатометра и занести его в подготовленную таблицу (табл. 2.16.1).

5. Произвести подобные измерения через каждые 5 °С, продолжая нагрев до 55–60 °С.

Таблица 2.16.1

Номер измерения	$t, ^\circ\text{C}$	Показание индикатора дилатометра, дел.	Показание индикатора дилатометра, мкм
1			
2			
3			
...			

ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По результатам измерений в таблице построить график зависимости удлинения стержня Δl (в мкм) от приращения температуры Δt . Если измерения проводились правильно, то график должен быть почти прямолинейным.

2. Определить угловой коэффициент наклона графика к оси абсцисс: $k = \Delta l / \Delta t$. Для определения k использовать метод парных точек.

3. Погрешность углового коэффициента оценить по методу Корнфельда: $\Delta k = (k_{\max} - k_{\min}) / 2$, где k_{\max} и k_{\min} – максимальное и минимальные значения k_i , полученные методом парных точек.

4. По формуле

$$\alpha = \Delta l / (l \Delta t) = k / l_1,$$

следующей из выражения (2.16.2), найти средний коэффициент линейного расширения стержня.

5. Оценить относительную погрешность α по формуле

$$E_\alpha = \left[(\Delta k / k)^2 + (\Delta l_1 / l_1)^2 \right]^{1/2}.$$

Найти абсолютную погрешность α по формуле $\Delta \alpha = \alpha E_\alpha$.

6. Сравнить полученный в работе коэффициент линейного расширения α с табличным значением для соответствующего материала и дать заключение.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему при нагревании тела, как правило, расширяются?
2. Какие вам известны исключения из этого правила?
3. Что такое термический коэффициент линейного расширения?
4. Зависит ли термический коэффициент линейного расширения тел от температуры?
5. С чем связаны трудности экспериментального измерения термического коэффициента линейного расширения твердых тел?
5. Что такое dilatометр и для чего он служит в этой работе?
6. Что такое термостат и для чего он служит в этой работе?
7. Какой образец будет использоваться в этой работе для измерения термического коэффициента линейного расширения?
8. В каком температурном диапазоне будет исследоваться зависимость удлинения образца от температуры?
9. Что должен представлять собой график зависимости удлинения образца от приращения температуры?
10. С чем могут быть связаны основные погрешности в этой работе?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, 1998.
2. Иродов И.В. Физика макросистем. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.

Дополнительная

1. Гиршфельдер Дж., Кертисс Ч., Берд Р. Молекулярная теория газов и жидкостей: пер. с англ. М., 1961.
2. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М., 1974.

Работа 2.17

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ МЕТАЛЛОВ МЕТОДОМ ВРАЩАЮЩИХСЯ ЦИЛИНДРОВ

Цель: изучение экспериментального метода определения удельной теплоемкости металлов.

Оборудование: установка для измерения теплоемкости, сменные металлические цилиндры, термометр или термопара с цифровым термометром, гири, секундомер, динамометры, штангенциркуль.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных энергетических величин, характеризующих состояние любой термодинамической системы, является внутренняя энергия. *Внутренняя энергия U* термодинамической системы складывается из кинетических энергий составляющих ее атомов или молекул и потенциальной энергии их взаимодействия. Кинетическая энергия термодинамической системы как целого и потенциальная энергия ее частей во внешнем поле сил не входят во внутреннюю энергию системы.

Внутренняя энергия есть функция состояния системы, т.е. в каждом конкретном состоянии внутренняя энергия зависит только от параметров этого состояния и не зависит от предыстории системы. Поэтому приращение внутренней энергии при переходе термодинамической системы из одного состояния в другое есть разность ее конечного и начального значений.

Во все термодинамические законы входит не сама внутренняя энергия, а ее приращение. Поэтому внутреннюю энергию можно определять с точностью до произвольной аддитивной постоянной, выбираемой в каждом конкретном случае из соображений удобства.

Существуют два различных способа изменения внутренней энергии термодинамической системы: совершение *работы A'* над системой и сообщение системе *количества теплоты Q* .

Совершение работы над термодинамической системой связано с макроскопическим перемещением под действием внешних сил частей системы друг относительно друга, сопровождаемым изменением ее формы или объема.

Работа внешней силы \mathbf{F} по перемещению материальной точки из точки 1 траектории в точку 2 в общем случае зависит от формы траектории и определяется выражением

$$A' = \int_1^2 \mathbf{F} d\mathbf{r}, \quad (2.17.1)$$

где интеграл берется вдоль траектории.

Из выражения (2.17.1) и третьего закона Ньютона непосредственно следует, что работа внешних сил над системой A' и работа самой системы над внешними телами A связаны выражением

$$A' = -A. \quad (2.17.2)$$

Сообщение термодинамической системе количества теплоты Q не связано с макроскопическим перемещением частей системы друг относительно друга. Оно происходит при контакте двух систем, имеющих разную температуру, или при контакте системы с излучением. В первом случае молекулы одной из систем (имеющей большую температуру) двигаются быстрее и при столкновениях на поверхности соприкосновения с молекулами второй системы (имеющей меньшую температуру) передают им часть своей энергии. Во втором случае молекулы на поверхности или в объеме рассматриваемого тела поглощают часть падающего излучения, приобретая дополнительную энергию. Таким образом, сообщение системе количества теплоты можно охарактеризовать как изменение ее внутренней энергии без совершения работы.

Совокупность микроскопических процессов, приводящих к передаче энергии термодинамической системе без совершения работы, называется *теплопередачей*.

Подчеркнем, что как работа, так и количество теплоты не являются функциями состояния, т.е. они имеют смысл только для перехода термодинамической системы из одного состояния в другое. Поэтому они не могут быть записаны как приращение какой-то величины.

В соответствии с вышеизложенным, изменение внутренней энергии термодинамической системы U происходит из-за совершения внешними силами работы над системой A' и из-за сообщения системе количества теплоты Q . Поэтому для рассматриваемой термодинамической системы можно записать закон сохранения энергии в виде

$$\Delta U = Q + A', \quad (2.17.3)$$

где ΔU – приращение внутренней энергии.

Уравнение (2.17.3) называется *превым началом термодинамики*.

Для бесконечно малого изменения состояния системы уравнение (2.17.3) примет вид

$$dU = d'Q + d'A'. \quad (2.17.4)$$

В выражении (2.17.4) dU – полный дифференциал, т.е. приращение внутренней энергии системы, а величины $d'Q$ и $d'A'$ не являются полными дифференциалами (поэтому около буквы «d» стоит «штрих»), они представляют собой бесконечно малое количество теплоты, сообщенное системе, и бесконечно малую работу, совершенную внешними силами над системой соответственно.

Теплоемкостью тела $C_{\text{тела}}$ называется количество теплоты, которое нужно сообщить телу, чтобы оно нагрелось на один градус:

$$C_{\text{тела}} = \frac{d'Q}{dT}. \quad (2.17.5)$$

Теплоемкость тела зависит от его массы, поэтому в качестве характеристики вещества, из которого сделано тело, удобно использовать удельную теплоемкость. *Удельной теплоемкостью* называется количество теплоты, которое нужно сообщить телу единичной массы, чтобы оно нагрелось на один градус:

$$c = \frac{d'Q}{dm dT}. \quad (2.17.6)$$

Так как даже одно и то же вещество ведет себя по-разному при различных термодинамических процессах (изобарном, изохорном), то принято различать удельную теплоемкость при постоянном давлении c_p и удельную теплоемкость при постоянном объеме c_v .

Металлы обладают малой сжимаемостью, поэтому при температурах, много меньше температуры плавления, их теплоемкость при постоянном объеме отличается от теплоемкости при постоянном давлении на доли процента.

Экспериментально удобно измерять теплоемкость при постоянном давлении, так как удержание нагреваемых твердых образцов при постоянном объеме сопряжено с рядом технических трудностей. Поэтому в справочниках для металлов (и для других веществ в твердой фазе), в основном, представлены величины, измеренные при постоянном давлении, т.е. c_p .

Вообще говоря, удельные теплоемкости c_p и c_v для всех веществ сильно зависят от температуры. Например, в чистом алюминии удельная теплоемкость при постоянном давлении меняется от 8,9 Дж/кг×К при температуре 20 К до 1037 Дж/кг×К при температуре 600 К.

В настоящей работе повышение температуры металлических образцов составляет несколько градусов ($\Delta T < 8$ К). Поэтому в условиях выполняемого эксперимента удельную теплоемкость металла можно считать постоянной величиной.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В работе используется установка для измерения удельной теплоемкости металлов, в которой используются вращающиеся цилиндры. Установка показана на рис. 2.17.1.

Основной деталью установки является металлический цилиндр 1, который можно вращать вокруг своей оси ручкой 2. В комплект входят три цилиндра – два латунных (маленький и большой) и алюминиевый.

На цилиндр наматывается специальная полимерная лента 3, которая одним концом закрепляется на кронштейне 5 через динамометр 4, а на другой ее конец подвешивается гиря 6.

При вращении цилиндра с помощью ручки происходит его движение относительно ленты. Гиря создает натяжение ленты. За счет возникающего трения ленты о поверхность цилиндра происходит выделение тепла, и цилиндр нагревается.

Изменение температуры цилиндра может быть зарегистрировано с помощью термометра 7, закрепленного на штативе 8 так, что сам термометр расположен на оси вращающегося цилиндра, а его измерительная часть погружена в наполненное термопастой отверстие на торце цилиндра.

В работе температура внутри цилиндра измеряется через равные промежутки времени, определяемые по электронному секундомеру 9.

Вместо обычного спиртового термометра (как на рис. 2.17.1) для измерения температуры может быть использован цифровой термометр, использующий терморезистор, в качестве датчика температуры. В этом случае терморезистор крепится к столу с помощью зажима штатива 8 так, что его измерительная часть погружается в отверстие на торце цилиндра, наполненное термопастой.

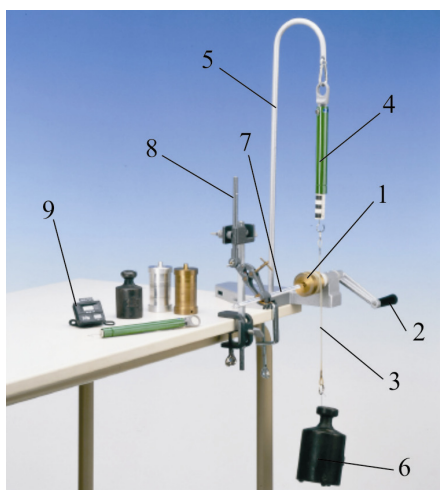


Рис. 2.17.1



Рис. 2.17.2

Внешний вид передней панели цифрового термометра представлен на рис. 2.17.2. Терморезистор должен быть подключен к входу цифрового термометра, обозначенному на его панели « T_1 » (см. рис. 2.17.2). Тогда в верхнем окне цифровой термометр покажет измеряемую температуру. Включение цифрового термометра осуществляется с помощью кнопки, расположенной на его задней панели (на рисунке не показана).

Рассмотрим подробнее процессы, происходящие в системе при вращении рукоятки 2.

При вращении цилиндра с постоянной угловой скоростью лента и гири покоятся, и динамометр показывает некоторое постоянное значение силы натяжения ленты над цилиндром. При этом на ленту действуют три силы: сила со стороны динамометра F_d (ее значение непосредственно показывает динамометр), сила трения между лентой и цилиндром $F_{тр}$ и сила тяжести гири $F_t = Mg$ (рис. 2.17.3), где M – масса гири.

По второму закону Ньютона для ленты в проекции на вертикальную ось получим:

$$F_{тр} = F_t - F_d = Mg - F_d. \quad (2.17.7)$$

Таким образом, при известных массе гири и показаниям динамометра сила трения, действующая на ленту со стороны движущегося цилиндра, может быть вычислена по формуле (2.17.7).

Пусть, равномерно вращая рукоятку, цилиндр повернули на N оборотов, тогда перемещение ленты относительно поверхности цилиндра составит $s = 2\pi r \cdot N = \pi dN$, где r и d – радиус и диаметр цилиндра соответственно. Так как сила трения всегда направлена в сторону, противоположную движению, то ее работа отрицательна. Используя (2.17.1), получим для работы силы трения следующее выражение:

$$A_{тр} = -F_{тр} \cdot s = -F_{тр} \cdot \pi dN, \quad (2.17.8)$$

где $F_{тр}$ – модуль силы трения, определяемый по формуле (2.17.7).

При скольжении ленты по цилиндру основная доля работы, затраченной на вращение рукоятки посредством трения, переходит в тепло. Таким образом, согласно закону сохранения энергии, всей термодинамической системе, в состав которой входят детали установки (цилиндр, лента, термометр), в процессе вращении рукоятки сообщается некоторое количество теплоты Q , равное по модулю работе силы трения (2.17.8), т.е.

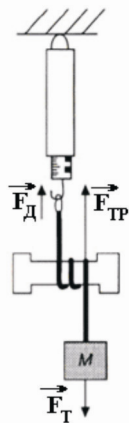


Рис. 2.17.3

$$Q = |A_{\text{тр}}| = F_{\text{тр}} \cdot \pi d N. \quad (2.17.9)$$

Согласно первому началу термодинамики (2.17.3), вся эта энергия переходит во внутреннюю энергию тел, входящих в термодинамическую систему, т.е. $\Delta U = Q$.

После окончания вращения рукоятки система охлаждается из-за теплообмена с окружающей средой.

Так как в условиях эксперимента теплоемкость тел, составляющих систему, можно считать не зависящей от температуры, то, используя определения теплоемкости (2.17.5) и удельной теплоемкости (2.17.6), количество теплоты Q можно записать в виде

$$Q = C_{\text{терм}} \Delta T + C_{\text{ленты}} \Delta T + c_p m \Delta T. \quad (2.17.10)$$

Здесь $C_{\text{терм}}$ и $C_{\text{ленты}}$ – теплоемкости термометра и ленты соответственно; ΔT – приращение температуры системы; c_p – удельная теплоемкость материала цилиндра при постоянном давлении; m – масса цилиндра.

В выражении (2.17.10) первое слагаемое определяет количество теплоты, идущее на нагрев термометра, второе – на нагрев ленты и третье – на нагрев металлического цилиндра.

Используя соотношения (2.17.7), (2.17.9) и (2.17.10), получим выражения для вычисления удельной теплоемкости металла, из которого сделан цилиндр, при постоянном давлении на основе экспериментальных данных:

$$c_p = \frac{1}{m} \left(\frac{(Mg - F_d) \cdot \pi d N}{\Delta T} - C_{\text{терм}} - C_{\text{ленты}} \right). \quad (2.17.11)$$

Рассматриваемая система является открытой (незамкнутой), так как, во-первых, она не теплоизолирована от окружающих тел и воздуха в комнате, а во-вторых, в нее поступает энергия через вращающуюся ручку. Таким образом, присутствует постоянный теплообмен с окружающими телами. Поэтому для определения приращения температуры частей системы из-за трения между ними используется особая методика.

Измеряется температура через равные промежутки времени, причем начинать измерения следует за несколько минут до начала

вращения цилиндра. Затем цилиндр вращают необходимое число оборотов и снова измеряют температуру через равные промежутки времени в течение нескольких минут. В итоге, если изобразить полученную зависимость температуры от времени графически, то получится кривая, представленная на рис. 2.17.4.

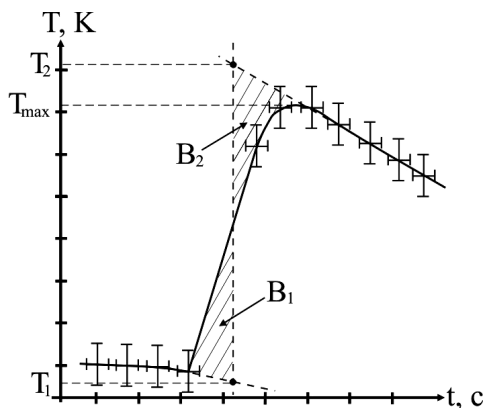


Рис. 2.17.4

Для определения величины ΔT необходимо на полученном графике экстраполировать прямолинейные участки графика (наклонные пунктирные прямые на рис. 2.17.4), и затем провести вертикальную прямую, параллельную оси температур, таким образом, чтобы площади отсекаемых фигур B_1 и B_2 (см. рис. 2.17.4) были одинаковы. Тогда величина ΔT равна разности температур точек пересечения экстраполированных прямых с вертикальной прямой, т.е. $\Delta T = T_2 - T_1$.

Так как точность такого метода определения разности температур не высока, то в качестве абсолютной погрешности величины ΔT следует взять либо разность полученной экстраполированной температуры T_2 и максимальной измеренной температуры T_{\max} , т.е. $\Delta(\Delta T) = T_2 - T_{\max}$, либо приборную погрешность термометра, в зависимости от того, какая из них больше.

В заключении приведем формулу для расчета погрешности удельной теплоемкости металла при постоянном давлении, вычисленной по формуле (2.17.11):

$$\varepsilon_{c_p} = \frac{\Delta c_p}{c_p} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(\Delta T)}{\Delta T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \frac{(g\Delta M)^2 + (\Delta F_d)^2}{(Mg - F_d)^2}}. \quad (2.17.12)$$

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Перед началом работы убедитесь, что все детали установки достаточно прочно закреплены на рабочем столе.
2. Ни в коем случае не изменяйте положение и угол наклона штатива, фиксирующего термометр (термопару).
3. При вращении цилиндра не прилагайте избыточных усилий, чтобы избежать поломки термометра и получения травмы.
4. Не снимайте гирю с нижнего конца пластиковой ленты. Не прилагайте к гире дополнительных усилий в направлении вниз.
5. Вращайте цилиндр ТОЛЬКО в направлении указанном стрелкой!

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Измерение удельной теплоемкости металлов

1. Работа выполняется для одного из имеющихся в комплекте цилиндров. Для конкретной установки на рабочем столе приведен материал используемого в установке цилиндра, его масса и диаметр, а также масса гири. Перед началом работы перепишите эти данные в лабораторный журнал.

2. В течение четырех минут измеряйте температуру T цилиндра каждые 30 с. Результаты запишите в заранее подготовленную табл. 2.17.1.

Внимание! Секундомер не выключайте.

3. Затем равномерно вращайте рукоятку, сделав 200 об. Запишите число оборотов N в лабораторный журнал.

Внимание! Рукоятку следует вращать только по направлению указанному стрелкой.

В процессе вращения рукоятки необходимо с помощью динамометра определить силу натяжения ленты над цилиндром F_d и записать это значение в лабораторный журнал.

4. Сразу после окончания вращения продолжайте измерять температуру каждые 30 с в течение 10–15 мин. Результаты продолжайте записывать в табл. 2.17.1.

5. Прекратите измерения и подождите 10 мин.

6. Выполните еще две серии измерений, согласно пп. 2–5.

Таблица 2.17.1

№	Серия 1		Серия 2		Серия 3	
	$t, \text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$	$t, \text{с}$	$T, ^\circ\text{C}$
1						
2						
3						
...

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. Постройте графики зависимости температуры от времени для каждой серии измерений. На графиках выполните все дополнительные построения и определите величины ΔT .

2. Вычислите среднее значение ΔT и его погрешность. В качестве абсолютной погрешности величин ΔT используйте максимальное значение среди погрешностей этих величин, определенных по графикам, и случайной погрешности их разброса вычисленной по методу Корнфельда.

3. С помощью формул (2.17.11) и (2.17.12) рассчитайте удельную теплоемкость материала цилиндра и ее погрешность.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении к работе представьте три графика зависимости температуры от времени для каждой серии измерений. Также приведите рассчитанные значения разности температур ΔT .

Представьте рассчитанное значение удельной теплоемкости материала цилиндра. Сравните полученный результат для удельной теплоемкости металла с табличным значением.

Табличные значения

Массы цилиндров	Большой латунный	1280±1 г
	Маленький латунный	640±1 г
	Алюминиевый	390±1 г
Теплоемкость термометра		4 Дж/К
Теплоемкость ленты		4 Дж/К
Удельная теплоемкость алюминия при постоянном давлении		902 Дж/кг·К
Удельная теплоемкость латуни при постоянном давлении		385 Дж/кг·К

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое внутренняя энергия термодинамической системы?
2. Укажите способы изменения внутренней энергии термодинамической системы.
3. Дайте понятия работы и количества теплоты.
4. Что такое теплоемкость, удельная теплоемкость?
5. От чего зависит удельная теплоемкость металлов?
6. Сформулируйте первое начало термодинамики.
7. Чему равна работа силы трения?
8. Как определяется сила трения ленты о цилиндр в используемой установке?
9. Как выглядит закон сохранения энергии для исследуемой термодинамической системы?
10. Какие величины получаются в работе в ходе прямых измерений, а какие – в ходе косвенных измерений?
11. Из каких основных деталей состоит установка?
12. С какой целью в ходе работы используется секундомер?
13. Как в ходе работы определяется приращение температуры цилиндра при его взаимодействии с лентой?
14. Какие величины вносят наибольший вклад в погрешность результирующего значения удельной теплоемкости металла?
15. Какие источники систематических ошибок могут присутствовать в настоящей работе?
16. Почему после окончания вращения ручки температура, измеряемая термометром, продолжает расти еще некоторое время?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Молекулярная физика и термодинамика. М.: Астрель, АСТ, 2003. С. 14–22.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2006. С. 44–64.

Дополнительная

1. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. С. 9–17.
2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981. С. 119–124.

Работа 2.18

КОЛЛЕКТОР СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Цель: измерение параметров воды в коллекторе и определение облученности плоскости коллектора.

Оборудование: коллектор, лабораторный термометр, циркуляционный насос, набор соединительных трубок, источник питания, теплообменник, нагреватель на 1 кВт, нагнетательный вентилятор (фен), галогеновая лампа на штативе, лабораторный стакан, рулетка, цифровой секундомер.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечный коллектор – устройство для поглощения солнечной энергии и преобразования ее в тепловую энергию воды. В состав солнечного теплового коллектора входит прозрачная панель, теплопоглощающая панель, набор соединительных трубок для жидкостного теплоносителя, теплоизоляционный слой. Схема солнечного коллектора представлена на рис. 2.18.1.

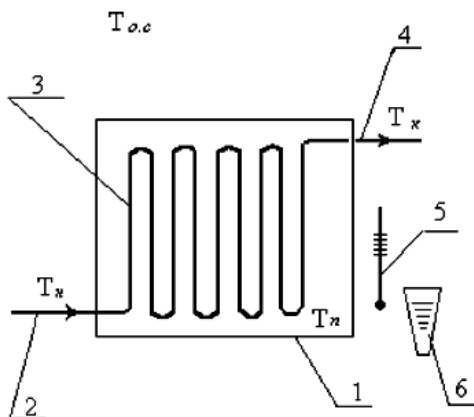


Рис. 2.18.1

На рисунке даны следующие обозначения: 1 – корпус коллектора; 2 – вход воды в коллектор; 3 – трубки; 4 – выход воды из коллектора; 5 – термометр; 6 – лабораторный стакан. Солнечный коллектор освещается галогеновой лампой известной интенсивности. Тепловая энергия, поглощенная коллектором, может быть вычислена через расход жидкости и разницу температур воды на входе и на выходе из поглотителя при условии, что температура воды, подаваемой на вход устройства, остается почти постоянной при сбрасывании энергии в резервуар. Этим определяется эффективность коллектора.

Основным элементом солнечной нагревательной системы является приемник, в котором происходит поглощение солнечного излучения и передача энергии жидкости. Самые простые приемники содержат весь объем жидкости, которую необходимо нагреть. Приемники более сложной конструкции нагревают за определенное время только небольшое количество жидкости, которая, как правило, затем накапливается в отдельном резервуаре (баке-аккумуляторе).

Поток лучистой энергии, поглощаемой поверхностью приемника, составляет

$$Q_{\text{пов}} = \tau_{\text{пов}} \alpha A I, \quad (2.18.1)$$

где $Q_{\text{пов}}$ – поток лучистой энергии, Вт; $\tau_{\text{пов}}$ – коэффициент пропускания солнечного излучения прозрачным покрытием (принимается равным 0,9 для одинарного стеклянного покрытия; 0,8 – для двойного стеклянного покрытия; 0,81 – для селективного стекла); α – коэффициент поглощения приемной поверхностью коллектора солнечного излучения (принимается равным 0,9 для одинарного стеклянного покрытия; 0,9 – для двойного стеклянного покрытия; 0,81 – для селективного стекла); A – площадь освещаемой поверхности коллектора; I – облученность поверхности солнечного коллектора, Вт/м².

В процессе поглощения энергии температура поверхности приемника повышается и становится существенно выше температуры окружающего воздуха. Это приводит к возникновению обратного теплового потока в окружающую среду, который можно определить

$$Q_{\text{пот}} = A(T_{\text{п}} - T_{\text{о.с.}})/R_{\text{п}}, \quad (2.18.2)$$

где $T_{\text{п}}$ – температура приемной поверхности коллектора, К; $T_{\text{о.с.}}$ – температура окружающего воздуха, К; $R_{\text{п}}$ – термическое сопротивление

ление приемной поверхности коллектора (для типичных коллекторов можно принять равным $0,13 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ для одинарного стекла; $0,22 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ – для двухслойного стекла; $0,4 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ – для селективного стекла).

Уравнение солнечного коллектора тогда можно представить

$$Q_{\text{ск}} = A [\tau_{\text{пов}} \alpha I - (T_{\text{п}} - T_{\text{о.с}})/R_{\text{п}}].$$

Однако не вся энергия, получаемая коллектором, передается воде, а только ее часть, характеризуемая коэффициентом перехода k_f солнечной энергии, показывающим долю теплового потока $Q_{\text{ск}}$, передаваемого жидкости, принимается равным 0,85:

$$Q_{\text{ж}} = k_f Q_{\text{ск}}.$$

Количество же тепла, требуемого для нагрева жидкости на определенную разницу температур, можно записать в виде

$$Q_{\text{ж}} = L \rho c (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}), \quad (2.18.3)$$

где $Q_{\text{ж}}$ – количество тепла, Вт; $T_{\text{к}}$ – конечная температура воды, К; $T_{\text{н}}$ – начальная температура воды, К; ρ – плотность воды, равная 1000 кг/м^3 ; c – теплоемкость воды, равная 4200 Дж/кг, К ; L – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$. Уравнение теплового баланса коллектора можно записать в виде

$$kA(\tau_{\text{пов}} \alpha I - (T_{\text{н}} - T_{\text{о.с}})/R_{\text{п}}) = L \rho c (T_{\text{к}} - T_{\text{н}}). \quad (2.18.4)$$

Из уравнения баланса солнечного коллектора определяются все основные характеристики.

В России имелся опыт создания и применения, главным образом, установок солнечного горячего водоснабжения различного масштаба, в том числе достаточно крупных производительностью до 120 т горячей воды в день. Солнечные коллекторы нашли широкое применение в теплоснабжении и горячем водоснабжении во многих странах, особенно в Австралии, Израиле, США, Японии, Испании. Современные солнечные коллекторы работают даже в мороз.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В установке, изображенной на рис. 2.18.2, вода циркулирует под действием циркуляционного насоса 7 по контуру, состоящему из

коллектора 3, теплообменника 6, расходомера 8, смонтированного в одном блоке с циркуляционным насосом, и соединительных резиновых шлангов 5. На входе в коллектор и на выходе из него установлены термометры 2 и 4 для измерения температур втекающей и вытекающей воды. Коллектор может освещаться мощной лампой-нагревателем 1, имитирующей поток солнечного излучения. Для стабилизации температурного режима циркулирующая вода проходит через теплообменник 6 (погруженный в сосуд с водой спиралевидный металлический трубопровод). Циркуляционный насос приводится в действие электродвигателем, питаемым от источника напряжения 9.

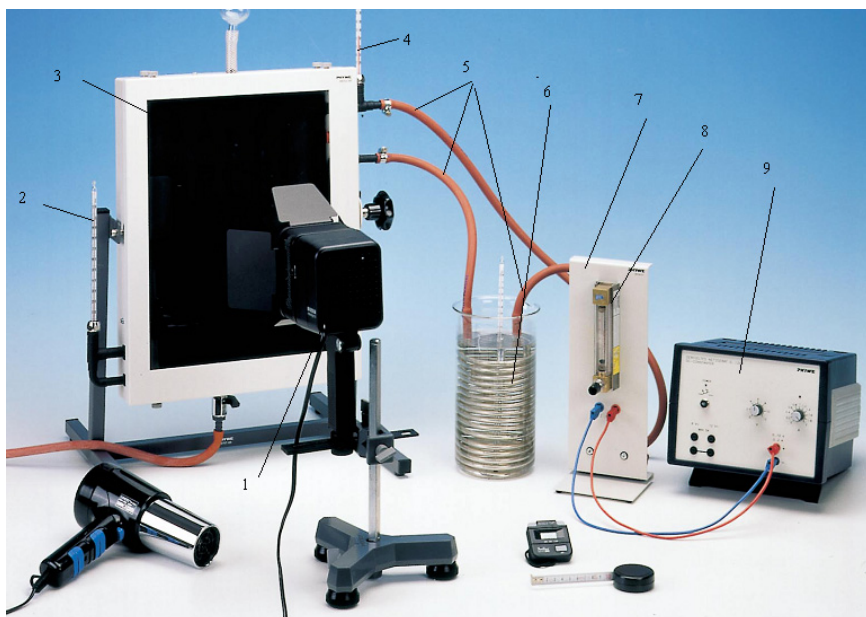


Рис. 2.18.2

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Не превышать максимальную температуру нагрева воды ($55\text{ }^{\circ}\text{C}$).
2. Проверить исправность предохранительных клапанов.
3. Соблюдать осторожность при работе со стеклянными изделиями в составе экспериментальной установки.

4. Ручку регулировки скорости подачи воды насосом вращать плавно и без усилий. Перед выключением насоса ручку плавной регулировки перевести в крайнее положение против часовой стрелки (метка «0»).

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Установите рукоятки регуляторов выходного напряжения источника питания циркуляционного насоса в нулевое положение.

2. Включите источник напряжения.

3. Увеличивая выходное напряжение источника (тем самым увеличивая скорость вращения циркуляционного насоса), установите первое рекомендованное значение расхода воды L . Рекомендованные значения приведены на лабораторном столе.

4. Включите лампу. Подождите, пока температуры T_n и T_k перестанут меняться.

5. Занесите в табл. 2.18.1 показание расходомера и значения температур на выходе и входе коллектора и температуру окружающей среды.

6. Используя полученные данные, из уравнения теплового баланса (2.18.4) получите выражение для облученности I , вычислите ее значение и занесите это значение в табл. 2.18.1.

7. Повторите пп. 3–6 для всех значений расхода воды, рекомендованных в списке, находящемся на лабораторном столе.

8. Постройте график зависимости $T_k = f(L)$. Пользуясь этим графиком, определите оптимальное значение расхода воды для нужд отопления и горячего водоснабжения для обеспечения нормативной температуры горячей воды в точке водоразбора не менее $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (СНиП-П-34-75).

Таблица 2.18.1

$L, \text{ м}^3/\text{с}$	$T_k, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_n, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{oc}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$I, \text{ Вт/м}^2$

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

По результатам работы напишите краткое заключение, в котором укажите, что в данной работе изучалось, каким методом, какие получены результаты, как эти результаты соотносятся с результатами, приведенными в литературных источниках и справочных таблицах.

Табличные значения

Плотность воды	$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$
Теплоемкость воды	$c = 4200 \text{ Дж/кг}$
Термическое сопротивление приемной поверхности коллектора	$R_n = 0,13 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$
Коэффициент пропускания излучения прозрачным покрытием	$\tau_{\text{пов}} = 0,9$
Коэффициент поглощения приемной поверхностью коллектора солнечного излучения	$\alpha = 0,9$
Коэффициент перехода солнечной энергии	$k_f = 0,85$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими параметрами характеризуется работа солнечного коллектора?
2. Как определяется расход воды в солнечном коллекторе?
3. Как определяется температура воды на выходе из солнечного коллектора?
4. Как определяется облученность поверхности солнечного коллектора?
5. Как определяется необходимая тепловая мощность солнечного коллектора?
6. Чем обусловлены характеристики солнечного коллектора?
7. Как влияет расход воды на температуру воды на выходе из солнечного коллектора?
8. Как определяется необходимая площадь солнечного коллектора?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Твайделл Д., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии. М.: Энергоатомиздат, 1990.

Дополнительная

1. ГОСТ 28310–89 «Коллекторы солнечные. Общие технические условия» (утратил силу в РФ).

2. Тарнижевский Б.В. Оценка эффективности применения солнечного теплоснабжения в России // Теплоэнергетика. 1996. № 5. С. 36–40.

3. Стребков Д.С. Роль солнечной энергии в энергетике будущего // Теплоэнергетика. 2006. № 3. С. 58–65.

4. Мальцева А.В. Концентраторы солнечного излучения в энергетике // Энергия. 2005. № 7. С. 16–24.

5. Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежного и отечественного производства. Новые технические решения / О.С. Попель и др. // Теплоэнергетика. № 3. С. 11–15.

6. СНиП П-34-75. Горячее водоснабжение. М.: Стройиздат, 1976.

Работа 2.19

ИЗУЧЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель: изучение теплопроводящих свойств стекла, дерева и пенопласта; измерение коэффициентов теплопроводности этих материалов.

Оборудование: установка для измерения теплопроводности, пластины из стекла, дерева и пенопласта, четыре термопары, два цифровых термометра, секундомер.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт показывает, что если поместить систему из нескольких тел, первоначально имеющих различные температуры, в замкнутую адиабатическую оболочку, т.е. изолировать их от внешних тел, то по прошествии некоторого времени все тела, входящие в систему, будут иметь одинаковую температуру и далее эта температура не будет меняться. Такое состояние системы называется *состоянием термодинамического равновесия*, процесс выравнивания температуры в системе – *релаксацией*, а время, за которое он произойдет, – *временем релаксации*.

В случае если система является открытой, т.е. она находится в тепловом контакте с другими телами (не входящими в систему) и содержит в себе источники тепла, то в ней могут возникнуть состояния, в которых тела, ее составляющие, имеют различную температуру или одно и то же тело имеет неоднородное по его объему распределение температуры. Если такое состояние не меняется со временем, т.е. температура каждого физически бесконечно малого объема системы остается постоянной, то принято говорить, что система находится в состоянии *динамического равновесия*. Подчеркнем, что установившееся динамическое равновесие исчезает, если рассматриваемую термодинамическую систему изолировать и удалить из нее источники тепла.

Пусть объем и форма тел, входящих в рассматриваемую термодинамическую систему, в ходе ее релаксации не меняется, тогда тела не совершают работы друг над другом, поэтому, согласно первому началу термодинамики, изменение их внутренней энергии (а следовательно, и изменение температуры) происходит только посредством обменом тепла, т.е. передачи энергии от одного тела к другому (или от одних частей одного тела к другим).

Перераспределение тепла между различными телами или между участками одного и того же тела без совершения работы называется *теплопередачей*. Существует три различных механизма теплопередачи (в зависимости от среды, находящейся между телами или частями тел, между которыми идет перераспределение энергии): *теплопроводность*, *конвекция* и *излучение*.

Теплопроводность – процесс передачи энергии от одного участка тела к соседнему участку тела, от атомов, имеющих большую энергию, к атомам, имеющим меньшую энергию, в ходе столкновений (в жидкостях и газах) или в ходе их непосредственного взаимодействия в кристаллической решетке.

В жидкостях и газах в случае неоднородного нагрева кроме обычной теплопроводности возможно возникновение макроскопических потоков, приводящих к перемешиванию жидкости или газа и поэтому к более быстрому (по сравнению с обычной теплопроводностью жидкости или газа) нагреву. Такой механизм теплопередачи называется *конвекцией*.

Кроме того, любое нагретое тело излучает и поглощает электромагнитные волны, которые взаимодействуют с другими телами, входящими в термодинамическую систему. Таким образом, даже тела, отделенные друг от друга вакуумной прослойкой, могут обмениваться энергией, испуская и поглощая электромагнитные волны, т.е. через *излучение*. Если температура тела – порядка комнатной, то оно излучает электромагнитные волны, в основном, в инфракрасном диапазоне. При больших температурах (порядка тысяч градусов) нагретое тело начинает светиться, т.е. испускать электромагнитные волны оптического диапазона.

В качестве основных величин, характеризующих передачу энергии от одного тела к другому (или от одного участка тела к другому), принято использовать поток теплоты и плотность потока теплоты.

Потоком теплоты q , идущим от тела или некоторого рассматриваемого выделенного объема тела, называется изменение его энергии в единицу времени, т.е.

$$q = \frac{dE}{dt} . \quad (2.19.1)$$

Из определения потока теплоты следует, что он зависит от размеров и формы тела, от материала, из которого тело сделано, и, вообще говоря, энергия, которая в виде тепла исходит от тела, в разных точках пространства переносится в различных направлениях. Таким образом, поток теплоты представляет собой характеристику всего тела. В практических целях удобнее использовать локальную векторную величину – плотность потока теплоты.

Плотностью потока теплоты \vec{j} называется вектор, который в каждой точке тела направлен в сторону передачи энергии и равный по модулю энергии dE , которая в единицу времени dt проходит через площадку единичной площади ds_{\perp} , перпендикулярную направлению потока, т.е.

$$j = \frac{dE}{dt ds_{\perp}} . \quad (2.19.2)$$

Для теплопроводности был экспериментально установлен закон, связывающий поток тепла в однородном теле с локальной температурой T соответствующего участка тела:

$$\vec{j} = -\kappa \nabla T , \quad (2.19.3)$$

где κ – коэффициент теплопроводности; знак «минус» указывает на то, что поток энергии течет (тепло переносится) в направлении обратном градиенту температуры, т.е. в сторону ее уменьшения (от более нагретых участков тела к менее нагретым).

Выражение (2.19.3) носит название *закона Фурье*.

Коэффициент теплопроводности κ представляет собой характеристику вещества, из которого сделано тело. Для любого вещества коэффициент теплопроводности является функцией температуры. Для химических чистых веществ и простых соединений коэффициенты теплопроводности для широкого диапазона температур приведены в справочной литературе.

В настоящей работе изучается теплопроводность неметаллических материалов (дерева, стекла и пенопласта) при температурах, близких к комнатной $T = 20 \div 60^\circ\text{C}$. В таких условиях коэффициенты теплопроводности перечисленных материалов можно считать не зависящими от температуры.

Рассмотрим плоскопараллельную стенку толщиной d из теплопроводящего материала с коэффициентом теплопроводности k . Пусть эта стенка разделяет два больших объема, наполненных воздухом при температурах T_3 и T_4 (рис. 2.19.1). Для определенности предположим, что $T_3 > T_4$. Тогда если температура воздуха в объемах будет поддерживаться постоянной, то через некоторое время в системе установится динамическое равновесие. Стенка при этом нагреется таким образом, что ее границы будут иметь некоторые температуры T_1 и T_2 . Опыт показывает, что для температур воздуха в объемах и температур поверхностей стенки будет выполняться неравенство $T_3 > T_1 > T_2 > T_4$.

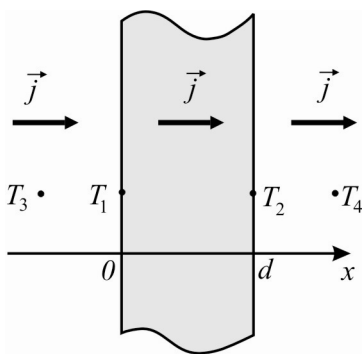


Рис. 2.19.1

Так как в рассматриваемом участке теплопроводящей стенки нет источников и стоков тепла плотность потока тепла будет одинакова как внутри нее, так и в объемах воздуха ее окружающих (см. рис. 2.19.1).

Направим ось x перпендикулярно поверхностям стенки. Пусть стенка занимает пространство с координатами $x \in [0, d]$ (см. рис. 2.19.1). Запишем для нее закон Фурье (2.19.3):

$$\vec{j} = j\vec{e}_x = -\kappa \frac{dT}{dx} \vec{e}_x. \quad (2.19.4)$$

Так как плотность потока тепла в условиях рассматриваемой системы постоянна, т.е. $j = \text{const}$, то, интегрируя уравнение (2.19.4), получим:

$$T(x) = \text{const} - \frac{j}{\kappa} x, \quad (2.19.5)$$

т.е. температура внутри стенки является линейной функцией координаты x .

С другой стороны, в случае линейной зависимости температуры от координаты, учитывая, что температуры правой и левой границ стенки равны T_1 и T_2 соответственно, выражение (2.19.5) может быть переписано в виде

$$T(x) = T_1 - \frac{(T_1 - T_2)}{d} x. \quad (2.19.6)$$

Сравнивая выражения (2.19.5) и (2.19.6), получим соотношение, связывающее плотность поток тепла в стенке с разностью температур на ее границах:

$$j = \kappa \frac{(T_1 - T_2)}{d}. \quad (2.19.7)$$

Рассмотрим распределение температуры вне стенки. Так как система находится в состоянии динамического равновесия, то распределение температуры непрерывно, т.е. для любого значения координаты x функция $T(x)$ непрерывна. Однако процесс выравнивания температуры в воздухе из-за наличия конвекции происходит гораздо быстрее, чем выравнивание температуры между поверхностью стенки и воздухом. Поэтому для практических целей удобно считать, что воздух находится в равновесии при температуре T_4 , а на границе стенка-воздух имеется скачок температуры $T_2 - T_4$.

Опыт показывает, что для небольшой разности температур стенки и воздуха (как в условиях настоящей работы) это предположение выполняется. Для количественного описания переноса тепла через границу при выполнении указанных условий хорошо подходит закон теплопередачи Ньютона, связывающий плотность

потока тепла через границу с разностью температур по обе стороны от нее:

$$j = \alpha (T_2 - T_4), \quad (2.19.8)$$

где α – коэффициент теплопередачи.

Коэффициент теплопередачи в случае естественного комнатного движения воздуха при небольшой разности температур на границе стенки можно считать одинаковым для любого из используемых в работе материалов. Значение коэффициента теплопроводности приведено в таблице в конце описания работы.

Таким образом, если измерить температуры на поверхностях стенки и в обоих объемах воздуха окружающих стенку известной толщины d , то, используя выражения для плотности потока тепла внутри стенки (2.19.7) и на ее поверхности (2.19.8), можно вычислить коэффициент теплопроводности материала стенки:

$$\kappa = \alpha d \frac{(T_2 - T_4)}{(T_1 - T_2)}. \quad (2.19.9)$$

В заключении приведем выражение для расчета относительной погрешности коэффициента теплопроводности материала, рассчитанного по формуле (2.19.9):

$$\varepsilon_{\kappa} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta T}{(T_2 - T_4)}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta T}{(T_1 - T_2)}\right)^2}, \quad (2.19.10)$$

где $\Delta\alpha$, Δd и ΔT – абсолютные погрешности соответствующих величин.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В настоящей работе используется установка, представленная на рис. 2.19.2. Установка состоит из теплоизолированного ящика 1 со сменными стенками 2. Среди сменных стенок есть панели, выполненные из дерева (фанера из лиственницы) разной толщины, стекла и пенопласта.

Внутри ящика установлен нагреватель с электронным регулятором температуры, который управляется с приборной панели 3. При установке определенного положения ручки на панели 3 нагреватель повы-

сит температуру воздуха в ящике до определенного значения и будет поддерживать ее постоянной.

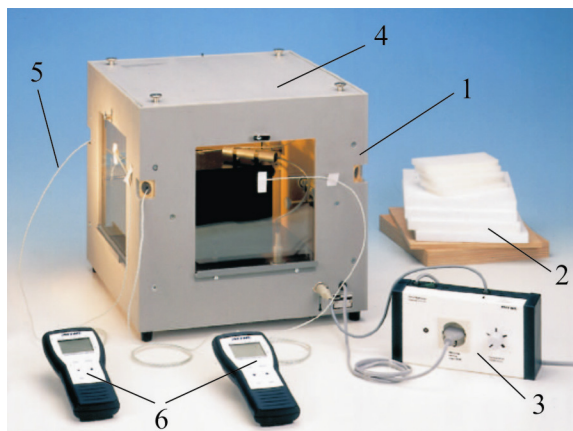


Рис. 2.19.2

Ящик имеет теплоизолированную крышку 4, которая закреплена четырьмя винтами. Крышка служит для замены панелей стенок и установки термодатчиков внутри ящика.

Для измерения температуры в различных точках системы служат четыре термодатчика 5, подсоединенные попарно к двум электронным термометрам 6, выполненным на основе миникомпьютера «Кобра 4». Термодатчики жестко прикреплены к поверхностям стенок. Для проведения термодатчиков внутрь ящика на его вертикальных ребрах сделаны теплоизолированные отверстия. Также к установке прилагается электронный секундомер – для измерения времени.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ

1. Убедитесь, что все детали установки достаточно далеко расположены от края рабочего стола. Стеклопанели могут соскользнуть со стола и разбиться.

2. **Не перегибайте провод термодатчика!** Это может привести к его поломке и выходу измерителя температуры из строя.

3. При открытом ящике не прикасайтесь к металлическому кожуху нагревателя внутри него. Это может привести к ожогу.

4. Ни в коем случае не пытайтесь самостоятельно настраивать миникомпьютеры «Кобра 4»!

ЗАДАНИЕ

Измерение коэффициентов теплопроводности стекла, дерева и пенопласта

1. На крышке установки прочитайте, теплопроводность каких стенок можно измерить с помощью данной установки. Запишите в лабораторный журнал толщину и материал этих стенок.

2. Закройте ящик крышкой и завинтите все четыре винта, не прилагая излишних усилий.

3. С помощью термометра на стене лаборатории измерьте температуру воздуха в комнате T_4 . Результат занесите в лабораторный журнал.

4. Включите оба электронных термометра однократным нажатием клавиши зеленого цвета. Включите нагреватель и с помощью вращающегося регулятора установите четыре деления на его шкале.

5. На протяжении часа измеряйте температуру по каждой из термопар с интервалом 5 мин. Для переключения дисплея электронного термометра от одной термопары к другой используйте стрелочки «вверх» или «вниз». В принципе можно не переключаться от одной термопары к другой, так как на экране каждого электронного термометра одновременно показаны обе температуры: одна – крупным шрифтом, а другая – мелким. Разъемы термопар на каждом электронном термометре подписаны «Т1» и «Т2». Такие же обозначения имеют термопары на экране электронного термометра.

Если некоторое время не нажимать на кнопки электронного термометра, он автоматически отключится для экономии питания. Поэтому если экран цифрового термометра потух, просто включите его снова. На показаниях термометра это никак не скажется.

6. За указанное время эксперимента исследуемая термодинамическая система должна перейти в состояние динамического равновесия, т.е. температуры, измеряемые термопарами, должны перестать изменяться. Если этого не произошло за один час, продолжайте измерения, пока температуры всех стенок не перестанут изменяться (возможны изменения температуры в несколько десятых

градуса). Результаты измерений записывайте в заранее подготовленную табл. 2.19.1.

Таблица 2.19.1

Стенка № 1 Материал: $d =$			Стенка № 2 Материал: $d =$		
t , мин	T_1 , °C	T_2 , °C	t , мин	T_1 , °C	T_2 , °C
...

7. С помощью термометра на стене лаборатории еще раз измерьте температуру воздуха в комнате T_4 . Результат занесите в лабораторный журнал.

8. Выключите нагреватель. Отверните винты, удерживающие крышку ящика, и откройте ее, чтобы установка остывала. Выключите электронные термометры однократным нажатием на зеленую кнопку.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

1. По результатам таблицы 1 постройте графики зависимости температуры поверхностей обеих стенок от времени на одном листе.

2. Сделайте вывод о времени установления динамического равновесия и о соотношении коэффициентов теплопроводности пенопласта и дерева.

3. По графикам для каждой панели определите температуры внутренней и наружной поверхностей стенок (т.е. T_1 и T_2 соответственно), когда система пришла в динамическое равновесие. Так как температура, которую показывают электронные термометры, даже в состоянии динамического равновесия испытывает малые колебания в пределах нескольких десятых градуса около среднего значения, по данным из табл. 1 определите случайную погрешность полученных значений T_1 и T_2 для всех панелей методом Корнфельда.

4. Рассчитайте среднее значение температуры окружающего ящик воздуха T_4 и его погрешность.

5. По полученным данным, используя формулы (8) и (9), для материала каждой панели рассчитайте коэффициент теплопроводности и его погрешность.

6. Если была использована установка с двумя панелями из одного и того же материала (например, двумя фанерными панелями разной

толщины), то усредните полученные значения коэффициентов теплопроводности и рассчитайте его погрешность.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ И ВЫВОДЫ

В заключении к работе должны быть представлены графики зависимости температуры обеих поверхностей обеих стенок от времени. Также нужно привести рассчитанные значения коэффициентов теплопроводности материала для обеих стенок, если они выполнены из разных материалов. В случае стенок из одного материала должно быть приведено одно значение коэффициента теплопроводности. Необходимо сравнить полученные значения коэффициентов теплопроводности исследуемых материалов с табличными значениями и сделать вывод о причинах, вносящих систематическую ошибку в результаты работы при использовании установки такой конструкции.

Табличные значения

Коэффициент теплопередачи при естественном движении воздуха в комнате	$\alpha = 8,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{К}}$
<i>Коэффициенты теплопроводности</i>	
Фанера из лиственницы	$\kappa = 0,14 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$
Пенопласт плотностью 15–30 кг/м ³	$\kappa = 0,037 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$
Оконное стекло	$\kappa = 0,53 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}}$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое динамическое равновесие?
2. Что такое теплопередача? Какие существуют виды теплопередачи?
3. Какие основные физические величины используются в качестве характеристик передачи тепла?
4. Сформулируйте закон Фурье. Почему в векторной записи закона стоит знак «минус»?
5. От чего зависит коэффициент теплопроводности?

6. Что такое внешняя теплопередача? Сформулируйте закон Ньютона. При каких условиях он выполняется?

7. Как зависит температура в плоскопараллельной однородной стенке от координат при фиксированных температурах ее поверхностей?

8. Если стенка находится в состоянии динамического равновесия, как связан коэффициент теплопроводности материала стенки с температурами ее границ с воздухом?

9. Из каких основных деталей состоит установка?

10. Каким образом и в каком месте панели нужно закрепить термопары и почему?

11. Когда нужно прекратить измерения с выбранной первоначально парой панелей?

12. Каким образом для выбранной панели в работе определяются температуры T_2 и T_3 , необходимые для расчета коэффициента теплопроводности материала панели?

13. Как измерить температуру воздуха в комнате?

14. Как вы думаете, почему в работе не предлагается измерять температуру воздуха внутри ящика?

15. Какие источники систематических ошибок могут присутствовать в настоящей работе?

16. Исходя из табличных данных, теплопроводность какого материала будет измерена в данной установке с минимальной точностью?

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2. Молекулярная физика и термодинамика. М.: Астрель, АСТ, 2003. С. 175–179, 188–191.

2. Иродов И.Е. Физика макросистем. Основные законы. М.: Лабортория базовых знаний, 2001. С. 165–168.

Дополнительная

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 2. Термодинамика и молекулярная физика. М.: Физматлит, 2006. С. 334–343.

2. Матвеев А.Н. Молекулярная физика. М.: Высшая школа, 1981. С. 363–365, 385–386.

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
КУРСА ОБЩЕЙ ФИЗИКИ**

**Разделы «КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ»,
«МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА»**

Под редакцией В.А. Шилова

Редактор М.В. Макарова
Оригинал-макет изготовлен М.В. Макаровой

Подписано в печать 15.11.2011. Формат 60х84 1/16
Уч.-изд. л. 13,5. Печ. л. 12,5. Тираж 1700 экз.
Изд. № 1/20. Заказ № 12.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».
115409, Москва, Каширское ш., 31.

ООО «Полиграфический комплекс «Курчатовский».
144000, Московская область, г. Электросталь, ул. Красная, д. 42