

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Ж 512

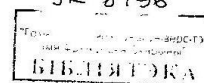
Т. П. ЖЕЛОНКИНА

ОБЩАЯ ФИЗИКА

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
по разделу «Молекулярная физика» для студентов
физических специальностей университета

2014

УДК 8496



Гомель
УО «ГГУ им. Ф. Скорины»
2009

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3я73
Ж 518

Рецензенты:

В. Е. Гайшун, доцент, кандидат физико-математических наук;
кафедра общей физики учреждения образования «Гомельский
государственный университет имени Франциска Скорины»

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный универ-
ситет имени Франциска Скорины»

Желонкина, Т. П.
Ж 518 Общая физика : практическое пособие по разделу
«Молекулярная физика» для студентов физических
специальностей университета / Т. П. Желонкина; М-во
образования РБ, Гомельский государственный университет
им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2009. –
111 с.
ISBN 978-985-439-341-4

Практическое пособие содержит основные понятия по
отдельным темам, описание постановки лабораторных работ и
требования по их выполнению по разделу «Молекулярная физика»
учебного курса «Общая физика» и ставит целью оказание помощи
студентам физических специальностей университета в овладении
основами молекулярной физики и теплоты, основными
физическими закономерностями, приобретении элементарных
навыков экспериментирования, обращения с измерительными
аппаратами и оценки погрешностей измерений.

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3я73

ISBN 978-985-439-341-4

© Желонкина Т. П., 2009
© УО «Гомельский государственный
университет им. Ф. Скорины», 2009

Описание установки

Установка приора Дюлонга и Пти (рисунок 11.3) представляет
собой две сообщающиеся трубки K_1 и K_2 с исследуемой жидкостью,
помещенные в стеклянные термостаты B_1 и B_2 .

Трубка K_2 нагревается паром, пропускаемым через термостат B_2 .
Для образования пара служит парообразователь или колба (на рисун-
ке 11.3 не показано). Другая трубка, K_1 , поддерживается при комнат-
ной температуре. Для определения температуры исследуемой жидко-
сти служат термометры T_1 и T_2 .

Определение изменения уровня исследуемой жидкости при нагре-
вании производится с помощью закрепленной линейки L .

Ход работы

1 Отметить по линейке L начальный уровень холодной жидкости
 h'_1 в трубке K_2 и температуру t_1 по термометру T_1 . Удостовериться,
что показания термометров T_1 и T_2 одинаковы. Если показания тер-
мометров различны, т.е. $t_1 < t_2$, что может быть обусловлено прове-
денным предыдущим опытом, то показания t_1 взять из показаний
термометра T_2 до начала эксперимента, а температуру t_2 – в конце
проведенного эксперимента из показаний термометра T_2 .

2 Наполнить парообразователь (или колбу) дистиллированной
водой до 1/3 объема. Соединить резиновой трубкой штуцер парообра-
зователя (колбы) и трубку, указанную на рисунке 11.3.

3 Измерить высоту столба холодной жидкости h_1 , как указано на
рисунке 11.3.

4 Парообразователь (колбу) поставить на электроплитку. Пропус-
кая пар через термостат B_2 , нагреть жидкость в трубке K_2 до темпера-
туры кипения воды. О том, что температура исследуемой жидкости
повышается, можно судить по перемещению уровня жидкости в на-
гретой трубке K_2 и показаниям термометра T_2 .

5 При достижении температуры 98...99° С (по показаниям термо-
метра T_2) и установлении уровня нагретой жидкости в трубке K_2 , от-
метить по линейке L уровень h'_2 . Вычислить разность уровней горячей
и холодной жидкости $\Delta h = h'_2 - h'_1$.

6 Дать остыть жидкости в трубке K_1 и дождаться опыта (п.п. 1–6) еще два раза.

7 Температуру холодной жидкости t_1 и горячей жидкости t_2 определить по термометрам T_1 и T_2 соответственно, учитывая, однако, рекомендации, изложенные в п.1.

8 Вычислить по формуле (11.8) коэффициент объемного расширения для каждого проведенного опыта, причем $h_2 - h_1 = \Delta h$ измерить для каждого опыта, учитывая методику п.5, а высоту горячей жидкости для каждого опыта вычислить по формуле $h_2 = h_1 + \Delta h$.

9 Произвести математическую обработку результатов измерений. Результаты измерений занести в таблицу 11.3.

10 Если лабораторное занятие продолжительностью 2 академических часа, то опыт проводится один раз и полученные результаты заносятся в таблицу 11.4.

Таблица 11.3 – Данные измерений

Номер опыта	h_1 , м	h_1' , м	h_2 , м	Δh , м	h_2 , м	t_1 , °C	t_2 , °C	β , К ⁻¹	$\bar{\beta}$, К ⁻¹	$\Delta\beta$
1										
2										
3										
и т.д.										

Таблица 11.4 – Данные измерений

Номер опыта	h_1 , м	h_1' , м	h_2 , м	Δh , м	h_2 , м	t_1 , °C	t_2 , °C	β , К ⁻¹
1								
2								
3								
и т.д.								

Тема 1 Идеальный газ и его законы

- 1 Основное уравнение молекулярно-кинетической теории (МКТ)
- 2 Температура, её свойства и особенности измерений
- 3 Опытные законы идеального газа
- 4 Уравнение состояния идеального газа

Основные понятия по теме

Универсальную газовую постоянную можно определить из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (1.1)$$

где P – давление, V – объем, m – масса, μ – масса одного моля газа, T – абсолютная температура тела.

Это же уравнение можно записать и для плотности газа:

$$P = \frac{\rho}{\mu} RT, \quad (1.2)$$

где ρ – плотность газа.

Так как в данной работе массу воздуха трудно измерить, будем находить универсальную газовую постоянную для двух значений плотности газа:

$$R = \frac{(P_1 - P_2)\mu}{\rho_1 T_1 - \rho_2 T_2} \quad (1.3)$$

где плотность воздуха при температуре t и давлении H мм. рт. ст. вычисляется по формуле:

$$\rho = \frac{1,2932}{1 + 0,003678 \cdot t} \cdot \frac{H}{760} \quad (1.4)$$

При нагревании газа его давление изменяется с температурой, объем газа в этом случае считается постоянным. Термический коэффициент давления газа характеризует относительное изменение давления газа при изменении температуры на 1°С

$$\alpha = \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right) \quad (1.5)$$

Коэффициент α можно определить из уравнения состояния для идеального газа

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad (1.6)$$

Так как $V = const$ и продифференцировав по T , получим

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right) = \frac{m}{\mu} \frac{R}{V} \quad (1.7)$$

Из уравнений (1.1) – (1.3) следует, что

$$\alpha = \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right) = \frac{1}{T} \quad (1.8)$$

Таким образом, термический коэффициент давления газа обратно пропорционален температуре. Для всех газов он постоянен и для $T_0 = 273^\circ \text{K}$ (0°C) следует, что $\alpha_0 = \frac{1}{273} \text{K}^{-1}$.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Что собой представляет идеальный газ как модель простейшей статистической системы?
- 2 В чем сущность основных газовых законов: Бойля–Мариотта, Шарля, Гей–Люссака, объединенного газового закона?
- 3 Представить все газовые законы в координатах P, V ; P, T ; V, T .
- 4 Каков физический смысл термического коэффициента давления? Вывести рабочую формулу α_p .
- 5 Каков физический смысл универсальной газовой постоянной? Вывести рабочую формулу R .
- 6 Рассмотреть термодинамику адиабатного расширения и адиабатного сжатия.
- 7 Что такое смесь газов? В чем сущность закона Дальтона?

Лабораторная работа 1

Определение универсальной газовой постоянной

Цель работы: определение универсальной газовой постоянной – константы состояния идеального газа, одинаковой для всех газов.

Материалы и оборудование: насос вакуумный Комовского; мановакуумметр; тарелка вакуумная; колокол; гальванометр типа М 195/2; термопара.

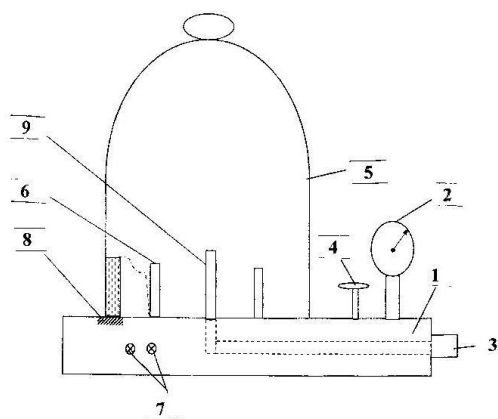


Рисунок 1.1 – Схема устройства вакуумной тарелки

Описание прибора

Насос Комовского применяется в ряде опытов, осуществляемых при помощи тарелки с манометром и стеклянным колоколом. Прибор (рисунок 1.1) состоит из пластмассового диска 1 на низких ножках, крана 4, ниппелей 3, 9, вакуумметра 2, колокола из толстого стекла 5 и резиновой прокладки 8. Клеммы 6 и приборные зажимы 7 используются при демонстрации опытов с электрическим звонком. Соединительный канал идет от ниппеля 3 к отвинчивающемуся ниппелю 9, помещенному в центре диска. Кроме того, от соединительного канала идет отвод к вакуумметру 2. Показания вакуумметра относятся к пространству под колоколом.

Ход работы

- 1 Подготовьте насос Комовского к работе.
- 2 Откачайте воздух из колокола до некоторого давления P_2 . При этом манометр показывает разность между атмосферным давлением P_1 и давлением в колоколе P_2 .
- 3 Измерьте температуру воздуха T_1 в лаборатории, а температуру T_2 в колоколе с помощью термометра.
- 4 Рассчитайте плотности воздуха ρ_1 и ρ_2 при соответствующих температурах и давлениях по формуле (1.4).
- 5 Подсчитайте по формуле (1.3) газовую постоянную R .
- 6 Опыт повторите не менее пяти раз. Данные измерений занесите в таблицы 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Данные измерений

№ опыта	P_1 , кгс/см ²	P_1 , мм рт.ст.	P_2 , кгс/см ²	P_2 , мм рт.ст.	ρ_1 , кг/м ³	ρ_2 , кг/м ³	$\Delta \rho_1$	$\Delta \rho_2$
1								
2								

Таблица 1.2 – Данные измерений

№ опыта	n , дел.	Δt , °C	t_1 , °C	t_2 , °C	R_i	$\bar{R}$	ΔR
1							
2							

Лабораторная работа 2 Изучение зависимости термического коэффициента давления газа от температуры

Цель работы: определить термический коэффициент давления газа и исследовать его зависимость от температуры.

Материалы и оборудование: прибор для изучения газовых законов ПГЗ-1, манометр, электроплитка, бачок с водой.

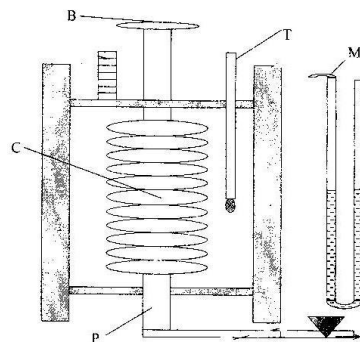


Рисунок 1.2 – Схема прибора ПГЗ-1

Описание прибора

Прибор ПГЗ-1 предназначен для изучения законов идеального газа. Прибор представляет собой металлический или полиэтиленовый гофрированный цилиндр C переменного объема (сильфон) диаметром 100 мм и высотой 100 мм в свободном состоянии. К цилиндру при-

креплены металлический фланец и дно, которые служат одновременно основанием прибора. На фланце имеется патрубок P . Он предназначен для присоединения прибора с помощью резинового шланга к демонстрационному манометру M , вакуумметру и для установки внутри сиффона термопары. Кроме того, на фланце закреплена траверса, к которой подвижно закреплен нижний конец винта. Винт B ввертывается в траверсу, закрепленную на двух направляющих стержнях, которые в свою очередь, привинчены к основанию прибора.

Вращая винт за головку, можно изменить высоту сиффона от 75 до 150 мм, а вместе с тем и объем цилиндра с достаточной степенью точности. Растяжение сиффона выше допустимого предела ограничивается, сжатие сиффона ограничивается высотой винта. С боку прибора укреплена демонстрационная шкала, с помощью которой можно измерять объем цилиндра в условных единицах. Для измерения температуры устанавливают термометр T .

В головке винта имеется небольшая ручка – стержень для удобства вращения винта, когда возникает необходимость в быстром изменении объема, заключенного в цилиндре газа (адиабатный процесс).

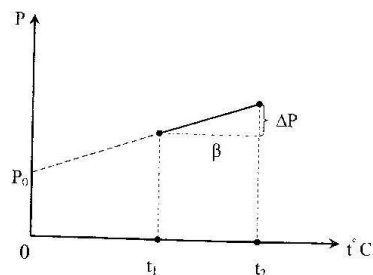


Рисунок 1.3 – График зависимости давления газа от температуры

Ход работы

- 1 Соедините резиновыми шлангами кран колонки манометра с патрубком на фланце прибора ППЗ-1.
- 2 Установите начальное давление газа внутри цилиндра меньше атмосферного путем поворота головки винта.
- 3 Измерьте давление газа в баллоне $P = P_{атм} - P_{вак}$, где $P_{атм}$ – атмосферное давление измеряемое по барометру – анероиду; $P_{вак}$ – показания манометра.
- 4 Опустите баллон в сосуд с водой комнатной температуры и нагревайте его.
- 5 Через каждые 10°С записывайте показания манометра.
- 6 Зная давление газа в баллоне и его температуру, постройте график зависимости давления газа от его температуры $P = f(t)$.
- 7 Экстраполируйте график до пересечения с осью давлений и найдите из графика тангенс угла наклона $tg\beta = \frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{\partial P}{\partial t}$.
- 8 Зная тангенс угла наклона прямой и значения давления газа для разных температур, постройте график зависимости $\alpha = f(t)$, $\alpha = \frac{tg\beta}{P_0}$.
- 9 Измерьте зависимость термического коэффициента от температуры при другой высоте сиффона $l = 30\text{ мм}$ и постройте график зависимости $\alpha = f(T)$.
- 10 Данные измерений занесите в таблицу 1.3. Произведите математическую обработку результатов измерений.

Таблица 1.3 – Данные измерений

Номер опыта	t , °С	ΔP , Па	$P_{атм}$, Па	P , Па	$\bar{P}$, Па	ΔP	α , К ⁻¹	$\bar{\alpha}$, К ⁻¹	$\Delta\alpha$

Тема 2 Закон Максвелла

- 1 Распределение молекул по скоростям
- 2 Средняя и средняя квадратичная скорости
- 3 Наиболее вероятная скорость молекул газа
- 4 Экспериментальная проверка распределения молекул по скоростям

Основные понятия по теме

Молекулы в газе движутся хаотично, поэтому абсолютные значения их скоростей не совпадают друг с другом. Чтобы описать распределение молекул газа по скоростям, будем рассматривать вероятность того, что молекула имеет скорость, абсолютная величина которой лежит в интервале от v до $v+dv$. Каждая из трех составляющих вектора скорости по осям координат является случайной величиной, распределенной по нормальному закону Гаусса:

$$f(v_x) = A_1 e^{-\alpha_1 v_x^2}, \quad (2.1)$$

где $f(v_x)$ — плотность вероятности, A_1 и α_1 — некоторые константы, которые легко определить из условия:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(v_x) dv_x = \int_{-\infty}^{\infty} A_1 e^{-\alpha_1 v_x^2} dv_x = 1 \quad (2.2)$$

Вероятность того, что составляющие скорости молекулы находятся одновременно в интервалах

$$(v_x; v_x + dv_x)(v_y; v_y + dv_y)(v_z; v_z + dv_z),$$

зависит только от модуля $\left| \vec{v} \right| = v$, или что, то же самое, от квадрата скорости. Вместо квадрата составляющих скорости в качестве аргумента берут соответствующие им значения кинетических энергий $\frac{mv_x^2}{2}$, $\frac{mv_y^2}{2}$, $\frac{mv_z^2}{2}$ и полную кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2}$, тогда уравнение (2.1) может быть переписано в виде

$$f(v) = A_2 e^{-\alpha_2 \frac{mv^2}{2}}, \quad (2.3)$$

где A_2 и α_2 — новые постоянные;

$$\alpha_2 = \frac{1}{K \cdot T},$$

где K — постоянная Больцмана, T — температура по шкале Кельвина. Таким образом формула (2.3) примет вид

$$f(v) = A_2 e^{-\frac{mv^2}{2KT}}.$$

Чтобы получить закон распределения Максвелла по скоростям, необходимо проинтегрировать (2.3) по всем значениям скоростей, лежащим внутри тонкого шарового слоя радиусом v и толщиной dv . Объем этого слоя равен $4\pi v^2 dv$.

Следовательно, функцию распределения по абсолютным значениям скоростей можно получить из функции (2.3), умножив ее на $4\pi v^2$. Тогда

$$F(v) = 4\pi v^2 A_2 e^{-\frac{mv^2}{2KT}}.$$

Внесем 4π в значение постоянной A_2 и введем $A = 4\pi A_2$. Тогда

$$F(v) = A v^2 e^{-\frac{mv^2}{2KT}} \quad (2.4)$$

Полученная кривая симметрична относительно начала координат, смещена от него и имеет вид, представленный на рисунке 2.1

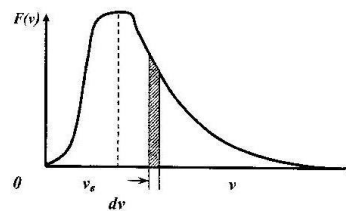


Рисунок 2.1 — Графический вид функции распределения Максвелла

Вопросы для самоконтроля

1. Вывести функцию распределения частиц по скоростям.
2. Рассчитать наиболее вероятную скорость, среднюю арифметическую скорость.

3. Доказать, что $\int_{-\infty}^{\infty} F(v) dv = 1$.

Лабораторная работа 3

Изучение на механической модели распределения Максвелла по скоростям

Цель работы: получить и изучить на механической модели распределение частиц, аналогичное распределению Максвелла молекул газа по скоростям, определить вероятную скорость частиц.

Материалы и оборудование: установка для изучения закона распределения Максвелла, пшено, набор сеток, линейка.

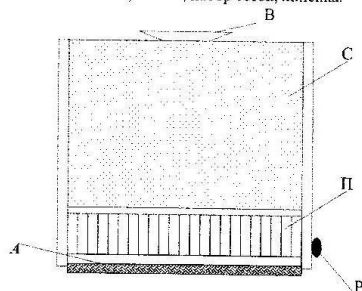


Рисунок 2.2 – Установка для изучения распределения Максвелла

Описание установки

Изучение распределения Максвелла проводится на механической модели, осуществляющей двумерное рассеивание частиц (рисунок 2.2) и состоящей из воронки В, направляющей поток зерна на систему металлических стержней, расположенных в шахматном порядке С. При многократных столкновениях зерен со стержнями моделируется распределение горизонтальных составляющих скоростей, после чего зерна попадают в вертикальные пеналы (ячейки) П так, что количество зерен в каждом пенале (ячейке) оказывается пропорциональным числу частиц, имеющих значения скоростей в данном интервале. Полученное таким образом распределение сравнивается с нормальным распределением.

После проведенного эксперимента, поворотом ручки Р против часовой стрелки открывается дно пеналов (ячеек) П и зерно высыпается в пенал А.

Ход работы

1. Выберите определенный диаметр воронки и установите ее в механическую модель по центру, как показано на рисунке 2.2.

2. Медленно высыпайте через воронку зерно и измеряйте линейкой высоту уровня зерна (h_i) во всех ячейках приемного ящика (i – номер ячейки), начиная от начальной, в которую сыпается зерно. Сложите значения высот зерна во всех ячейках

$$\sum_{i=1}^n h_i = h_1 + h_2 + \dots + h_n \quad (2.5)$$

3. Значение $\sum_{i=1}^n h_i$ пропорционально общему числу зерен N .

4. Рассчитайте для каждой ячейки отношение $\frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$, пропорциональное вероятности P_i попадания зерен в данную ячейку при ширине ячеек, равной единице (ширине интервала).

5. Постройте график зависимости $f(i) = \frac{h_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$,

где i – номер ячейки, h_i – высота уровня зерна в i -й ячейке;

[illegible]

где V — объем газа, протекающего через сечение трубки за определенное время t при определенной разности давлений ΔP на кон-

цах трубки, r – радиус капилляра, l – длина капилляра.

Отсюда из формулы (3.3) найдем коэффициент внутреннего трения газа

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8 l T} \Delta P t. \quad (3.4)$$

При выводе этой формулы пренебрегаем кривизной капли вытекающей жидкости.

Средняя скорость газовых молекул может быть найдена из закона распределения Максвелла:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}, \quad (3.5)$$

где $R = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – молярная универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура, μ – молярная масса газа.

Плотность газа можно найти из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu P}{RT}, \quad (3.6)$$

где P – давление газа.

Подставляя (3.4), (3.5), (3.6) в формулу (3.2), получим:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3 \pi r^4 \Delta P t \sqrt{\pi R T}}{16 V \mu P \sqrt{2 \mu}}. \quad (3.7)$$

Эффективный диаметр молекулы можно вычислить из формулы, выражающей его связь с длиной свободного пробега молекулы:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{l}{\sqrt{2} \pi n D^2}, \quad (3.8)$$

где n – число молекул в единице объема при данных условиях, D – эффективный диаметр молекулы.

Число молекул в единице объема при данных условиях выражается формулой

$$n = n_0 \frac{P T_0}{P_0 T}, \quad (3.9)$$

где n_0 – число Лошмита – число молекул в единице объема при нормальных условиях (P_0 , T_0). Тогда, используя формулы (3.8) и (3.9), получим выражение для эффективного диаметра молекулы газа:

$$D = \sqrt{\frac{TP_0}{2 \pi n_0 P T_0 \langle \lambda \rangle}}. \quad (3.10)$$

где T и P – температура и давление окружающей среды.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Что такое ламинарное турбулентное течение жидкости?
- 2 Вывести формулы для длины свободного пробега молекулы и ее эффективного диаметра.
- 3 Как известно, воздух состоит из смеси газов. Что следует понимать под $\langle \lambda \rangle$?

Лабораторная работа 4

Определение средней длины свободного пробега молекул воздуха и эффективного диаметра молекул воздуха

Цель работы: вычисление длины свободного пробега и эффективного диаметра молекулы азота (который составляет 78,1% воздуха) по коэффициенту внутреннего трения (вязкости).

Материалы и оборудование: цилиндрический сосуд с капилляром, стеклянный стаканчик, секундомер.

Описание установки

Установка изображена на рисунке 3.1. Один конец капилляра K соединен с правым коленом манометра M и атмосферой. Другой конец капилляра соединен со стеклянным баллоном D и левым коленом манометра. При истечении воды из баллона D , давление в нем понижается и в него через капилляр протекает воздух, объем которого за время t можно измерить.

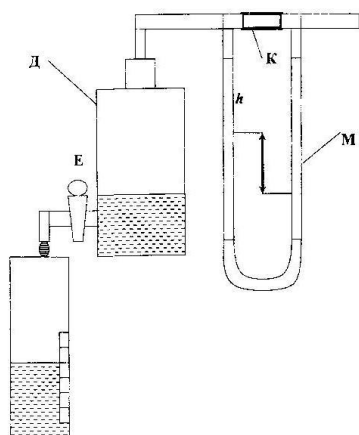


Рисунок 3.1 – Схема установки

Ход работы

- 1 Заполните сосуд *Д* водой на $2/3$ объема, плотно закрыть его пробкой.
- 2 Откройте кран *Е* и, дождавшись, когда вода начнет вытекать из сосуда каплями, подставьте стаканчик, одновременно включив секундомер.
- 3 Измерьте по шкале манометра высоту поднятия уровня воды (в момент начала появления капель).

4 Когда в стаканчике будет около $50-100 \text{ см}^3$ воды, (этот объем займет воздух), перекройте кран и остановите секундомер. Запишите время истечения жидкости.

5 Разность давлений на концах капилляра рассчитайте по формуле:

$$\Delta P = \rho_1 g h,$$

где ρ_1 – плотность дистиллированной воды, при комнатной температуре (взять из таблицы); g – ускорение свободного падения.

6 Температуру T измерьте комнатным термометром, а атмосферное давление P определите по барометру.

7 По формулам (3.7) и (3.10) вычислите длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы азота.

8 Опыт повторите 3 раза с разными объемами, вытекающими из сосуда жидкости. Результаты измерений занести в таблицу 3.1

9 Оцените возможные источники погрешности метода.

Таблица 3.1 – Результаты измерений

№ опыта	$h, 10^{-2}$ м	$V, 10^{-6}$ м ³	$t,$ с	$\Delta P,$ Па	$P,$ Па	$T,$ °C	$\lambda,$ м	$D,$ м

Тема 4 Первое начало термодинамики

- 1 Различные формулировки первого начала термодинамики
- 2 Теплоемкость
- 3 Применение первого начала к изопроцессам в идеальном газе
- 4 Адиабатный и политронный процессы

Основные понятия по теме

В стеклянный баллон, в котором находится воздух при атмосферном давлении P_0 и температуре окружающей среды T_0 , насосом накачивается небольшое количество воздуха, после этого зажим D закрывается. Давление в баллоне повысится. Если увеличение давления было произведено достаточно быстро, то есть сжатие воздуха является *квазиадиабатическим*, то манометр не сразу покажет установившееся давление в баллоне, так как температура газа в баллоне будет выше T_0 . Окончательная разность уровней в манометре h_1 установится тогда, когда температура воздуха внутри сосуда сравняется с T_0 . В этом равновесном состоянии давление воздуха в баллоне станет равным P_0 и h_1 выражены в одних единицах измерения)

$$P_1 = P_0 + h_1 \quad (4.1)$$

Температура воздуха в этом состоянии будет $T = T_0$. Если теперь открыть кран, то воздух в сосуде будет быстро расширяться (квазиадиабатическое расширение), пока давление внутри сосуда не станет равным P_0 . При этом воздух охладится до температуры T_2 меньшей T_0 . Это будет второе состояние газа с параметрами $P_2 = P_0, T_2$. Если сразу же после выпуска воздуха закрыть кран, то давление внутри сосуда начнет возрастать, так как охладившийся при расширении воздух в сосуде начнет нагреваться до температуры T_0 . Когда температура воздуха в сосуде сравняется с температурой T_0 , рост давления прекратится, наступит третье состояние газа с параметрами $T_3 = T_0$ и

$$P_3 = P_0 + h_2, \quad (4.2)$$

где h_2 – разность уровней жидкости в манометре.

Мысленно выделим внутри нашего баллона произвольный объем газа, ограниченный замкнутой поверхностью. Пусть она играет роль оболочки, в которую заключен рассматриваемый объем газа. При описанных выше состояниях газа в баллоне, параметры, характеризующие состояние газа внутри «оболочки», имеют следующие значения:

- 1 состояние P_1, T_0, V_1 ;
- 2 состояние P_0, T_2, V_2 ;
- 3 состояние P_3, T_0, V_3 .

Считая, что переход газа из состояния 1 в состояние 2 происходит адиабатически, поэтому к параметрам, характеризующим адиабатическое состояние, применимо уравнение Пуассона. В дифференциальной форме оно запишется:

$$\gamma P dV + V dP = 0, \quad (4.3)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{C_p}{C_v}.$$

Применительно к условиям эксперимента можно считать, что разности давлений $P_1 - P_0$ и $P_3 - P_1$ значительно меньше давления P_0 и поэтому их можно заменить дифференциалами. То же относится и к соответствующим изменениям объема выделинной порции газа.

Итак, $dV \approx V_2 - V_1$, $dP \approx P_0 - P_1$, тогда выражение (4.3) можно записать:

$$\gamma P(V_2 - V_1) + V(P_0 - P_1) = 0 \quad (4.4)$$

В состояниях 1 и 3 температуры газа одинаковы, а поэтому к ним применимо уравнение Бойля – Мариотта, $PV = \text{const}$, откуда

$$P dV + V dP = 0, \quad \text{заменив } dV \text{ и } dP \text{ соответствующими приращениями, получим:} \quad (4.5)$$

Объединяя соотношения (4.5) и (4.4), получим:

$$\gamma = \frac{P_1 - P_0}{P_1 - P_3} \quad (4.6)$$

Подставив в (4.6) значения P_1 и P_3 из (4.1) и (4.2), окончательно находим:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_2 - h_1} \quad (4.7)$$

Наиболее точным и удобным методом определения $C_p / C_v = \gamma$ является метод, основанный на измерении скорости звука в газе. Скорость распространения продольных механических волн, в частности звуковых волн в воздухе, равна

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4.8)$$

где μ – молярная масса данной среды, $\rho = \mu \cdot \nu$ – плотность среды. Известно, что

$$E = - \frac{\Delta P}{\Delta V} \cdot V, \quad (4.9)$$

где V – общий объем газа.

Знак минус указывает, что одновременные изменения давления ΔP и объема ΔV данного количества газа противоположны по знаку.

Процесс распространения звуковой волны в газе совершается так быстро, что вызываемые им локальные периодические изменения объема и давления в элементарно малых объемах газа происходят без теплового обмена с соседними участками газа. Распространение звуковых колебаний можно считать адиабатическим процессом. Адиабатические процессы в идеальном газе описываются уравнением Пуассона

$$P \cdot V^\gamma = \text{const.} \quad (4.10)$$

Дифференцируя это выражение, получим:

$$V^\gamma dP + P \gamma V^{\gamma-1} dV = 0$$

Отсюда, при малых изменениях объема dV и давления dP найдем:

$$\frac{\Delta P}{\Delta V} \approx \frac{dP}{dV} = -\gamma \frac{P}{V}$$

Тогда, выражение (4.2) примет вид:

$$E = \gamma \cdot P, \quad (4.11)$$

а скорость звуковой волны будет

$$\nu = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}. \quad (4.12)$$

Найдя из уравнения Менделеева-Клапейрона плотность газа и подставив в (4.5), получим:

$$\nu = \sqrt{\gamma \frac{RT}{\mu}}. \quad (4.13)$$

Равенство (4.6) позволяет найти γ , если известна скорость звука в газе

$$\gamma = \frac{\mu \nu^2}{RT}. \quad (4.14)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Что такое внутренняя энергия? первое начало термодинамики?

2. Что такое теплоемкость газов?
3. Уравнение Майера и его вывод.
4. В чем выражается применение первого начала термодинамики к изотермическому, изохорическому, изобарическому, адиабатическому процессам?

Лабораторная работа 5

Определение отношения молярных теплоемкостей C_p / C_v газа методом Клемана - Дезорма

Цель работы: определить показатель адиабаты C_p / C_v .

Материалы и оборудование: стеклянный баллон, манометр, насос.

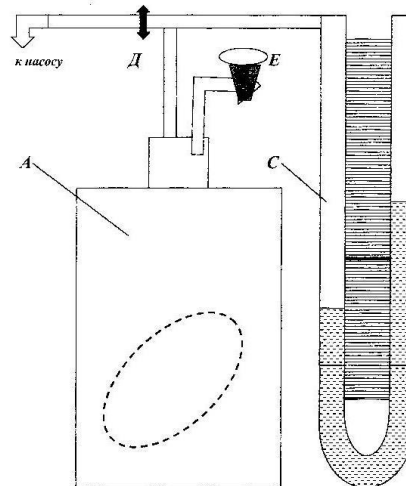


Рисунок 4.1 – Схема установки

Описание установки

Установка (рисунок 4.1) состоит из стеклянного баллона *A*, соединенного с манометром *C* и ручным насосом. При помощи крана *E* баллон соединяется с атмосферой. Зажим *D* служит для отсоединения насоса от баллона.

Ход работы

- 1 Закройте кран баллона *E*. При открытом зажиме накачайте в баллон столько воздуха, чтобы разность уровней в манометре достигла 200 ± 300 мм.
- 2 Зажимом *D* отсоедините баллон от насоса.
- 3 Выждав 5-7 минут, запишите в таблицу 4.1 установившееся показание манометра h_1 .
- 4 Откройте кран *E*. В момент, когда уровни жидкости в обоих коленях манометра сравняются, быстро закройте кран *E*.
- 5 Выждав несколько минут (2-3), запишите в таблицу 4.1 установившееся показание манометра h_2 .
- 6 По формуле (4.7) вычислите γ .
- 7 Повторите опыт 10-11 раз, произведите математическую обработку результатов измерений.

Таблица 4.1 – Показания манометра

№ опыта	h_1	$\bar{h}_1$	h_2	$\bar{h}_2$	γ	$\bar{\gamma}$	$\Delta\gamma$

Лабораторная работа 6

Определение отношения молярных теплоемкостей C_p/C_v по скорости звука в газе

Цель работы: определение показателя адиабаты по скорости звука в газе.

Материалы и оборудование: звуковой генератор ГЗ-18, осциллограф, установка.

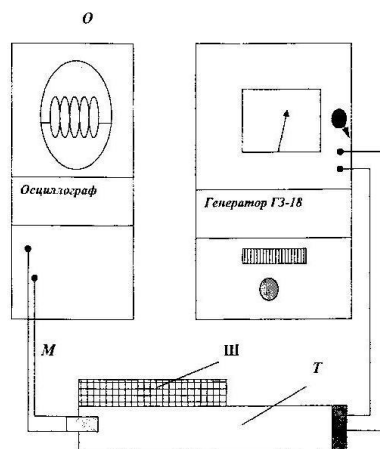


Рисунок 4.2 – Схема установки

Описание установки

Установка, используемая для измерения скорости звука, изображена на рисунке 4.2. Звуковые колебания в трубе D возбуждаются телефоном T , мембрана которого приводится в движение переменным током звуковой частоты от генератора ГЗ-18. Колебания улавливаются микрофоном M . Возникающий в микрофоне сигнал наблюдается на осциллографе O .

Звуковые колебания будут особенно сильными, если труба настроена на резонанс. Резонанс наступает в тех случаях, когда на длине трубы укладывается целое число полуволи звуковой длины, то есть, возникает стоячая волна.

Подбор резонансных условий производится путем изменения частоты звуковых колебаний или изменением длины трубы при неизменной частоте. Возникновение резонанса легко наблюдать на осциллографе по резкому увеличению амплитуды колебаний.

Рассмотрим метод измерения скорости звука при постоянной длине трубы L . Будем увеличивать частоту звуковых колебаний так, чтобы наблюдался ряд последовательных резонансов для различных длин волн. Условия резонанса при этом определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} L &= n \cdot \frac{\lambda_n}{2}; \\ L &= (n+1) \cdot \frac{\lambda_{n+1}}{2}; \\ L &= (n+k) \cdot \frac{\lambda_{n+k}}{2}, \end{aligned} \quad (4.15)$$

где λ — длина звуковой волны, n — некоторое целое число.

Учитывая, что $v = \lambda_m \nu_m$ ($m = n, n+1, \dots, n+k$), выражения (4.15) запишутся:

$$\begin{aligned} L &= n \cdot \frac{v}{2\nu_n}; \\ L &= (n+1) \cdot \frac{v}{2\nu_{n+1}}; \\ L &= (n+k) \cdot \frac{v}{2\nu_{n+k}}. \end{aligned} \quad (4.16)$$

Из равенств (4.16) можно определить резонансные частоты:

$$\nu_n = \frac{n \cdot v}{2L};$$

$$\begin{aligned} \nu_{n+1} &= \frac{(n+1) \cdot v}{2L}; \\ \nu_{n+k} &= \frac{(n+k) \cdot v}{2L}. \end{aligned} \quad (4.17)$$

Вычитая первое равенство из последующих, исключим неизвестное число n и тем самым найдем скорость звука в газе.

$$v = 2L(\nu_{n+1} - \nu_n). \quad (4.18)$$

Ход работы

1 Включите осциллограф и генератор в сеть, включите тумблеры осциллографа и генератора, дайте им прогреться 3-5 минут.

2 Ручкой генератора «Пределы шкал ослабления dB» подрегулируйте амплитуду колебаний так, чтобы на осциллографе наблюдались колебания достаточной амплитуды (рекомендуемое 30dB). Остановите наблюдаемую картину на осциллографе, либо добейтесь плавно бегущей синусоиды на экране осциллографа, подбирая частоту развертки на осциллографе ручками «Синхронизация», «Частота плавно».

3 Изменяя частоту звуковых колебаний генератора в диапазоне от 450 до 1400 Гц, «пройдите» на осциллографе несколько последовательных резонансов, отмечая по лимбу генератора частоты, соответствующие резонансам (т.е. резкое увеличение амплитуды синусоиды по оси OY , наблюдаемое на экране осциллографа). Значения частот занесите в таблицу 4.2.

4 По средним значениям частот двух соседних резонансов по формуле (4.18) рассчитайте скорость звука. Расчет произведите для всех резонансных частот.

5 По формуле (4.13) найдите отношение C_p/C_v , произведите математическую обработку результатов измерений.

6 Операции п.п. 4-6 повторите для различных значений длины трубы, переставляя микрофон согласно заданиям преподавателя.

Таблица 4.2 — Значения частот звуковых колебаний генератора

Номер операции	V_n Гц	V_{n+1} Гц	V_{n+2} Гц	V_{n+3} Гц	V_{n+4} Гц	V_{n+5} Гц	V_{n+6} Гц	V_{n+7} Гц	D , м/с	γ
1										
2										
3										
средний вариант										
D , м/с										

Тема 5 Второе начало термодинамики, энтропия

- 1 Формулировки Томсона и Клаузиуса
- 2 Тепловая машина Карно. К. п. д. цикла Карно
- 3 Энтропия как функция состояния
- 4 Статистический смысл энтропии

Основные понятия по теме

Качественным отличием теплового движения молекул и атомов от других форм движения является его хаотичность и беспорядочность. Для характеристики теплового движения следует вывести количественную меру степени молекулярного беспорядка.

Меру степени молекулярного беспорядка можно характеризовать **термодинамической вероятностью**, под которой понимают число микросостояний (микрораспределений), которыми может осуществляться рассматриваемое макросостояние (макрораспределение). Термодинамическая вероятность отличается от математической вероятности, которая выражается дробным числом, не превышающим единицы. **Термодинамическая вероятность** выражается целым, и, как известно, очень большим числом. Смысл термодинамической вероятности W поясним на следующем примере. Пусть имеется сосуд, разделенный мысленно на три отсека. В сосуде находится шесть частиц, например молекул, которые могут хаотически двигаться. И, располагаясь тем или иным образом в отсеках сосуда, создавать определенные макрораспределения. Некоторые из возможных макрораспределений для указанного случая изображены на рисунке 5.1. Если частицы пронумеровать, то любое макрораспределение может быть реализовано рядом микрораспределений. На рисунке 5.1 представлены некоторые возможные сочетания частиц (микрораспределения), дающие макрораспределение А.

В теоретической физике доказано, что число микрораспределений, N частиц по n состояниям, например, N частиц в n отсеках, т.е. термодинамическая вероятность определяется формулой:

$$W = \frac{N!}{N_1! N_2! \dots N_n!},$$

где N_1 — число частиц в первом состоянии (первом отсеке);

N_2 — число частиц во втором состоянии (втором отсеке) и т.д.

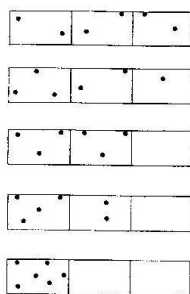


Рисунок 5.1

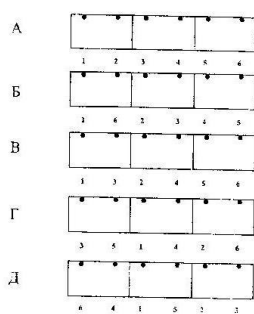


Рисунок 5.2

Вычислив термодинамические вероятности макросостояний A, B, B, Г, Д (рисунок 5.1), соответственно, получим: $W_A = 90$; $W_B = 60$; $W_B = 20$; $W_G = 15$; $W_D = 1$. Как видно, наибольшая термодинамическая вероятность у равномерного распределения. Оно может осуществляться наибольшим числом способов (числом микрораспределений). Состояние, соответствующее равномерному распределению молекул по всему объему, реализуется огромным числом микрораспределений (при большом числе молекул) и является наиболее вероятным. Макроскопическое состояние газа с определенным средним значением параметров представляет собой непрерывную схему близких микроскопических состояний, отличающихся друг от друга распределением одних и тех же молекул в разных частях объема. Число этих непрерывно сменяющих друг друга микросостояний и характеризует степень беспорядочности макроскопического состояния всей системы. Это число есть термодинамическая вероятность W макросостояния. Однако характеризовать степень хаотичности молекулярного движения с помощью W неудобно.

Если система состоит из n независимых частей с соответствующими термодинамическими вероятностями $W_1, W_2, W_3, W_4, \dots, W_n$, то вероятность всей системы будет определяться произведением вероятностей

$$W = W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4 \cdot \dots \cdot W_n.$$

Целесообразнее величину, характеризующую систему, представить не произведением, а суммой величин, характеризующих разные части системы. Больцман предложил в качестве величины, характеризующей меру беспорядочности теплового движения, взять не W , а величину, пропорциональную логарифму термодинамической вероятности $S = k \cdot \ln W$, где k — постоянная Больцмана.

Так как

$$\ln W = \ln W_1 + \ln W_2 + \ln W_3 + \dots + \ln W_n,$$

то

$$S = k \ln W = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n.$$

Величина S называется *энтропией системы* и зависит от значения макроскопических параметров (V, P, T), определяющих состояние системы. Следовательно, энтропия системы является однозначной функцией состояния системы. При расширении идеального газа в пустоту средняя энергия молекул и их распределение по скоростям не меняется, а изменяется лишь распределение молекул в пространстве. При увеличении объема газа молекулы приобретают возможность попасть в области пространства, ранее не доступные. Благодаря этому, увеличивается число возможных микросостояний и степень беспорядочности увеличивается. Число таких возможных микросостояний для одной молекулы прямо пропорционально представленному объему V . Для идеального газа, содержащего N молекул в этом объеме

$$W = V \cdot V \cdot V \cdot \dots \cdot V = V^N \quad \text{и} \quad S = kN \ln V.$$

При расширении газа в пустоту и увеличении его объема от V_1 до V_2 , энтропия газа возрастает на величину $\Delta S = kN \ln \frac{V_2}{V_1}$. Величина

ΔS представляет собой количественную меру увеличения степени хаотичности теплового движения в данном процессе. Обратный процесс собирания молекул газа в одной половине представленного им объема самопроизвольно не осуществляется, так как он маловероятен. Если бы такой процесс имел место, то это означало бы, что степень беспорядка в газе и его энтропия могут самопроизвольно уменьшаться, и газ, находившийся в более вероятном состоянии самопроизвольно перешел бы в состояние, во много раз менее вероятное.

Направление течения процессов в природе устанавливает второй закон термодинамики. В формулировке Больцмана, выявляющей статический характер этого закона, он определяется так: все процессы в природе протекают в направлении, приводящем к увеличению веро-

атности состояния.

Общее математическое выражение второго закона термодинамики дано Клаузиусом:

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0.$$

Впервые определение энтропии дано Клаузиусом исходя из понятия приведенной теплоты. Физический смысл этой величины стал понятен после того, как Больцман связал ее с термодинамической вероятностью. При некоторой температуре внутренняя энергия тела известным образом распределяется между его молекулами и тело обладает определенной энтропией S . При сообщении телу некоторого количества теплоты dQ интенсивность и энергия теплового движения возрастает и становятся возможными новые микросостояния. Увеличение числа возможных микросостояний приводит к возрастанию энтропии тела на некоторую величину ΔS . Изменение энтропии тела при переходе его из состояния 1 в состояние 2 при обратимых и необратимых процессах определяются выражением

$$\Delta S = S_2 - S_1 \geq \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Знак равенства соответствует обратимым, а неравенства – необратимым процессам. В изолированной (замкнутой) системе, состоящей из нескольких тел, при любом обратимом процессе энтропия системы остается неизменной. Представим, что процесс обмена теплотой между двумя телами обратимый, то есть температуры тел одинаковы. Изменение энтропии системы $dS = dS_1 + dS_2$, где $dS_1 = \frac{dQ}{T}$, $dS_2 = \frac{dQ}{T}$ – изменение энтропии тел системы. Общее изменение dS энтропии всей замкнутой системы равно нулю.

$$dS = \frac{dQ}{T} + \frac{dQ}{T} = 0$$

Если температуры тел различны T_1, T_2 (процесс теплообмена необратимый), то энтропия системы, состоящей из этих двух тел, изменяется на величину

$$dS = dQ \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) = \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2} dQ > 0.$$

Так как $dS > 0$, то энтропия системы при необратимом процессе в ней возрастает. Следовательно, процесс теплообмена протекает сам по себе в направлении, при котором степень беспорядка молекулярного движения возрастает, а, следовательно, увеличивается энтропия и окончательное состояние оказывается более вероятным, чем на-

чальное. Увеличение энтропии системы при теплообмене, указывает на то, что теплота самопроизвольно может передаваться от более нагретого тела, к менее нагретому. Используя понятие энтропии, второй закон термодинамики запишется:

$$dS \geq 0.$$

Знак равенства соответствует обратимым, а неравенства – необратимым процессам, происходящим в замкнутой системе. Отметим, что все реальные процессы, протекающие с конечной скоростью, являются необратимыми. Степень обратимости процессов в изолированной системе можно определить, рассчитав изменение энтропии. В силу аддитивности энтропии, ее изменение для системы тел равно

$$\Delta S = \sum_{i=1}^n \Delta S_i,$$

где ΔS_i – изменение энтропии одного тела, входящего в систему;

n – число тел системы.

Изменение энтропии тела при переходе из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Для твердых и жидких тел можно считать $C_p = C_v = C$. Тогда, $dQ = c \cdot m \cdot dT$. Подставив dQ , получим:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{c \cdot m \cdot dT}{T} = c \cdot m \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

В качестве исследуемой системы выберем калориметр с водой и твердые тела, различной массы. Наличие внешнего стакана калориметра делают систему почти адиабатно-изолированной. Если в калориметр, содержащий определенное количество воды при заданной температуре T_0 , опустить тело с другой температурой T_1 , происходит процесс теплообмена и установится некоторая общая температура T . Введем обозначение параметров, характеризующих тела системы:

- m_T, C_T, T_1 – масса, удельная теплоемкость и начальная температура испытуемого тела;
- m_K, C_K, T_0 – масса, удельная теплоемкость и начальная температура стакана калориметра;
- m_M, C_M, T_0 – масса, удельная теплоемкость и начальная температура мешалки;
- m_B, C_B, T_0 – масса, удельная теплоемкость и начальная температура воды калориметра.

При выравнивании температуры произойдет изменение энтропии:

тела: $\Delta S_1 = c_M m_M \ln \frac{T}{T_0}$
 — стакана калориметра: $\Delta S_2 = c_K m_K \ln \frac{T}{T_0}$
 — мешалки: $\Delta S_3 = c_M m_M \ln \frac{T}{T_0}$
 — воды: $\Delta S_4 = c_H m_B \ln \frac{T}{T_0}$

Изменение энтропии всей системы:

$$\Delta S = (c_K m_K + c_M m_M + c_H m_B) \ln \frac{T}{T_0} - c_M m_M \ln \frac{T}{T_1}$$

Вопросы для самоконтроля

- 1 В чем физический смысл неравенства Клаузиуса?
- 2 Что собой представляет коэффициент полезного действия цикла Карно?
- 3 В чем физический смысл энтропии?
- 4 Выведите рабочую формулу для определения энтропии.

Лабораторная работа 7

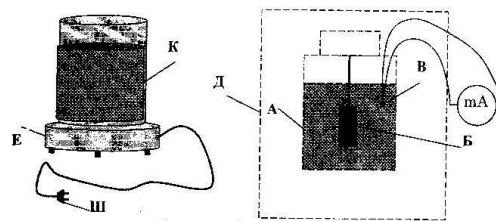
Определение изменения энтропии в реальных системах

Цель работы: определение изменения энтропии при нагревании различных тел.

Материалы и оборудование: калориметр с мешалкой, нагреватель, набор тел, весы, набор гирь.

Описание установки

Установка (рисунок 5.3) состоит из калориметра, включающего внешний стакан *Д* и внутренний стакан *А*, сосуда *К* с электроплиткой и термодпары *В* с микроамперметром. Исследуемое тело *Б* опускается в калориметрический стакан на нити, подвешенной на специальную планку.



где: А - внутренний стакан;
 Д - внешний стакан;
 В - термодпара или вольтметр-термометр;
 Б - исследуемое тело;
 Е - электроплитка;
 К - стакан для нагревания тела до $t = 100^\circ\text{C}$;
 Ш - штепсель.

Рисунок 5.3 – Схема установки для определения изменения энтропии

Ход работы

- 1 Включить электроплитку *Е*, предварительно поставив на нее сосуд с водой *К*.
- 2 Определить массу испытуемого тела m_B , массу мешалки m_M и массу калориметрического стакана *А*.
- 3 Поместить тело *Б* в стакан *К* нагревателя, а мешалку в калориметрический стакан.
- 4 Наполнить калориметрический стакан *А* на $2/3$ водой при комнатной температуре T_0 . Определить массу воды m_B .
- 5 Через 2-3 минуты после закипания воды в сосуде *К* тело из него быстро перенести в калориметрический стакан *А*. Внешний стакан калориметра закрыть крышкой.
- 6 Наблюдая за изменением температуры в калориметре по микроамперметру или вольтметр-термометру, отметить показание n мик-

рессометра или температуру по вольтметру, диаметр соответствующей равновесной температуре T . Мешалку используют в конце процесса роста температуры, делая не более 3–5 перемешиваний.

7 По градуировочному графику отметить температуру T .

8 Определить изменение энтропии системы в процессе теплообмена.

9 Аналогичные измерения проделать для двух других тел. При этом: объем воды в калориметрическом стакане A для всех тел брать одинаковый и с одинаковой температурой T_0 .

10 Построить график зависимости $\Delta S = f(c_p m_T)$.

Тема 6 Поверхностные явления

- 1 Термодинамика поверхностного натяжения
- 2 Условия равновесия на границах раздела
- 3 Давление под искривленной поверхностью
- 4 Капиллярные явления

Основные понятия по теме

Молекулы жидкости располагаются настолько близко друг к другу, что силы притяжения между ними имеют значительную величину, которая быстро убывает с расстоянием. Начиная с некоторого расстояния силами притяжения между молекулами можно пренебречь. Каждая молекула испытывает притяжение со стороны всех соседних с ней молекул, находящихся в пределах сферы действия. Равнодействующая всех этих сил для молекулы, находящейся внутри жидкости, в среднем равна нулю. Молекулы пограничного слоя жидкости окружены молекулами жидкости не со всех сторон. Часть «соседей» поверхностных молекул – это частицы другой среды, с которой граничит жидкость. Эта среда может отличаться от жидкости и природой и плотностью частиц. Поэтому силы, действующие на каждую молекулу, в этом слое оказываются несбалансированными. Равнодействующая сила направлена либо в сторону объема жидкости, либо в сторону объема граничащей с ней среды. Вследствие этого перемещение молекулы из поверхностного слоя сопровождается совершением работы.

Перемещаясь из поверхностного слоя внутрь жидкости, молекула совершает положительную работу. Переход молекулы из объема жидкости к поверхности сопровождается отрицательной работой, т.е. требует затраты внешней работы. Работа, которую необходимо затратить на увеличение площади поверхности жидкости, вычисляется по формуле:

$$A = -\sigma \Delta S, \quad (6.1)$$

где A – работа в Дж, ΔS – изменение площади поверхности в м^2 , σ – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом поверхностного натяжения.

Из (6.1) ясно, что коэффициент поверхностного натяжения численно равен работе, необходимой для увеличения площади поверхности на единицу при постоянной температуре

$$\sigma = \left[\frac{\Delta A}{\Delta S} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} \right]. \quad (6.2)$$

Таким образом, молекулы поверхностного слоя жидкости обладают избыточной по сравнению с молекулами, находящимися в объеме жидкости, потенциальной энергией, которая является свободной энергией.

Так как работа, требуемая для изменения площади поверхности, равна изменению свободной энергии поверхности $dA = -dU_{\text{св}}$, то коэффициент поверхностного натяжения можно определить как свободную энергию единицы площади этой поверхности:

$$\sigma = \frac{dU}{dA} \quad (6.3)$$

Известно, что всякая система при равновесии находится в тех состояниях, возможных для нее, при которых ее энергия имеет минимальное значение. В данном случае жидкость в равновесии должна иметь минимально возможную площадь поверхности. Это означает, в свою очередь, что существуют силы, препятствующие увеличению поверхности жидкости, т.е. стремящиеся сократить эту поверхность. Эти силы направлены по касательной к поверхности жидкости и называются силами поверхностного натяжения.

Рассмотрим проволоочный контур (рисунок 6.1), одна из сторон которого, AB , подвижна. Если поместить этот контур в мыльный раствор, то на нем образуется мыльная пленка, представляющая собой слой жидкости с двумя поверхностями.

Силы поверхностного натяжения принуждают пленку сокращаться и перемещают перемычку AB . Чтобы ее удержать в равновесии, необходимо приложить внешнюю силу F . Так как пленка имеет две поверхности, вдоль каждой из которых действует сила поверхностного натяжения $F_{\text{св}}$, то

$$F = 2F_{\text{св}} \quad (6.4)$$

Предположим, что при постоянной температуре перемычка AB бесконечно медленно перемещается на расстояние ΔX (рисунок 6.1). При этом внешняя сила совершает работу

$$\Delta A = F \cdot \Delta X \quad (6.5)$$

Эта работа пойдет на увеличение свободной энергии поверхности пленки

$$\Delta A = \Delta U_{\text{св}} = \sigma \cdot \Delta S = \sigma \cdot 2l \cdot \Delta X, \quad (6.6)$$

где l — длина перемычки AB .

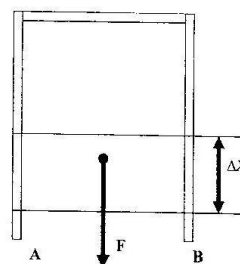


Рисунок 6.1 — Проволоочный контур с мыльной пленкой, одна из сторон AB подвижна

Тогда из (6.5) и (6.6) с учетом (6.4) получим

$$\sigma = \frac{F}{2l} = \frac{F_{\text{св}}}{l} = \left[\frac{H}{m} \right] \quad (6.7)$$

Из формулы (6.7) следует, что коэффициент поверхностного натяжения σ можно определить как величину, равную силе поверхностного натяжения, действующей на единицу длины разрыва поверхности жидкости.

Если опустить в широкий сосуд с исследуемой жидкостью капилляр, то в случае смачивания стенок капилляра, жидкость поднимется в капилляре на некоторую высоту. Указанное явление (рисунок 6.2) объясняется наличием давления над искривленной поверхностью жидкости, которое направлено к центру кривизны поверхности.

По формуле Лапласа избыток давления поверхностного слоя P с круговым сечением выражается по формуле (краевой угол θ равен 0°)

$$P = \frac{2\sigma}{r}, \quad (6.8)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения исследуемой жидкости; r — внутренний радиус капилляра ($r = 0,65 \text{ mm}$).

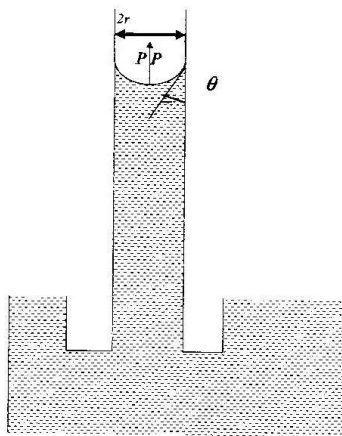


Рисунок 6.2 — Добавочное давление, вызванное кривизной поверхности жидкости.

Увеличивая внешнее давление над поверхностью жидкости в капилляре, можно достигнуть такого положения, при котором уровень жидкости в капилляре u_2 сравняется с уровнем жидкости в сосуде u_1 (рисунок 6.2). В данном случае, полагая, что внешнее давление увеличили на некоторую величину P_1 , можем записать

$$P = P_1. \quad (6.9)$$

Учитывая, что

$$P_1 = \rho gh, \quad (6.10)$$

где ρ — плотность жидкости, налитой в манометр (дистиллированная вода);

h — показания манометра, выраженные в метрах;

g — ускорение силы тяжести.

Подставив (6.9) и (6.10) в (6.8), получим:

$$\alpha = \frac{\rho gh}{2}. \quad (6.11)$$

Если, закрыв кран (пробку) отрезка O , слегка приоткрыть кран B аспиратора A , то вода начнет медленно вытекать из него и давление в колбе будет постепенно понижаться. Разность давлений ΔP внутри и вне колбы приводит к возникновению на нижнем оттянутом конце трубки воздушного пузырька, объем которого растет с ростом ΔP . Давление внутри газового пузырька в жидкости в момент отрыва равно атмосферному. Это давление уравнивается давлением P над поверхностью жидкости в сосуде D и давлением, обусловленным поверхностным натяжением P_1 :

$$P_0 = P + P_1 \quad (6.12)$$

Найдем P_1 . Рассмотрим пузырек газа радиусом R и рассмотрим его мысленно горизонтальной плоскостью (рисунок 6.3). Вследствие поверхностного натяжения верхняя часть пузырька будет притягиваться нижней, причем на каждый элемент длины пограничной линии будет действовать сила $\Delta F = \sigma \Delta l$, направленная по касательной к поверхности пузырька. Определим элементарную силу нормального давления ΔP_n на площадь сечения πr^2 :

$$\Delta F_n = \Delta F \cos \alpha \approx \sigma \frac{\Delta l}{R}. \quad (6.13)$$

Переходя к пределу и интегрируя по всей длине пограничной линии, получим полную силу нормального давления:

$$F_n = \int_0^{2\pi} \sigma \frac{r dl}{R} = \frac{2\pi r^2}{R} \sigma. \quad (6.14)$$

Таким образом, величина нормального давления на единицу площади сечения S равна:

$$\frac{F_n}{S} = \frac{2\pi r^2 \sigma}{\pi r^2 R} = \frac{2\sigma}{R}. \quad (6.15)$$

Этот вывод справедлив для любого сечения. Поэтому давление в любой точке пузырька

$$P_1 = \frac{2\sigma}{R}. \quad (6.16)$$

Давление в пузырьке будет максимальным, когда радиус R его будет минимальным, т.е. равным радиусу капилляра r . Тогда

$$\sigma = \frac{P_0 - P}{2} r = \frac{r \Delta P}{2}. \quad (6.17)$$

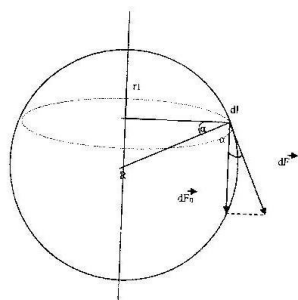


Рисунок 6.3 – Схематическое изображение газового пузырька

Величина $\frac{\sigma}{\Delta P} = \frac{r}{2} = K$ есть постоянная прибора, которая определяется изменением ΔP для жидкости с известным коэффициентом поверхностного натяжения.

Тогда для исследуемой жидкости

$$\sigma = K \Delta P, \quad (6.18)$$

где K – постоянная прибора.

Для нахождения K необходимо провести опыт с жидкостью, коэффициент поверхностного натяжения которой хорошо известен, например, с дистиллированной водой. Тогда для дистиллированной воды формула (6.18) примет вид:

$$\sigma_0 = K \Delta P_0, \quad (6.19)$$

где σ_0 – коэффициент поверхностного натяжения дистиллированной воды при определенной температуре, определяется из таблиц;

ΔP_0 – разность давлений при проведении опыта с дистиллированной водой.

Тогда

$$K = \frac{\sigma_0}{\Delta P_0} \left[\frac{H}{\text{м} \cdot \text{мм. водн. ст.}} \right], \quad (6.20)$$

Проведя опыт с любой жидкостью, коэффициент поверхностного натяжения которой неизвестен, и определив по манометру из опыта ΔP для этой жидкости, можно найти коэффициент поверхностного натяжения этой жидкости σ по формуле

$$\sigma = K \Delta P = \frac{\sigma_0}{\Delta P_0} \Delta P. \quad (6.21)$$

Вопросы для самоконтроля

- 1 Что такое поверхностная энергия?
- 2 Что такое поверхностное натяжение жидкости?
- 3 Каково условие равновесия на границах двух сред?
- 4 Что такое краевой угол?
- 5 Что такое смачивание?
- 6 Как выражается давление под искривленной поверхностью жидкости?
- 7 Каковы методы определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости?

Лабораторная работа 8

Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей методом отрыва проволоочного контура

Цель работы: Определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости методом отрыва проволоочного контура.

Материалы и оборудование: динамометр ДПН, линейные проволоочные контуры разных размеров, чаша для жидкости, термометр, электролитка, исследуемые жидкости.

Описание установки

Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва проволоочного контура (рисунок 6.4) состоит из штатива Ш, динамометра ДПН, чаши для жидкости Ч, проволоочного контура П, который подвешивается на крючок К, и винта держателя В.

Динамометр Д состоит из пружины измерительной И, шкалы динамометра А. Измерительная пружина И заканчивается крючком К.

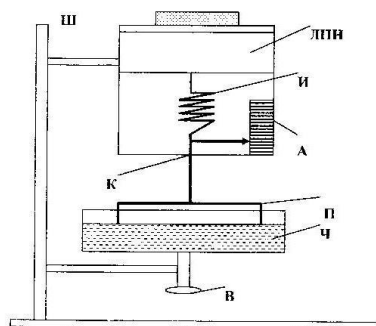


Рисунок 6.4 – Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва

Ход работы

Упражнение 1 Определение коэффициента поверхностного натяжения различных жидкостей

- 1 В чашу для исследуемой жидкости *Ч* налейте исследуемую жидкость (по рекомендации преподавателя).
- 2 На крючок *К* осторожно подвесьте проволоочный контур *П*, заданной длины (длина контура задается преподавателем).
- 3 Перемещая динамометр *Д* по высоте, проволоочный контур *П* с помощью пинцета погрузите в жидкость так, чтобы она полностью покрывала этот контур.
- 4 Медленно выворачивайте винт держателя *В*, до тех пор, пока не разорвется пленка жидкости, тянувшийся за контуром *П*, заметьте по

шкале динамометра *А* число делений *n*, при котором разорвалась пленка. Тогда сила, необходимая для разрыва пленки по контуру, вычисляется по формуле $F = n \cdot c$, где F – сила, приложенная для разрыва пленки по контуру *П*, выраженная в Ньютонах (*N*), *n* – число делений, при котором происходит разрыв пленки, *c* – цена деления динамометра (*mN*). Опыт повторите 3–5 раз. Результаты запишите в таблицу 6.1.

5 Вычислите среднее арифметическое значение силы F , абсолютную и относительную погрешность. Результаты вычислений занесите в таблицу 6.1. Операции пп. 2–6 повторите для контуров различной длины.

6 Вычислите коэффициент поверхностного натяжения жидкости по формуле

$$\sigma = \frac{F}{2l}$$

где F – сила, приложенная для разрыва пленки в *N*, l – размер проволоочного контура, выраженный в метрах (*м*).

Таблица 6.1 – Результаты измерений

Исследуемая жидкость	<i>l</i> , м	<i>n</i> , дел	F , Н	$\bar{F}$, Н	σ , $\frac{Н}{м}$	$\bar{\sigma}$, $\frac{Н}{м}$
	<i>l</i> ₁					
	<i>l</i> ₂					

Упражнение 2 Исследование зависимости коэффициента поверхностного натяжения раствора от его концентрации

- 1 Возьмите растворы с заданной концентрацией (водные растворы спирта 25%, 50%, 75%) и, используя проволоочный контур, рекомендованный преподавателем, определите силу поверхностного натяжения этих растворов по методике, изложенной в упражнении 1 (п.п. 1 – 6).

2. Вычислить коэффициент поверхностного натяжения. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 6.2.

3. Постройте график зависимости коэффициента поверхностного натяжения от концентрации раствора $\sigma = f(c)$.

Таблица 6.2 – Результаты измерений

Исследуемая жидкость	l, м	c, %	p, деп.	F, Н	σ , Н/м
Водный раствор спирта					

Лабораторная работа 9

Определение коэффициента поверхностного натяжения методом компенсации разности давлений поверхностного слоя жидкости

Цель работы: ознакомление с методикой определения коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом компенсации разности давлений поверхностного слоя.

Материалы и оборудование: установка, два стакана, исследуемые жидкости (дистиллированная вода, спирт).

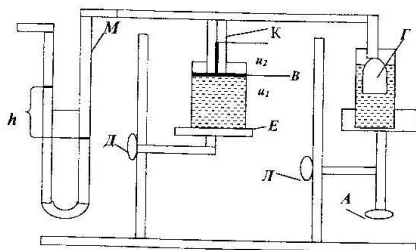


Рисунок 6.5 – Схема установки

Описание установки

Установка для определения коэффициента поверхностного натяжения методом компенсации разности давлений поверхностного слоя жидкости изображена на рисунке 6.5. Капилляр при помощи резиновых трубок сообщается с водяным манометром М и стеклянной воронкой Г. К капилляру К на столике В подводят сосуд, наполненный исследуемой жидкостью.

Достигнув соприкосновения капилляра с поверхностью исследуемой жидкости u_1 , столик В закрепляется винтом Д.

Столик А со стаканом, наполненным водой, подводят к стеклянной воронке Г до соприкосновения стеклянной воронки с водой. Для увеличения давления в системе «капилляр – манометр» столик А со стаканом перемещают вверх, вкручивая винт Л, вращая против часовой стрелки.

Манометр М (рисунок 6.6) представляет собой стеклянную U-образную трубку, закрепленную на стойке с миллиметровыми делениями. Манометр наполняют дистиллированной водой до отметки «0».

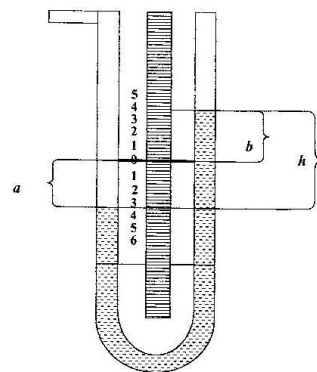


Рисунок 6.6 – Манометр открытый

Разность между давлением в системе «капилляр – манометр» и атмосферным давлением измеряется при помощи манометра следующим образом: пусть вода в одном колене манометра опустилась до отметки a мм, а в другом – поднялась до отметки b мм, тогда h – разность между давлением в системе и атмосферным равна

$$h = |a| + |b|.$$

Ход работы

1 Промойте капилляр исследуемой жидкостью. Для этого в стакан столика A налейте воду, а в сосуд столика B исследуемую жидкость (например, дистиллированную воду). Установите столик B так, чтобы уровень исследуемой жидкости был выше свободного торца капилляра приблизительно на 1 см. Поднимая и опуская стакан столика A , поднесенный к воронке G , промойте капилляр. Опустите столик B . Приложите к торцу капилляра салфетку, освободите капилляр от жидкости, оставшейся внутри. Торцы капилляра протрите спиртом.

2 Установите столик B так, чтобы уровень исследуемой жидкости в сосуде точно касался торца капилляра. Закрепите столик B винтом D в этом положении. При этом, вследствие смачивания, жидкость в капилляре поднимется на некоторую высоту u_2 (рисунок 6.5).

3 Поднимите столик A так, чтобы уровень воды в стакане столика A соприкасался со стеклянной воронкой G .

4 Медленно поднимая столик A со стаканом, наполненным водой (вкручивая винт L – вращая против часовой стрелки), т.е. увеличивая давление в системе «капилляр – манометр», необходимо создать такое избыточное давление, при котором уровень исследуемой жидкости в капилляре u_2 сравняется с уровнем исследуемой жидкости в сосуде u_1 (рисунок 6.5). Зафиксируйте столик B в данном положении. Снимите показания манометра. Результат занести в таблицу 6.3.

5 Опыт (п.п. 1 – 4) проделайте 5–7 раз.

6 По формуле (6.4) вычислите α .

7 Произведите измерение коэффициента поверхностного натяжения для жидкости с различной концентрацией. Построить график за-

висимости $\alpha = f(c)$, где c – концентрация раствора. Полученные данные занесите в таблицу 6.3.

8 Внесите раствор неизвестной концентрации c_x и найдите для него α . Затем по графику определите раствор неизвестной концентрации c_x .

9 Произведите математическую обработку результатов измерений. Полученные данные занесите в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Результаты измерений

Исследуемая жидкость	$h, 10^{-3}$ м	$\bar{h}, 10^{-3}$ м	$P_1,$ Н/м ²	$\bar{P}_1,$ Н/м ²	α Н/м	$\bar{\alpha}$ Н/м

Лабораторная работа 10

Изучение температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения жидкости методом максимального давления в пузырьке

Цель работы: Определить коэффициент поверхностного натяжения неизвестной жидкости, изучить зависимость коэффициента поверхностного натяжения от концентрации раствора и зависимость коэффициента поверхностного натяжения воды от температуры.

Материалы и оборудование: установка, стаканы, электроплитка, термометр, исследуемые жидкости различных концентраций.

Описание установки

Установка (рисунок 6.7) состоит из аспиратора A , соединенного резиновыми трубками с микроманометром M и верхним воздушным пространством плотно закрытой колбы D , в которую наливается некоторое количество исследуемой жидкости. В колбу D вводится также стеклянная трубка C , нижний конец которой оттянут, а верхний соединен с атмосферой. Оттянутый конец трубки C помещается на уровне исследуемой жидкости так, чтобы он по всему периметру соприкасался с ее поверхностью.

Если из аспиратора A вытекает вода, то давление воздуха внутри сосуда D понижается и при некотором значении P под действием атмосферного давления P_0 через капилляр в жидкость продавливается

пузырек воздуха. Разность $P_0 - P$ измеряется микроманометром M (в мм. водного ст.).

Для исследования σ дистиллированной воды от температуры сосуд D помещается на плитку.

Система «аспиратор – колба – манометр» соединяется через кран (пробку) оторстка O с атмосферой.

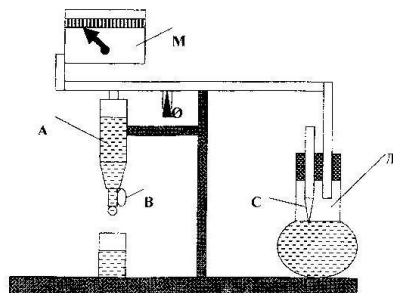


Рисунок 6.7 – Схема установки

Ход работы

Упражнение 1 Определение постоянной прибора

- 1 Заполните аспиратор A водой и плотно закрыть пробкой.
- 2 Промойте трубку C сначала спиртом, а затем дистиллированной водой.
- 3 Колбу D заполните дистиллированной водой, для которой коэффициент поверхностного натяжения σ_0 известен. Измерьте температуру дистиллированной воды в колбе D и по таблице найдите σ_0 .

4 Установите трубку C так, чтобы ее конец коснулся поверхности воды по всему периметру сечения трубки.

5 Откройте пробку O , в результате чего вся система соединится с атмосферой. Стрелка микроманометра M должна установиться на отметке « -20 дел.». Закройте пробку O .

6 Откройте кран B аспиратора A настолько, чтобы изменение разности давлений происходило достаточно медленно, и можно было легко измерить величину ΔP_0 в момент проталкивания пузырька, т.е. максимальное отклонение стрелки микроманометра.

7 При установившейся частоте проталкивания пузырьков сделайте 10–12 отсчетов ΔP_0 .

8 Результаты измерений занесите в таблицу 6.4.

9 Найдите величину K , подставив в формулу (6.20) среднее значение ΔP_0 и найденное из таблиц значение σ_0 .

10 Произведите математическую обработку результатов измерений.

Таблица 6.4

Исследуемая жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	ΔP_0 мм. вод. ст.	ΔP_0 мм. вод. ст.	$\sigma_0 \cdot 10^{-3}$ $\frac{\text{Н}}{\text{м}}$	$K, \frac{\text{Н}}{\text{м} \cdot \text{мм. вод. ст.}}$	K

Упражнение 2 Определение σ спирта

Внимание! Опыт со спиртом и водными спиртовыми растворами проводить только при КОМНАТНОЙ температуре!

- 1 Заполните колбу D исследуемой жидкостью (спиртом).
- 2 Произведите измерения ΔP для спирта по методике упражнения 1 (п.п.4–6).
- 3 Рассчитайте σ для спирта по формуле (6.21).

4 Произведите математическую обработку результатов измерений. Результаты измерений занесите в таблицу 6.5.

5 Проведите все измерения по определению σ_c для растворов разной концентрации и постройте график зависимости $\sigma_c = f(c)$, где c – концентрация раствора.

6 Возьмите раствор неизвестной концентрации, определите коэффициент поверхностного натяжения σ_c и затем по графику $\sigma_c = f(c)$, найти неизвестную концентрацию x .

7 Произведите математическую обработку результатов измерений. Результаты измерений занесите в таблицу 6.6.

Таблица 6.5 – Результаты измерений

Исследуемая жидкость	ΔP_c мм. вод. ст.	$\Delta \bar{P}_c$ мм. вод. ст.	$\sigma_c \cdot 10^{-3}$ $\frac{H}{M}$	$\bar{\sigma}_c \cdot 10^{-3}$ $\frac{H}{M}$
$i = 75\%, 50\%, 25\%, X\%$				

Упражнение 3 Исследование зависимости коэффициента поверхностного натяжения дистиллированной воды от температуры

1 Заполните колбу дистиллированной водой, предварительно прополоскав ее этой жидкостью.

2 Нагревая колбу с дистиллированной водой на электроплитке, произведите 10 – 12 отсчетов измерений ΔP_c согласно методике, изложенной в упражнении 1 (п. 4 – 7), через каждые 5°С. Вследствие объемного расширения воды при нагревании, перед каждым измерением выливайте воду из колбы D на столько, чтобы при всех измерениях кончик трубки C точно касался поверхности воды. Для отбора жидкости из колбы пользуйтесь пипеткой.

3 Результаты измерений занесите в таблицу 6.6.

Таблица 6.6 – Результаты измерений

Исследуемая жидкость	$t, ^\circ\text{C}$	ΔP_c мм. вод.ст	$\Delta \bar{P}_c$ мм. вод.ст	$\sigma_c \cdot 10^{-3}$ $\frac{H}{M}$

Тема 7 Симметрия твердых тел

- 1 Кристаллические и аморфные тела
- 2 Элементы симметрии и их взаимодействия
- 3 Симметрия кристаллических многогранников и кристаллических решеток
- 4 Принципы построения кристаллографических классов

Основные понятия по теме

Кристаллы – твердые тела, обладающие трехмерной периодической атомной структурой. При равновесных условиях образования имеют естественную форму правильных симметричных многогранников. Кристаллы – равновесное состояние твердых тел.

Каждому химическому веществу, находящемуся при данных термодинамических условиях (температура, давление) в кристаллическом состоянии, соответствует определенная атомно-кристаллическая структура.

Кристалл, выросший в неравновесных условиях и не имеющий правильной огранки или потерявший ее в результате обработки, сохраняет основной признак кристаллического состояния – решетчатую атомную структуру (кристаллическую решетку) и все определяемые ею свойства.

Твердые тела чрезвычайно разнообразны по структуре своего строения, характеру сил связи частиц (атомов, ионов, молекул), физическим свойствам. Практическая потребность в тщательном изучении физических свойств твердых тел привела к тому, что примерно половина всех физиков на Земле занимается исследованием твердых тел, созданием новых материалов с наперед заданными свойствами, а также их практическим применением. Известно, что при переходе веществ из жидкого состояния в твердое возможны два различных вида затвердевания.

В жидкости, охлажденной до определенной температуры, появляются **кристаллики** (области упорядоченно расположенных частиц) – центры кристаллизации, которые при дальнейшем отводе тепла от вещества растут за счет присоединения к ним частиц из жидкой фазы и охватывают весь объем вещества.

Затвердение происходит вследствие быстрого повышения вязкости жидкости с понижением температуры.

Твердые тела, образующиеся при таком процессе затвердевания, относятся к **аморфным телам**. Среди них различают вещества, у которых кристаллизация совсем не наблюдается (сургуч, воск, смола), и вещества, способные кристаллизоваться, например, стекло. Однако, вследствие того, что вязкость у них быстро растет с понижением температуры, затрудняется перемещение молекул, необходимое для формирования и роста кристаллов, и вещество успевает затвердеть до наступления кристаллизации. Такие вещества называются стеклообразными. Процесс кристаллизации этих веществ протекает очень медленно в твердом состоянии, причем более легко при высокой температуре. Известное явление «расстекловывания» или «затухания» стекла обусловлено образованием внутри стекла мелких кристалликов, на границах которых происходит отражение и рассеивание света, вследствие чего стекло становится непрозрачным. Похожая картина имеет место при «засахаривании» прозрачного сахарного леденца.

Аморфные тела можно рассматривать как жидкости с очень большим коэффициентом вязкости. Известно, что у аморфных тел можно наблюдать слабо выраженное свойство текучести. Если наполнить воронку кусками воска или сургуча, то через некоторое время, разное для различных температур, куски аморфного тела будут постепенно расплываться, принимая форму воронки, и вытекать из нее в виде стержня. Даже у стекла обнаружено свойство текучести. Измерения толщины оконных стекол в старых зданиях показали, что за несколько веков стекло успело стечь сверху вниз. Толщина нижней части стекла оказалась немного больше верхней.

Строго говоря, твердыми телами следует назвать только кристаллические тела. **Аморфные тела** по некоторым свойствам, а главное, по строению, аналогичны жидкостям: их можно рассматривать как сильно переохлажденные жидкости, имеющие очень большую вязкость.

Известно, что в отличие от дальнего порядка в кристаллах (упорядоченное расположение частиц сохраняется по всему объему каждого кристаллического зерна), в жидкостях и аморфных телах наблюдается ближний порядок в расположении частиц. Это значит, что по отношению к любой частице расположение ближайших соседних частиц является упорядоченным, хотя и выражено не так четко, как в кристалле, но при удалении от данной частицы расположение по отношению к ней других частиц, становится все менее упорядоченным и на расстоянии 3 – 4 эффективных диаметров молекулы, порядок в расположении частиц полностью исчезает.

приведены в таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Сравнительные характеристики различных состояний вещества

Кристаллическая система	Соотношение ребер элементарной ячейки	Соотношение углов в элементарной ячейке
Триклинная	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma$
Моноклиная	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$
Ромбическая	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$
Тетрагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Кубическая	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Тригональная (ромбоэдрическая)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ, \text{ но } (120^\circ)$
Гексагональная	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$

Для удобства описания правильной внутренней структуры твердых тел обычно пользуются понятием пространственной или кристаллической решетки. Она представляет собой пространственную сетку, в узлах которой располагаются частицы – ионы, атомы, молекулы, образующие кристалл.

На рисунке 7.1 изображена пространственная кристаллическая решетка. Жирными линиями выделен наименьший параллелепипед, параллельным перемещением которого вдоль трех координатных осей, совпадающих с направлением ребер параллелепипеда, может быть построен весь кристалл. Этот параллелепипед называется основной или элементарной ячейкой решетки. Атомы расположены в данном случае в вершинах параллелепипеда.

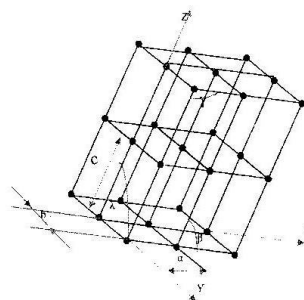


Рисунок 7.1 – Изображение пространственной решетки

Для однозначной характеристики элементарной ячейки задаются шесть величин: три ребра a, b, c и три угла между ребрами параллелепипеда α, β, γ . Эти величины называются параметрами решетки. Параметры a, b, c – это межатомные расстояния в кристаллической решетке. Их численные значения порядка 10^{-10} м.

Простейшим типом решеток являются кубические с параметрами $a=b=c$ и $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$.

Для символического обозначения узлов, направлений и плоскостей в кристалле используются так называемые индексы Миллера.

Положение любого узла в решетке относительно выбранного начала координат определяется тремя координатами X, Y, Z (рисунок 7.2).

Через параметры решетки эти координаты можно выразить следующим образом: $X = ma, Y = nb, Z = pc$, где a, b, c – параметры решетки, m, n, p – целые числа.

Таким образом, если за единицу длин вдоль оси решетки взять нм, а параметры решетки a, b, c (осевые единицы длины), то коор-

динатами узла будут числа m, n, p . Эти числа называются индексами узла и обозначаются $\llbracket m \ n \ p \rrbracket$.

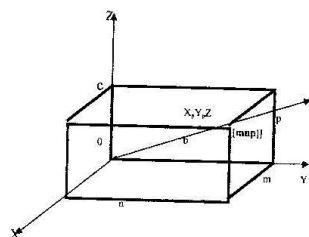


Рисунок 7.2 – Положение узла в решетке

Для узлов, лежащих в области отрицательных направлений координат, ставится над соответствующим индексом знак минус. Например $\llbracket m \ \bar{n} \ p \rrbracket$.

Для задания направления в кристалле выбирается прямая (рисунок 7.2), проходящая через начало координат. Её ориентация однозначно определяется индексом $m \ n \ p$ первого узла, через который она проходит. Следовательно, индексы направления определяются тремя наименьшими целыми числами, характеризующими положение ближайшего от начала координат узла, лежащего на данном направлении. Индексы направления записываются следующим образом $\llbracket m \ n \ p \rrbracket$.

На рисунке 7.3 представлены основные направления в кубической решетке.

Семейство эквивалентных направлений обозначается латышскими скобками $\langle m \ n \ p \rangle$.

Например, семейство эквивалентных направлений $\langle 110 \rangle$ включает направления:

$$\llbracket 110 \rrbracket, \llbracket \bar{1}10 \rrbracket, \llbracket 1\bar{1}0 \rrbracket, \llbracket \bar{1}\bar{1}0 \rrbracket, \llbracket 101 \rrbracket, \llbracket \bar{1}01 \rrbracket, \llbracket 10\bar{1} \rrbracket, \llbracket \bar{1}0\bar{1} \rrbracket, \llbracket 011 \rrbracket, \llbracket 0\bar{1}1 \rrbracket, \llbracket 01\bar{1} \rrbracket, \llbracket 0\bar{1}\bar{1} \rrbracket.$$

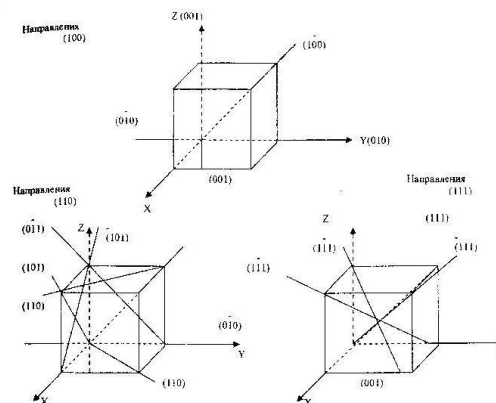


Рисунок 7.3 – Основные направления в кубической решетке

Положение плоскостей в пространстве определяется заданием трех отрезков OA, OB, OC (рисунок 7.4), которые она отсекает на осях выбранной системы координат. В осевых единицах длины отрезков будут:

$$m = \frac{OA}{a}; n = \frac{OB}{b}; p = \frac{OC}{c}.$$

Три числа m, n, p вполне определяют положение плоскости S . Для получения Миллеровских индексов с этими числами нужно сделать некоторые преобразования.

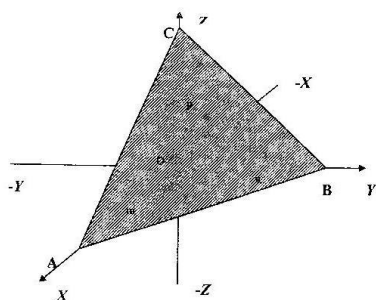


Рисунок 7.4 – Положение плоскости в пространстве

Составим отношение обратных величин осевых отрезков $\frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p}$ и выразим его через отношение трех наименьших чисел h, k, l так, чтобы выполнялось равенство $\frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p} = h : k : l$.

Числа h, k, l являются индексами плоскости. Для нахождения индексов плоскости отношение $\frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p}$ приводят к общему наименьшему знаменателю и знаменатель отбрасывают. Числители дробей и дают индексы плоскости. Поясним это на примере: $m=1, n=2, p=3$. Тогда $\frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p} = \frac{1}{1} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} = \frac{6}{6} : \frac{3}{6} : \frac{2}{6} \Rightarrow 6 : 3 : 2$. Таким образом, для рассматриваемого случая $h=6, k=3, l=2$. Миллеровские индексы плоскостей заключаются в круглые скобки (6 3 2). Отрезки m, n, p могут быть и дробными, но индексы Миллера и в этом случае выражаются целыми числами.

Пусть $m=1, n=\frac{1}{4}, p=\frac{1}{3}$, то $\frac{1}{m} : \frac{1}{n} : \frac{1}{p} = \frac{1}{1} : \frac{4}{1} : \frac{3}{1} \Rightarrow 1 : 4 : 3$.

При параллельной ориентации плоскости относительно какой-нибудь оси координат, индекс, соответствующий этой оси, равен нулю.

Если отрезок, отсекаемый на оси, имеет отрицательное значение, то соответствующий индекс плоскости тоже будет иметь отрицатель-

ный знак. Пусть $h=-6, k=3, l=2$, то такая плоскость в Миллеровских индексах плоскостей запишется $(\bar{6} 3 2)$.

Необходимо отметить, что индексы плоскости (h, k, l) задают ориентацию не какой-то конкретной плоскости, а семейства параллельных плоскостей, то есть, по существу, определяют кристаллографическую ориентацию плоскости.

На рисунке 7.5 изображены основные плоскости в кубической решетке. Некоторые плоскости, отличающиеся по индексам Миллера, являются эквивалентными в физическом и кристаллографическом смысле. В кубической решетке одним из примеров эквивалентности являются грани куба $\{100\}, \{010\}, \{001\}, \{\bar{1}00\}, \{0\bar{1}0\}, \{00\bar{1}\}$. Физическая эквивалентность состоит в том, что все эти плоскости обладают одинаковой структурой в расположении узлов решетки, а следовательно, и одинаковыми физическими свойствами. Кристаллографическая эквивалентность их в том, что эти плоскости совмещаются друг с другом при повороте вокруг одной из осей координат на угол, кратный $\frac{\pi}{2}$.

Семейство эквивалентных плоскостей задается фигурными скобками. Например, символом $\{100\}$ обозначается все семейство граней куба.

Трехкомпонентная символика Миллера применяется для всех систем решеток, кроме гексагональной. В гексагональной решетке (рисунок 7.2) узлы расположены в вершинах правильных шестиугольных призм и в центрах их шестиугольных оснований. Ориентация плоскостей в кристаллах гексагональной системы описывается с помощью четырех осей координат x_1, x_2, x_3, z , так называемыми **индексами Миллера-Браве**. Оси x_1, x_2, x_3 расходятся из начала координат под углом 120° . Ось z перпендикулярна им. Обозначение направлений по четырехкомпонентной символике затруднительно и применяется редко, поэтому направления в гексагональной решетке задаются по трехкомпонентной символике Миллера.

Одним из основных свойств кристаллов является **анизотропия**. Под этим термином понимается изменение физических свойств в зависимости от направления в кристалле. Так кристалл может иметь для разных направлений различные прочность, твердость, теплопроводность, удельное сопротивление, показатель преломления и т.д. Анизотропия проявляется и в поверхностных свойствах кристаллов. Коэффициент поверхностного натяжения для разнородных граней кристалла имеет различную величину. При росте кристалла из расплава или раствора это является причиной различия скоростей роста разных граней.

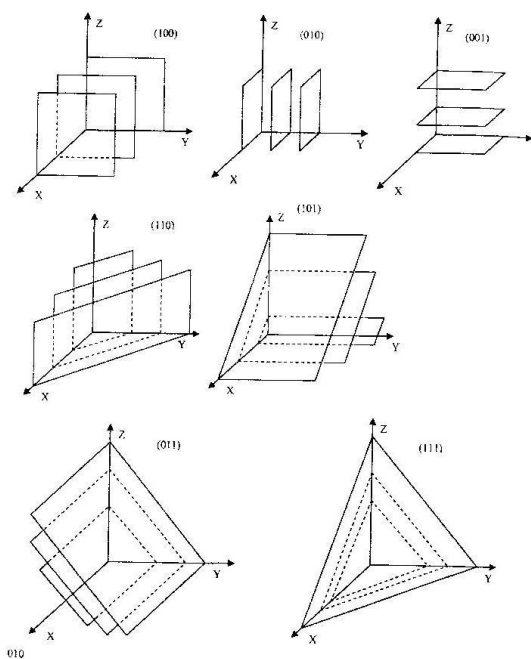


Рисунок 7.5 – Основные плоскости в кубической решетке

64

Анизотропия скоростей роста обуславливает правильную форму растущего кристалла. Анизотропия поверхностных свойств также имеет место в различии адсорбционной способности скоростей растворения, химической активности разных граней одного и того же кристалла. Анизотропия физических свойств является следствием упорядоченной структуры кристаллической решетки. В такой структуре плотность упаковки атомами плоскостей различна. Рисунок 7.6 поясняет сказанное.

Расположив плоскости в порядке убывания плотности заселения их атомами, получим следующий ряд: $(0\ 1\ 0)$, $(1\ 0\ 0)$, $(1\ 1\ 0)$, $(1\ 2\ 0)$, $(3\ 2\ 0)$. В наиболее плотно заполненных плоскостях атомы прочнее связаны друг с другом, так как расстояние между ними наименьшее. С другой стороны, наиболее плотно заполненные плоскости, будучи удаленными друг от друга на относительно большие расстояния, чем мало-заселенные плоскости, будут слабее связаны друг с другом.

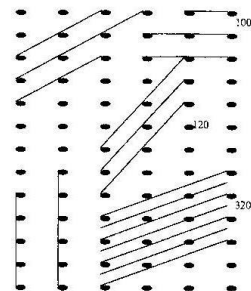


Рисунок 7.6 – Графическое пояснение упаковки атомами плоскостей

65

На основании изложенного можно сказать, что для условный кристалл легче всего расколоть по плоскости (010), чем по другим плоскостям. В этом и проявляется *анизотропия механической прочности*. Другие физические свойства кристалла (тепловые, электрические, магнитные, оптические) также могут быть различными по разным направлениям. Важнейшим свойством кристаллов, кристаллических решеток и их элементарных ячеек является *симметрия* по отношению к определенным направлениям (осям) и плоскостям.

В силу периодичности расположения частиц в кристалле, он обладает симметрией. Это свойство заключается в том, что в результате некоторых мысленных операций система частиц кристалла совмещается сама с собой, переходит в положение, не отличающееся от исходного. Каждой операции можно поставить в соответствие элемент симметрии. Для кристаллов существует четыре элемента симметрии. Это – ось симметрии, плоскость симметрии, центр симметрии и зеркально-поворотная ось симметрии.

В 1867 г. русский кристаллограф А. В. Гадолин показал, что может существовать 32 возможные комбинации элементов симметрии. Каждая из таких возможных комбинаций элементов симметрии называется *классом симметрии*. Опытом было подтверждено, что в природе существуют кристаллы, относящиеся к одному из 32 классов симметрии. В кристаллографии указанные 32 класса симметрии в зависимости от соотношения параметров $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ объединяют в 7 систем (сингоний), которые носят следующие названия: триклинная, моноклинная, ромбическая, тригональная, гексагональная, тетрагональная и кубическая системы. В таблице 7.1 приведены соотношения параметров для указанных систем.

Как показал французский кристаллограф Браве, всего существует 14 типов решеток, принадлежащих различным кристаллическим системам.

Если узлы кристаллической решетки расположены только в вершинах параллелепипеда, представляющего собой элементарную ячейку, то такая решетка называется *примитивной* или *простой* (рисунок 7.7, 1, 2, 4, 9, 10, 12); если, кроме того, имеются узлы в центре оснований параллелепипеда, то такая решетка называется *базоцентрированной* (рисунок 7.7, 3, 5); если есть узел в месте пересечения пространственных диагоналей, то решетка называется *объемноцентрированной* (рисунок 7.7, 6, 11, 13); а если имеются узлы в центре всех боковых граней – *гранецентрированной* (рисунок 7.7, 7, 14). Решетки,

элементарные ячейки которых содержат дополнительные узлы внутри объема параллелепипеда или на его гранях, называются *сложными*.

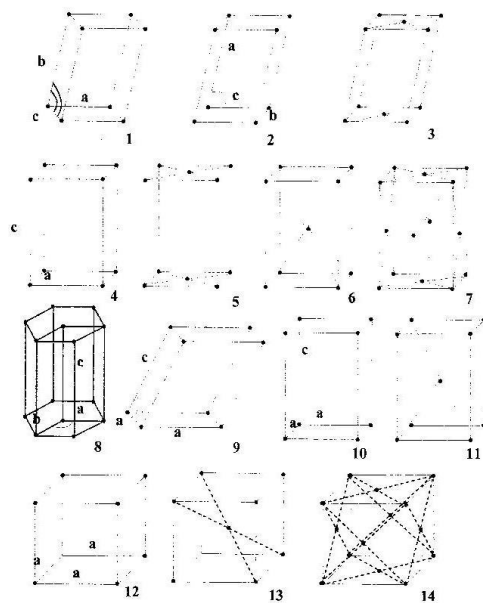


Рисунок 7.7 — Графическое изображение решеток Браве

Решетка Браве представляет собой совокупность одинаковых и одинаково расположенных частиц (атомов, ионов), которые могут быть совмещены друг с другом путем параллельного переноса. Не следует полагать, что одна решетка Браве может исчерпать собой все атомы (ионы) данного кристалла. Сложную структуру кристаллов можно представить как совокупность нескольких решеток Браве, вдвинутых одна в другую. Например, кристаллическая решетка поваренной соли NaCl (рисунок 7.8) состоит из двух кубических гранцентрированных решеток Браве, образованных ионами Na^+ и Cl^- , смещенных относительно друг друга на половину ребра куба.

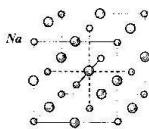


Рисунок 7.8 – Кристаллическая решетка поваренной соли

Зная химический состав кристалла и его пространственную структуру, можно вычислить период решетки этого кристалла. Задача сводится к тому, чтобы установить число молекул (атомов, ионов) в элементарной ячейке, выразить ее объем через период решетки и, зная плотность кристалла, произвести соответствующий расчет. Важно отметить, что для многих типов кристаллической решетки большинство атомов принадлежит не одной элементарной ячейке, а входит одновременно в состав нескольких соседних элементарных ячеек.

Для примера определим период решетки хлористого натрия, решетка которого показана на рисунке 7.8.

Период решетки равен расстоянию между ближайшими одноименными ионами. Это соответствует ребру куба. Найдем число ионов натрия и хлора в элементарном кубе, объем которого равен d^3 , d – период решетки. По вершинам куба расположено восемь ионов натрия, но каждый из них является одновременно вершиной восьми

смежных элементарных кубов, следовательно, данному объему принадлежит лишь $\frac{1}{8}$ часть иона, расположенного в вершине куба. Всего таких ионов натрия восемь, которые в совокупности составляют $\frac{1}{8} \cdot 8 = 1$ ион натрия. Шесть ионов натрия расположены в центрах грани куба, но каждый из них принадлежит рассматриваемому кубу только наполовину. В совокупности они составляют $\frac{1}{2} \cdot 6 = 3$ иона натрия. Таким образом, рассматриваемому элементарному кубу принадлежит четыре иона натрия.

Один ион хлора расположен на пересечении пространственных диагоналей куба. Он целиком принадлежит нашему элементарному кубу. Двенадцать ионов хлора размещены по серединам ребер куба. Каждый из них принадлежит объему d^3 на одну четверть, так как ребро куба одновременно является общим для четырех смежных элементарных ячеек. Таких ионов хлора рассматриваемому кубу принадлежит двенадцать, что в совокупности составляет $\frac{1}{4} \cdot 12 = 3$ иона хлора. Всего в элементарном объеме d^3 содержится четыре иона натрия и четыре иона хлора, то есть четыре молекулы хлористого натрия ($n = 4$).

Если четыре молекулы хлористого натрия занимают объем d^3 , то на один моль кристалла придется объем $V_m = d^3 \cdot \frac{N_A}{n}$, где N_A – число Авогадро, n – число молекул в элементарной ячейке.

С другой стороны $V_m = \frac{\mu}{\rho}$, где μ – масса моля, ρ – плотность кристалла. Тогда $d^3 \cdot \frac{N_A}{n} = \frac{\mu}{\rho}$, откуда

$$d = \sqrt[3]{\frac{n \cdot \mu}{N_A \cdot \rho}}$$

При определении числа атомов в одной параллелепipedной элементарной ячейке (подсчет содержания) нужно руководствоваться правилом:

– если центр атомной сферы совпадает с одной из вершин элементарной ячейки, то от такого атома данной ячейке принадлежит $\frac{1}{8}$, так как в любой вершине параллелепипеда одновременно сходятся во-

семь смежных параллелепипедов, к которым в равной мере относится вершинный атом (рисунок 7.9);

– от атома, расположенного на ребре ячейки, принадлежит данной ячейке $\frac{1}{4}$, так как ребро является общим для четырех параллелепипедов (рисунок 7.9);

– от атома, лежащего на грани ячейки, принадлежит данной ячейке $\frac{1}{2}$, так как грань ячейки общая для двух параллелепипедов (рисунок 7.9);

– атом, расположенный внутри ячейки, принадлежит ей целиком (рисунок 7.9).

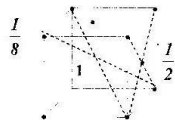


Рисунок 7.9

При использовании указанного правила форма параллелепипедной ячейки безразлична. Сформулированное правило может быть распространено на ячейки любых систем.

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы основные свойства кристаллических и аморфных тел?
2. Для чего вводятся индексы Миллера?
3. Каковы основные классы симметрии?

Лабораторная работа 11

Изучение структуры моделей кристаллов

Ход работы

У полученных моделей реальных кристаллов:

1. Выделить элементарную ячейку.
2. Определить тип решетки Браве.
3. Произвести «подсчет содержания» для данных элементарных ячеек.
4. Определить период решетки.
5. Изобразить на рисунке плоскости и направления по индексам Миллера, указанным преподавателем.
6. В отчет по лабораторной работе включить ответы на все пункты.

Тема 8 Теплоемкость твердых тел

- 1 Классическая теория теплоемкости твердых тел
- 2 Расхождение с экспериментом
- 3 Элементы квантовой теории теплоемкости

Основные понятия по теме

Теплоемкостью вещества называется количество теплоты, необходимое для нагревания всей массы вещества на один Кельвин

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}, \quad (8.1)$$

Удельной теплоемкостью называется физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое надо сообщить, чтобы нагреть 1 кг вещества на 1 К.

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T}. \quad (8.2)$$

Связь между теплоемкостью и удельной теплоемкостью выражается формулой

$$C = cm. \quad (8.3)$$

Согласно классической теории теплоемкости при не слишком низких температурах, молярная теплоемкость химически простых веществ в кристаллическом состоянии одинакова и равна $3R$, т.е.

$$C_m = 3R. \quad (8.4)$$

Это утверждение составляет содержание закона Дюлонга и Пти, установленного опытным путем.

Если нагреть на ΔT градусов калориметр с помещенным в него исследуемым телом, то энергия электрического тока пойдет на нагревание исследуемого тела и калориметра.

$$IU\tau_1 = (C_k + C_t)\Delta T + \delta \quad (8.5)$$

В данном выражении I – сила тока, U – напряжение на нагревателе, τ – время нагревания, C_k и C_m – теплоемкость калориметра и тела, δ – потеря тепла.

Для того чтобы вычислить и исключить из уравнения (8.5) тепло, идущее на нагрев калориметра и потери тепла в окружающее пространство, можно нагреть пустой калориметр на те же ΔT градусов. Потери тепла в обоих случаях будут одинаковы, так как они зависят только от разности температур ΔT , но этот процесс потребует меньший процесс нагревания τ_2 :

$$IU\tau_2 = C_t \Delta T + \delta. \quad (8.6)$$

Решив два уравнения (8.5) и (8.6) найдем теплоемкость тела.

$$C_t = \frac{I \cdot U}{\Delta T} \Delta \tau, \quad (8.7)$$

где $\Delta \tau = \tau_1 - \tau_2$.

Величину разности времени $\Delta \tau$ можно определить по графикам в зависимости от разности температур ΔT , от времени для пустого калориметра и калориметра с исследуемым телом (рисунок 8.1)

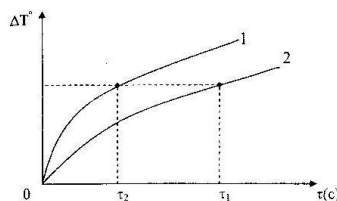


Рисунок 8.1 – График зависимости разности температур ΔT от времени τ для пустого калориметра и калориметра с исследуемым телом

Вопросы для самоконтроля

- 1 Классическая и квантовая теория теплоемкости.
- 2 Что называется теплоемкостью тела? Каковы единицы ее измерения?
- 3 В чем состоит закон Дюлонга и Пти?

Лабораторная работа 12

Определение удельной теплоемкости твердых тел методом нагревания

Цель работы: определение удельной теплоемкости твердого тела и проверка выполнимости закона Дюлонга и Пти.

Материалы и оборудование: установка, источник тока, секундомер, термометр, гальванометр типа М.

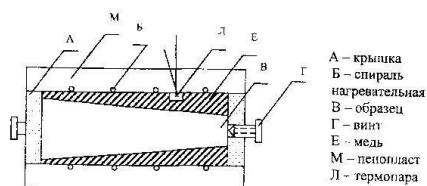


Рисунок 8.2 – Схема установки

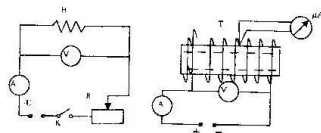


Рисунок 8.3 – Схема подключения нагревателя Н

Описание установки

Внутренние стенки калориметра выполнены из материала с высокой теплопроводностью. Для обеспечения надежного теплового контакта исследуемые образцы и стенки калориметра выполнены в форме усеченных конусов и плотно прилегают друг к другу. В теплоизолированную стенку калориметра вмонтированы электронагреватель и термометр. Для выталкивания образца служат плоскогубцы.

Ход работы

- 1 Проверить электрическую схему (рисунок 8.3).
- 2 Подготовить калориметр к работе, установить термометр в гнездо калориметра до упора. Установить нуль гальванометра и предел измерения на деление 5mB.
- 3 Замкнуть ключ и установить ток в цепи 3 – 4 А.
- 4 Закрывать калориметр, включить нагреватель, одновременно включить секундомер и начать измерение через каждые две минуты в течение 20 минут. Построить график зависимости изменения температуры от времени $\Delta T = f(\tau)$, используя градуировочный график термометра:

$$\eta = f(\Delta T).$$

Внимание. Следить, чтобы мощность нагревателя не менялась во время проведения эксперимента. Для вычисления средних величин периодически записывать показания вольтметра и амперметра во время нагревания.

- 5 Выключить нагреватель. Подождать, пока остынет калориметр, а затем поместить в него испытуемое тело, предварительно извесив его. Повторить измерение (п.п. 5 и 6) с испытуемым телом. Нагрев проводить 20 минут.

- 6 Найти по графику для всех трех значений разности температур T разность времени нагревания калориметра с телом и пустого калориметра.

- 7 Построить график зависимости по типу рисунка 8.1.

- 8 Рассчитать по формуле теплоемкость тела, а затем и удельную теплоемкость тела.

$$c_T = \frac{C_T}{m}.$$

- 9 Рассчитать молярную теплоемкость по формуле

$$C_p = \mu C_T,$$

где M – атомная масса вещества (для одних и тех же веществ атомная и молярная масса совпадают), C_T – удельная теплоемкость тела.
10. Определить основные источники погрешности данного метода измерения.

Таблица 8.1 – Данные измерений

	I	U	τ	n	ΔT	m	μ	C_T	C_v
	A	B	c	дел	$^{\circ}\text{C}$	кг	$\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{K}}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Калориметр			0						
			2						
			:						
			22						
Калориметр исследуемое тело									

Тема 9 Фазовые превращения

1. Понятие фазы и примеры фазовых превращений
2. Условие равновесия фаз химически однородного вещества
3. Уравнение Клапейрона – Клаузиуса
4. Фазовые переходы первого и второго рода

Основные понятия по теме

Фазовый переход первого рода – фазовое превращение, сопровождающееся поглощением или выделением некоторого количества теплоты и изменением удельного объема, температура перехода остается постоянной и зависит от давления.

Удельной теплотой плавления называется количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг тела, чтобы его расплавить при температуре плавления

$$\lambda = \frac{Q}{m}$$

Количество теплоты, которое пойдет на нагревание, плавление и кристаллизацию, можно вывести из уравнения теплового баланса. Данный метод определения удельной теплоты плавления основан на построении графика зависимости температуры остывающего олова от времени $T = f(t)$. Этот график представлен на рисунке 9.1

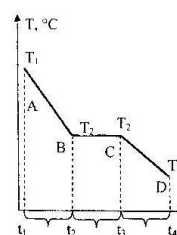


Рисунок 9.1 – График охлаждения металла $T=f(t)$

Участок AB соответствует остыванию жидкого олова до начала кристаллизации, участок BC соответствует кристаллизации олова и CD – охлаждению твердого олова.

Количество теплоты q_1 , отдаваемое в среднем в единицу времени жидким оловом вместе с тиглем, при остывании равно:

$$q_1 = \frac{Q_1}{t_2 - t_1} = (c_1 m_1 + c_2 m_2) \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1}, \quad (9.1)$$

где $c_1 = 266 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – удельная теплоемкость жидкого олова;

m_1 – масса олова, $c_2 = 469 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – удельная теплоемкость тигля;

m_2 – масса тигля.

При остывании твердого олова в единицу времени отдаётся количество теплоты q_2 :

$$q_2 = \frac{Q_2}{t_4 - t_3} = (c_1' m_1 + c_2 m_2) \frac{T_3 - T_4}{t_4 - t_3}, \quad (9.2)$$

где $c_1' = 246 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ – удельная теплоемкость твердого олова.

Количество теплоты, израсходованное в единицу времени на кристаллизацию, q_3 равно:

$$q_3 = \frac{Q_3}{t_3 - t_2} = \frac{\lambda m_1}{t_3 - t_2}, \quad (9.3)$$

где λ – удельная теплота плавления (кристаллизации).

Величина q_3 может быть определена как среднее арифметическое между q_1 и q_2 :

$$q_3 = \frac{q_1 + q_2}{2}. \quad (9.4)$$

Подставляем значения q_1 , q_2 и q_3 из уравнений (9.1), (9.2), (9.3):

$$\frac{\lambda m_1}{t_3 - t_2} = (c_1 m_1 + c_2 m_2) \frac{T_1 - T_2}{2(t_2 - t_1)} + (c_1' m_1 + c_2 m_2) \frac{T_3 - T_4}{2(t_4 - t_3)}. \quad (9.5)$$

Пусть $t_3 - t_2 = t_2 - t_1 = t_4 - t_3$, тогда

$$\lambda = \frac{1}{2m_1} [(c_1 m_1 + c_2 m_2)(T_1 - T_2) + (c_1' m_1 + c_2 m_2)(T_3 - T_4)]. \quad (9.6)$$

Вопросы для самоконтроля

1. Что называется удельной теплотой плавления?

2. Какой вид будет иметь кривая (рисунок 9.1) для переохлажденного олова?

3. Как изменится период времени $t_3 - t_2$ с уменьшением температуры среды, окружающей тигель с оловом?

4. Объясните, почему $q_3 = \frac{1}{2}(q_1 + q_2)$?

Лабораторная работа 13

Определение удельной теплоты плавления металла.

Цель работы: определение удельной теплоты плавления и приращения энтропии при фазовом переходе первого рода на примере плавления олова.

Материалы и оборудование: установка, весы, термометр, олово, гальванометр М 1105, весы.

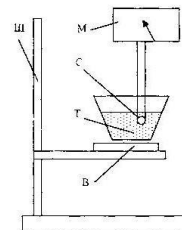


Рисунок 9.2 – Установка для определения удельной теплоты плавления металла

Описание установки

Установка состоит из штатива Ш, столика B, с керамической прокладкой, на который ставится тигель T с расплавленным и нагретым оловом. Термометр C вводится в жидкий металл. Показания снимаются по миллиамперметру M. Используя градуировочный график термометра, определяют температуру металла.

Ход работы

- 1 Взвесить массу олова m_1 и массу тигля m_2 .
- 2 Поместить тигель T с оловом на электроплитку. Включить электроплитку.
- 3 Разогреть олово до жидкого состояния $\approx 250^\circ\text{C}$. Затем специальными щипцами осторожно перенести тигель с нагретым оловом на столик B , устланный керамической прокладкой, и осторожно опустить термометр в расплавленный металл.
- 4 Через каждые 20 секунд записывать показания гальванометра. Измерения производить до 110°C (по градуировочному графику термометра для данной лабораторной работы, определить, какое показание гальванометра соответствует указанной температуре).
- 5 Построить график зависимости температуры остывания олова от времени $T=f(t)$.
- 6 Определить из графика температуры T_1 , T_2 и T_3 , соответствующие точкам A , B , C и D .
- 7 Вычислить удельную теплоту плавления λ по формуле (9.6).

8 Результаты измерений занести в таблицу 9.1

Примечание: Необходимо, чтобы участки AB , BC и CD соответствовали одинаковой разности времени. Некоторые данные таблицы 9.2 необходимы для выполнения работы.

Таблица 9.1 – Данные измерений

Номер опыта	Время $t, \text{с}$	Показания гальванометра n	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Средняя температура $T_{\text{ср}}, ^\circ\text{C}$	Удельная теплота плавления $\lambda, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Таблица 9.2 – Табличные данные, необходимые для выполнения работы

Удельная теплоемкость жидкого олова	c'	$0,243 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$
Удельная теплоемкость кристаллического олова	c''	$0,225 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$
Удельная теплоемкость железа	c	$0,469 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$
Удельная теплота плавления олова	λ	$58,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$

Тема 10 Процессы переноса

- 1 Общее уравнение процессов переноса
- 2 Причина процессов переноса
- 3 Вязкость жидкостей и газов
- 4 Теплопроводность газов и твердых тел

Основные понятия по теме

При движении жидкости между ее слоями возникают силы внутреннего трения, действующие таким образом, чтобы уравнивать скорости всех слоев. Природа этих сил заключается в том, что слои движущиеся с разными скоростями, обмениваются молекулами. Молекулы из более быстрого слоя передают более медленному некоторый импульс, вследствие чего последний начинает двигаться быстрее. Молекулы из более медленного слоя получают в быстром слое некоторый импульс, что приводит к его торможению.

Сила внутреннего трения (вязкость), действующая между двумя слоями, пропорциональна площади их соприкосновения и градиенту скорости

$$F = \eta \frac{dv}{dx} \Delta S \quad (10.1)$$

Величина η называется **коэффициентом внутреннего трения** или **коэффициентом динамической вязкости**.

Коэффициент динамической вязкости зависит от природы жидкости, и для данной жидкости с повышением температуры вязкость уменьшается. Вязкость играет существенную роль при движении жидкостей. Слой жидкости, непосредственно прилегающий к твердой поверхности, в результате прилипания останется неподвижным относительно нее. Скорость остальных слоев возрастает по мере удаления от твердой поверхности. Наличие слоя жидкости между трущимися поверхностями твердых тел способствует уменьшению коэффициента вязкости. Наряду с коэффициентом динамической вязкости η часто употребляют **коэффициент кинематической вязкости**:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (10.2)$$

где ρ — плотность жидкости.

Коэффициент вязкости можно определить по методу Стокса, который состоит в том, что берется цилиндрический сосуд, заполняется вязкой жидкостью, и в него опускается металлический шарик.

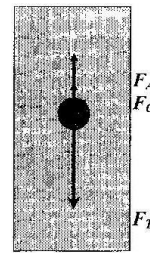


Рисунок 10.1 — Силы, действующие на шарик, движущийся в жидкости

На шарик, движущийся в жидкости, действуют три силы (рисунок 10.1): сила тяжести $F_T = mg = \rho V g$, сила Архимеда $F_A = \rho V g$ и сила сопротивления со стороны жидкости $F_c = 6\pi\eta r v$, согласно закону Стокса. На основании второго закона Ньютона имеем

$$m \frac{dv}{dt} = \rho V g - \rho V g - 6\pi\eta r v, \quad (10.3)$$

где ρ — плотность материала шарика, ρ — плотность жидкости, r — радиус шарика, v — скорость падения шарика.

Решением полученного уравнения является:

$$v = \frac{Vg(\rho - \rho_f)}{6\pi\eta r} \left[1 - e^{-\frac{6\pi\eta r}{m} t} \right]. \quad (10.4)$$

Поскольку с течением времени величина $e^{-\frac{6\pi\eta r}{m} t}$ очень быстро убывает, то скорость шарика вначале возрастает, но через малый промежуток времени становится величиной равной

$$v_0 = \frac{Vg(\rho - \rho_f)}{6\pi\eta r}, \quad (10.5)$$

где $V = \frac{4}{3}\pi r^3$ — объем шарика.

Скорость шарика можно определить, зная расстояние l между метками на сосуде и время t , за которое шарик пройдет это расстояние $v_0 = \frac{l}{t}$.

Тогда из формулы (10.5) следует, что коэффициент вязкости равен:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{(\rho - \rho_0)}{l} t. \quad (10.6)$$

Формула (10.6) справедлива для шарика, падающего в безгранично простирающейся жидкости.

При падении шарика вдоль оси цилиндрического сосуда радиусом R вводится поправочный коэффициент, который учитывает влияние боковых стенок. Поправки в формуле Стокса для такого случая обосновал Ладенбург.

Формула для определения коэффициента вязкости с учетом поправок принимает следующий вид:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{(\rho - \rho_0)}{\left(1 + 2,4 \frac{r}{R}\right) l}. \quad (10.7)$$

Для определения коэффициента вязкости жидкости при стационарном течении жидкости по трубам (капиллярам) используется закон Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4}{8 \eta \ell} \frac{\Delta P}{\tau}, \quad (10.8)$$

где V — объем вытекающей жидкости, ℓ — длина трубы, r — радиус трубы, η — коэффициент вязкости, ΔP — разность давлений на концах трубы, τ — время истечения жидкости.

Так как формула (10.8) справедлива лишь для ламинарного течения, то при измерении вязкости жидкости нужно подбирать вискозиметр с таким капилляром, чтобы движение жидкости в нем было ламинарным. В данной работе удобнее пользоваться формулой Пуазейля для определения относительного коэффициента вязкости. Если вискозиметр наполнить жидкостью (например, водой), коэффициент которой известен и равен η_0 , то жидкости в объеме V вытекают за другое время τ_0 .

Тогда

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta P_0 \tau_0}{8 \eta_0 \ell}. \quad (10.9)$$

Из равенства объемов разных жидкостей можно получить, что

$$\eta = \eta_0 \frac{\tau \Delta P}{\tau_0 \Delta P_0}. \quad (10.10)$$

Если жидкость вытекает под действием силы тяжести, то

$$\frac{\Delta P}{\Delta P_0} = \frac{\rho}{\rho_0}. \quad (10.11)$$

Подставим отношение $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$ в формулу (10.3) и получим, что

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho \tau}{\rho_0 \tau_0}, \quad (10.12)$$

где ρ_0 — плотность воды, $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$, ρ — плотность исследуемой жидкости.

Формулу (10.12) преобразуем:

$$\frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta_0 \tau}{\rho_0 \tau_0} \quad \text{или} \quad \nu = \nu_0 \frac{\tau}{\tau_0}. \quad (10.13)$$

Таким образом, с помощью капиллярного вискозиметра непосредственно измеряется кинематическая вязкость.

Рассмотрим стационарный поток жидкости, ламинарно текущей через капилляр круглого сечения (рисунок 10.2). Мысленно выделим в жидкости цилиндр радиуса r и длины ℓ . Обозначим давление на его торцах через P_1 и P_2 . В случае стационарного течения сила давления на цилиндр $(P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2$ уравновешивается силой трения, действующей на цилиндр со стороны наружных слоев жидкости.

Эта сила равна $F_{\text{тр}} = \eta \frac{\partial v}{\partial r} S$, где S — площадь поверхности цилиндра, η — коэффициент вязкости, $\frac{\partial v}{\partial r}$ — градиент скорости. Подставим

вместо $S = 2\pi r \ell$ и приравняем к нулю сумму сил, действующих на цилиндр, получим $(P_1 - P_2) \pi r^2 + 2\pi r \ell \eta \frac{\partial v}{\partial r} = 0$.

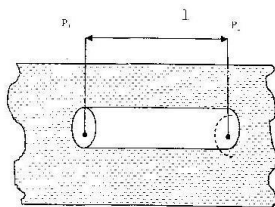


Рисунок 10.2 — К выводу формулы Пуазейля

Проинтегрировав это равенство, найдём $v = -\frac{p_1 - p_2}{4\eta l} r^2 + C$, где C — константа, которая находится из граничных условий. Чтобы найти её, отметим, что скорость жидкости равна нулю при радиусе трубки R , где жидкость прилипает к стенкам. Следовательно, имеем:

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (10.14)$$

Таким образом, скорость v зависит от квадрата радиуса и $v = v_{max}$ при $r=0$.

Расход жидкости Q , то есть объём, ежесекундно протекающей через поперечное сечение трубки, равен:

$$Q = \frac{v}{l} = \int_0^R v \cdot 2\pi r dr = \pi \frac{p_1 - p_2}{8\eta l} R^4. \quad (10.15)$$

Формула (10.15) носит название формулы Пуазейля. Данная формула применима для ламинарного течения жидкости. В реальной жизни мы редко встречаемся с ламинарным течением. Движение воды в водопроводе и в реке, движение воздуха в атмосфере практически всегда оказывается турбулентным. Разделить эти два режима можно, исследуя зависимость расхода от давления. При ламинарном течении Q пропорционально давлению, а при турбулентном — корню квадратному из него. Характер течения жидкости зависит от числа Рейнольдса Re , которое определяется с помощью формулы

$$Re = \frac{vR\rho}{\eta}, \quad (10.16)$$

где v — скорость потока, R — радиус трубки, ρ — плотность жидкости, η — коэффициент вязкости жидкости.

В гладких трубках круглого сечения течение имеет ламинарный характер, если $Re < 1000$.

Ламинарное движение жидкости при переходе её из широкого сосуда в капилляр устанавливается не сразу, а после того, как она пройдет расстояние a .

$$a \approx 0,2 R \cdot Re \quad (10.17)$$

Формула (10.15) даёт нормальные результаты лишь в том случае, если длина капилляра во много раз больше a .

В предлагаемом импульсном методе используется равномерно действующий в течение промежутка времени линейный источник тепла. В результате его действия на изотермической поверхности образца, отстоящей от поверхности источника на расстоянии r_0 , наблюдается температурный максимум. При измерениях регистрируется максимальное повышение температуры (t_{max}), наблюдаемое на выбранной поверхности, и момент ее достижения T_{max} . В простейшем варианте импульсного метода применяется равномерно действующий линейный источник тепла (металлическая проволока) с удельной мощностью

$$g_0 = \frac{W_0}{L_0},$$

где L_0 — длина источника, W_0 — полная мощность источника.

Электрическая мощность W_0 линейного источника определяется по току I и напряжению U на проволоке. Проволока помещается в исследуемый неметаллический материал образца или конструкции. Ввиду сложности вычислений, приведем расчетные формулы, следующие из теории импульсного метода:

$$a = \frac{r_0^2}{4\tau_0} \cdot \varphi_a, \quad \left[\frac{m^2}{c} \right] \quad (10.18)$$

$$\chi = 79,50 \cdot 10^{-3} \frac{I \cdot U}{L_0 \cdot \Delta t_{max}} \cdot \varphi_z, \quad \left[\frac{Дж}{м \cdot c \cdot K} \right] \quad (10.19)$$

$$c = \frac{\chi}{a \cdot \rho}, \quad \left[\frac{Дж}{кг \cdot K} \right]. \quad (10.20)$$

Величины η и α однозначно определяются значениями аргумента (из номограммы)

$$\varphi_0 = \frac{\tau_0}{\tau_{\text{лик}}}, \quad (10.21)$$

Вопросы для самоконтроля

- 1 Какова природа вязкости жидкостей и газов?
- 2 Какова сила внутреннего трения?
- 3 Каков физический смысл коэффициента вязкости?
- 4 Каково течение вязкой жидкости по трубе?
- 5 Выводите формулу Пуазейля.

Лабораторная работа 14

Определение коэффициента вязкости жидкости методом Стокса

Цель работы: определить коэффициент вязкости глицерина, исследовать зависимость коэффициента вязкости от плотности.

Материалы и оборудование: установка Стокса, микроскоп, секундомер, стальные шарики, водный раствор глицерина, глицерин.

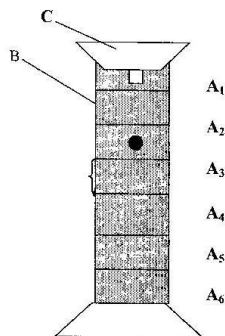


Рисунок 10.3 – Схема установки

Описание установки

Установка для определения коэффициента вязкости по методу Стокса (рисунок 10.3) представляет собой цилиндрический сосуд В, с нанесенными на нем метками $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$, которые отстоят друг от друга на одинаковом расстоянии l . Исследуемую жидкость заливают в сосуд так, чтобы ее уровень был выше верхней метки A_1 на 5–8 см. Сосуд можно поместить в термостат, чтобы изменения температуры не оказывали влияния на исследуемую жидкость. Чтобы шарик упал в цилиндрическом сосуде В по центру, его необходимо ввести с помощью воронки С.

Ход работы

1 С помощью микроскопа определить диаметр шарика, используя формулу $d = cn$, где c – цена деления сетки окуляра ($c = 0,024$ мм при объективе 8 $\times$, окуляре 7 $\times$), n – число делений сетки окуляра, укладывающихся на диаметре шарика.

2 Для работы отобрать 10–11 шариков с одинаковым диаметром.

3 Опустить шарик в жидкость и с помощью двух секундомеров измерить время прохождения расстояния между метками A_1 и A_2, A_2 и A_3, A_3 и A_4, A_4 и A_5, A_5 и A_6, A_6 и A_7 соответственно $t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6$.

4 Определить среднюю скорость движения шарика при прохождении меток A_1 и A_2, A_2 и A_3, A_3 и A_4, A_4 и A_5, A_5 и A_6, A_6 и A_7 соответственно $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$.

5 Определить по формуле (10.6) коэффициент вязкости η для каждого шарика, вычислив среднюю скорость прохождения шариком расстояния от метки A_1 до метки A_7 . Использовать экспериментальные данные только тех опытов, для которых $v_1 = v_2 = v_3 = v_4 = v_5 = v_6$, т.е. когда шарик движется в жидкости равномерно.

6 Измерить коэффициент вязкости с другими жидкостями разной плотности и построить график зависимости $\eta = f(\rho)$ где ρ – плотности жидкостей.

7 Произвести математическую обработку результатов измерений, результаты измерений занести в таблицы 10.1, 10.2.

8 Сделать выводы относительно зависимости коэффициента вязкости от температуры.

Таблица 10.1 – Результаты измерений

Номер опыта	n дел.	d м	τ м

Таблица 10.2 – Результаты измерений

Диаметр шарика $r_1, 10^3$ м	$t_i, i=1,2,3,\dots,7$ с	$v_i, i=1,2,3,\dots,7$ м/с	$\bar{v}, \frac{m}{c}$	$\eta, \frac{kg}{mc}$	$\bar{\eta}, \frac{kg}{mc}$	$\Delta\eta, \frac{kg}{mc}$

Некоторые исходные величины

$\rho = 2,72 \text{ г/см}^3$ (перевести в единицы системы СИ: кг/м^3);
 $\rho_1 = 1,26 \text{ г/см}^3$ для мензурки 1 (перевести в ед. системы СИ: кг/м^3);
 $\rho_2 = 1,197 \text{ г/см}^3$ для мензурки 2;
 $g = 9,81 \text{ м/с}^2$
 $R = 3,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ для мензурки 1;
 $c = 0,024 \text{ мм}$ (для окуляра 7^я объектива 8^я);
 $l = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ для мензурки 1;
 $l = 8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ для мензурки 2.

Лабораторная работа 15

Изучение температурной зависимости коэффициента вязкости вискозиметром Оствальда-Пинцевича

Цель работы: определить коэффициент внутреннего трения исследуемой жидкости и изучить зависимость коэффициента вязкости от температуры.

Материалы и оборудование: вискозиметр Оствальда-Пинцевича, термостат, секундомер, исследуемые жидкости.

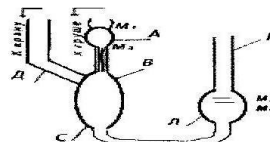


Рисунок 10.4 – Схема вискозиметра

Описание установки

Установка состоит из термостата, термометра и съемного вискозиметра. Вискозиметр типа ВПЖ-1 с «висячим» уровнем (рисунок 10.4) имеет измерительный резервуар A, ограниченный метками M_1 и M_2 . Этот резервуар переходит в капилляр B и резервуар C, который соединен с изогнутой трубкой D, краном и трубкой K. Трубка K имеет резервуар L с двумя метками M_3 и M_4 , указывающими пределы наполнения вискозиметра жидкостью. Жидкость из резервуара A по стенкам капилляра B стекает в резервуар C, образуя у нижнего конца капилляра B «Висячий уровень».

Ход работы

Упражнение 1 Определение коэффициента вязкости исследуемой жидкости

- 1 Промыть вискозиметр водой и просушить.
- 2 В трубку K залить дистиллированную воду, чтобы ее уровень находился между метками M_2 и M_4 . Краном закрыть трубку D .
- 3 С помощью насоса заполнить резервуар A водой выше метки M_1 .
- 4 Открыть кран и наблюдать за истечением воды. Когда вода достигнет метки M_1 , включить секундомер и измерить время истечения воды до метки M_2 . При этом необходимо следить, чтобы в капилляре не было пузырьков воздуха.
- 5 Затем вылить воду из вискозиметра и заполнить его исследуемой жидкостью и измерить время истечения τ исследуемой жидкости.
- 6 Измерения провести 5–7 раз для разных концентраций жидкости.
- 7 Определить коэффициент вязкости по формуле (10.6).
- 8 Построить график зависимости $\nu = f(\tau)$.
- 9 Взять жидкость известной вязкости, определить ее время истечения τ и по графику определить коэффициент кинематической вязкости ν .

Таблица 10.3 – Данные измерений

Номер опыта	$t, ^\circ\text{C}$	Дистиллированная вода			Исследуемая жидкость				
		t_0, C	$\rho_0, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\eta_0, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\eta, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$\bar{\eta}, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$\Delta\eta, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$
1									
2									
3									

Упражнение 2 Исследование температурной зависимости коэффициента вязкости

- 1 Заполнить резервуар (термостат) водой с температурой 80°C .
- 2 При остывании воды в резервуаре на 5°C каждый раз измерять τ_0 .
- 3 Затем вылить из вискозиметра воду и налить исследуемую жидкость определенной плотности. Измерить через каждые 5°C остывания воды в резервуаре время истечения жидкости τ .
- 4 Построить график зависимости кинематической вязкости от температуры $\nu = f(t)$.

Таблица 10.4 – Данные измерений

Номер опыта	$t, ^\circ\text{C}$	t_0, C	$\rho_0, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$\eta_0, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$\bar{\eta}, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$\Delta\eta_0, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$

Упражнение 3 Исследование зависимости коэффициента вязкости водного раствора CuSO_4 от плотности

- П.п. 2 – 4 упражнения 1 выполнить для растворов имеющих концентрации 4 %, 8 %, 12 %, 16 %, 20 %. Измерения для каждой концентрации проводить не менее трех раз.
- Определить коэффициент вязкости по формуле (10.6) для заданных концентраций растворов, η_4 , η_8 , η_{12} , η_{16} , η_{20} .
- Построить график зависимости коэффициента вязкости от его плотности $\eta = f(\rho)$.
- Провести опыт с раствором неизвестной концентрации X %. По формуле (10.6) рассчитать коэффициент вязкости η_x .
- Из построенного графика $\eta = f(\rho)$ по полученному значению η_x определить плотность раствора ρ , и его концентрацию X %.
- Произвести математическую обработку результатов измерений. Полученные данные измерений занести в таблицу 10.5.

Таблица 10.5 – Данные измерений

Номер опыта	$t, ^\circ\text{C}$	Водный раствор CuSO_4											
		4 %		8 %		12 %		16 %		20 %		X %	
		t_4 с	η_4 $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	t_8 с	η_8 $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	t_{12} с	η_{12} $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	t_{16} с	η_{16} $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	t_{20} с	η_{20} $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	t_x с	η_x $\frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$
1													
2													

Лабораторная работа 16
Определение коэффициента вязкости жидкости по скорости истечения через капилляр

Цель работы: изучить условия ламинарного течения жидкости и определить коэффициент вязкости воды.

Материалы и оборудование: сосуд Мариотта, капиллярная трубка, мензурка, секундомер, стакан.

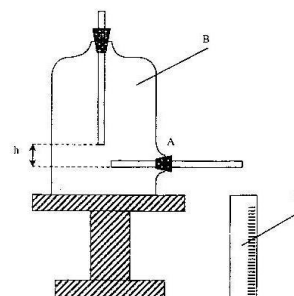


Рисунок 10.5 – Схема установки для определения вязкости воды

Описание установки

Установка для измерения вязкости воды изображена на рисунке 10.5. Вода заполняет сосуд Мариотта и вытекает через капиллярную трубку A, установленную в нижней части его боковой стенки. Сосуд Мариотта позволяет поддерживать постоянным перепад давления $P_1 - P_2$ на концах капилляра. Величина разности давления определяется высотой столба h жидкости между капилляром и нижним концом вертикальной трубки B, вставленной в сосуд Мариотта.

Объем вытекшей жидкости измеряется мензуркой П. Время истечения жидкости определяется по секундомеру.

Ход работы

1 Вставьте капиллярную трубку в боковое отверстие A сосуда Мариотта, уплотнив соединение резиновой пробкой. Закройте капиллярную трубку резиновой пробкой C и налейте в сосуд дистиллиро-

ванную воду, плотно закрыв горловину сосуда Δ погруженной в нее трубкой B .

2 Снимите с капиллярной трубки пробку C . При этом вода начнет вытекать в химический стакан Π . Подождите, пока на нижнем конце трубки B не появятся пузырьки воздуха. После этого в сосуде установится нужное распределение давления.

3 Измерьте по секундомеру время t , в течение которого мензурка наполнится до объема $20 - 25 \text{ см}^3$. Повторите измерение и убедитесь, что время t не зависит от уровня воды в сосуде Мариотта, а определяется глубиной погружения трубки B . Закройте капилляр пробкой C .

4 Разность давлений $\Delta P = P_1 - P_2$ между концами капилляра, выраженная в миллиметрах водяного столба, не равна h , а содержит поправку Δh , обусловленную силами поверхностного натяжения. Высоту Δh можно измерить следующим образом. Постепенно опуская трубку B , оставьте её на такой высоте Δh , при которой вода перестает вытекать из капилляра. Это значит, что давление столба воды Δh между капилляром и нижним торцом трубки B уравновесилось силами поверхностного натяжения пузырька, возникшего на конце трубки B .

5 Поднимите трубку B настолько, чтобы высота h была в 2–3 раза больше Δh , и определите время Δt , за которое через капилляр вытекает $V = 20 - 25 \text{ см}^3$ воды. Измерьте высоту h . Тогда $\Delta P = P_1 - P_2 = \rho(h - \Delta h)g$. Измерьте расход воды при 4–5 значениях h , вплоть до максимального.

6 Проверьте при помощи формулы (10.3), что в каждом из опытов в капилляре устанавливалось ламинарное течение. По формуле (10.4) найдите длину a участка капилляра, на котором устанавливается ламинарное течение. Для оценки числа Re и a можно предварительно принять, что вязкость воды $\eta = 0,01 \text{ П (Пуаза)}$.

7 Постройте график зависимости $Q = \frac{V}{t}$ от h . Формула (10.2) показывает, что при ламинарном течении зависимость между h и Q линейна. Определить коэффициент вязкости по наклону прямой

$$\text{tg } \alpha = \eta = \frac{\Delta h}{\Delta Q}.$$

Оцените погрешность полученного результата.

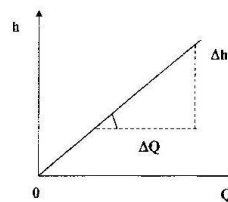


Рисунок 10.6 – График зависимости $Q(h)$

Лабораторная работа 17

Определение теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости неметаллических материалов

Цель работы: изучить импульсный метод определения теплопроводности, температуропроводности и теплоемкости.

Материалы и оборудование: линейный источник тепла, прибор питания источника тепла, гальванометр, термометр, секундомер, образец.

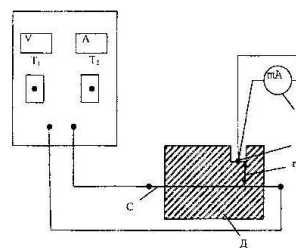


Рисунок 10.7 – Схема установки

Описание установки

Схема установки изображена на рисунке 10.7. Пузыль A осуществляет питание линейного источника тепла C . В отверстие образца D помещается термопара E , служащая для регистрации температурного максимума. Свободные концы термопары подсоединены к гальванометру F . Винтом B осуществляется корректировка нулевого положения указателя гальванометра («светового зайчика»). Переключатель H служит для выбора предела измерений и арретировки прибора в нерабочее состояние.

При теоретическом решении задачи, источник тепла принимается бесконечно тонким и бесконечной длины. Реальный источник тепла, как при стационарных, так и при нестационарных режимах всегда имеет конечные размеры, поэтому часть выделенного тепла теряется через концы, что вносит ошибку в результаты опыта. Расчет показывает, что в этих условиях нужно принять длину нагревательной нити порядка не менее 30 мм и диаметр нити около $0,1\text{ мм}$.

Ход работы

1 Включить осветитель гальванометра и снять переключателем пределов измерения гальванометра H с арретира. Установив переключатель предела измерений в положение $\times 10$, или $\times 1$ и выдержав термопару при комнатной температуре вне образца 2–3 мин, не касаясь ее руками, установить ноль гальванометра. Ноль гальванометра устанавливается только один раз перед началом серии опытов. Вследствие этих действий он соотносится с комнатной температурой.

2 Поместить термопару в отверстие образца D до упора.

3 Включить в сеть прибор A (тумблер T_1 в положение BK/L).

4 Тумблером T_2 включить нагреватель (тумблер $T_2 - BK/L$) и одновременно включить секундомер, на время T_0 — до момента начала показаний гальванометра. При этом необходимо зарегистрировать показания амперметра и вольтметра на пульте A .

5 С момента начала показаний гальванометра выключить нагреватель (тумблер $T_2 - Bb/K/L$) и одновременно включить секундомер.

Измерить время T_{max} , которое пройдет с момента выключения нагревателя до момента достижения максимального отклонения указателя гальванометра.

6 Результаты измерений занести в таблицу 10.6, проделав опыт (п.п. 2–5) не менее 3–5 раз. Повторные измерения проводить после того, как установится ноль гальванометра, для этого необходимо выждать 15–20 минут. На это время гальванометр необходимо заарретировать и отключить от сети.

Таблица 10.6 — Данные измерений

T_0	T_{max}	φ_0	n	ΔT_{max}	I	U	α	$\Delta \alpha$	χ	$\Delta \chi$	C	ΔC
с	с		дел	°C	A	B	$\frac{M}{C^2}$		$\frac{Дж}{м \cdot C \cdot K}$		$\frac{Дж}{кг \cdot K}$	

7 По максимальному показанию гальванометра n и градуировочному графику хромель-копелевой термопары определить ΔT_{max} — повышение температуры на поверхности образца, лежащей на заданном расстоянии r_0 , вследствие действия линейного источника тепла.

8 Рассчитать φ_0 по формуле (10.4) из номограммы*, определить φ_0 и φ_L .

9 По формулам (10.1), (10.2), (10.3) рассчитать α , χ , c (коэффициент температуропроводности, теплопроводности, удельную теплоемкость соответственно) в требуемых единицах измерений.

10 Произвести математическую обработку результатов измерений.

Некоторые исходные данные:

$$\rho = 1810 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}, \quad r = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad L_0 = 0,3 \text{ м}.$$

*Номограмма – чертеж, являющийся особым изображением функциональной зависимости. Основное назначение – служить средством для вычислений. Номограммы применяются в инженерных расчетах, играя роль специализированных счетных приспособлений.

Классификация номограмм: из выровненных точек, сетчатые, транспарантные; для уравнений с двумя переменными применяются двойные шкалы.

Номография – раздел математики, объединяющий теорию и практические методы построения.

Тема 11 Тепловое расширение твердых и жидких тел

- 1 Причины теплового расширения твердых тел
- 2 Объемные свойства жидкостей

Основные понятия по теме

Равновесное макроскопическое состояние твердого тела определяется не только нормальным механическим напряжением σ и относительным удлинением ϵ , но и температурой ΔT . При одноосном растяжении с одновременным нагреванием уравнение состояния твердого тела может быть записано в виде:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha \Delta t,$$

где E – модуль Юнга, α – температурный коэффициент теплового расширения.

Величина $\frac{\sigma}{E}$ определяет деформацию одноосного растяжения (закон Гука), $\alpha \Delta t$ – удлинение при нагревании на Δt градусов.

Если $\sigma = 0$, то $\epsilon = \alpha \Delta t$.

Все твердые тела при охлаждении и нагревании изменяют свои размеры. Как правило, с повышением температуры размеры тел увеличиваются, т.е. $\alpha > 0$.

При нагревании тела имеющего первоначальную длину ℓ , его относительное удлинение пропорционально изменению температуры dt :

$$\frac{d\ell}{\ell} = \alpha dt, \quad (11.1)$$

где α – коэффициент линейного расширения ($\alpha \ll 1$).

Коэффициент линейного расширения определяет относительное удлинение тела при изменении температуры на один градус.

Длина тела при любой температуре может быть выражена через длину 0°C . Из определения коэффициента линейного расширения следует, что

$$\ell = \ell_0 (1 + \alpha t). \quad (11.2)$$

В результате линейного расширения увеличивается объем тела. Рассмотрим тело в виде куба с ребром ℓ . Первоначальный его объем при 0°C будет $V_0 = \ell^3$. Очевидно, что при температуре t объем тела будет равным

$$V = V_0(1 + \alpha t) = V_0(1 + \alpha t)^3.$$

Возводя $(1 + \alpha t)$ в куб и пренебрегая членами, содержащими α^2, α^3 (ввиду их малости), получим:

$$V = V_0(1 + 3\alpha t) = V_0(1 + \beta t),$$

где $\beta = 3\alpha$ — средний коэффициент объемного расширения. Истинный коэффициент объемного расширения равен

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}. \quad (11.3)$$

Для анизотропных кристаллов коэффициент линейного расширения различен для разных направлений, поэтому при изменении температуры кристалл не остается подобным самому себе.

Изменение объема тела при изменении его температуры количественно может быть охарактеризовано с помощью коэффициента объемного расширения.

Истинный коэффициент объемного расширения не является величиной постоянной. Для многих тел он растет с увеличением температуры. Однако, эти изменения в небольшом интервале температур незначительны, поэтому тепловые свойства тел с достаточной точностью могут быть описаны с помощью среднего коэффициента объемного расширения.

Если при температуре t_1 тело имело объем V_1 , а при температуре t_2 объем его стал V_2 , то, считая, что изменение объема с изменением температуры происходит равномерно, можно ввести понятие среднего коэффициента объемного расширения по формуле:

$$\frac{V_2 - V_1}{V_1} = \beta (t_2 - t_1). \quad (11.4)$$

Опытное определение коэффициента объемного расширения встречает затруднения, связанные с тем, что при изменении температуры жидкости изменяется и объем сосуда, в котором находится жидкость.

Долонг и Пти предложили метод, позволяющий определить средний коэффициент объемного расширения без учета расширения сосуда. Он основан на условии равновесия жидкости в сообщающихся сосудах.

Как известно, разнородные жидкости, налитые в сообщающиеся сосуды, будут находиться в равновесии в том случае, когда высоты их столбов h_1 и h_2 обратно пропорциональны их плотностям ρ_1 и ρ_2 , то есть

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (11.5)$$

Это состояние не зависит от формы и емкости сосудов, если они достаточно широки для того, чтобы можно было пренебречь капиллярными явлениями.

Если один из сообщающихся сосудов, содержащих однородную жидкость, нагреть, то в результате расширения плотность ее станет меньше, чем плотность жидкости в другом сосуде. Следовательно, высоты столбов жидкости в сосудах окажутся разными и станут удовлетворять соотношению (11.3).

Пусть за начальную температуру жидкости взят 0°C . Обозначим объем жидкости при этой температуре через V_0 , тогда объем при некоторой температуре t может быть найден из формулы (11.2):

$$V_t = V_0(1 + \beta t). \quad (11.6)$$

Плотность вещества $\rho = \frac{m}{V}$, тогда $\frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}$. Разделив обе части равенства (10.4) на m , получим:

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \beta t}. \quad (11.7)$$

Таким образом, плотность вещества при некоторой температуре t связана с плотностью этого же вещества при температуре 0°C соотношением (11.5).

Пусть температуры холодной и нагретой жидкостей t_1 и t_2 , высоты столбов h_1 и h_2 , тогда учитывая (11.3) и (11.5), получим:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{1 + \beta t_2}{1 + \beta t_1}.$$

Откуда

$$\beta = \frac{h_2 - h_1}{h_1 t_2 - h_2 t_1}. \quad (11.8)$$

Из формулы (11.8) видно, что средний коэффициент объемного расширения β можно вычислить, зная высоты столбов жидкости в холодном и нагретом сосудах и температуры жидкостей в них.

Вопросы для самоконтроля

- 1 Как объяснить с точки зрения молекулярно-кинетической теории тепловое расширение тел?
- 2 В каких единицах измеряются коэффициенты линейного и объемного расширения?
- 3 Выведите строгую формулу зависимости линейных размеров тела от температуры путем интегрирования уравнения (11.1).

Лабораторная работа 18

Определение температурного коэффициента линейного расширения металлов

Цель работы: измерение температурного коэффициента линейного расширения металлических стержней в определенном интервале температур.

Материалы и оборудование: прибор для определения коэффициента линейного расширения твердых тел, термopара хромель-алюмель, штангенциркуль, исследуемые образцы, многопредельный миллиампермилливольтметр М 2020.

Описание установки

Прибор для определения коэффициента линейного расширения твердых тел изображен на рисунке 11.1. Исследуемый образец *С*, имеющий вид стержня, нагревается в воде, находящейся в стеклянной пробирке *П*. Для нагревания служит нагреватель *Н*, который включается с помощью кнопочного выключателя *Д*, расположенного на панели корпуса прибора. Здесь же расположена контрольная индикаторная лампа нагревателя *Л*. Штепсельная вилка включается в электрическую сеть с напряжением 220 В. Изменение длины образца при нагревании по сравнению с его начальной длиной фиксируется с помощью индикатора часового типа *И*. Индикатор часового типа крепится на кронштейне *К* и может поворачиваться вокруг оси на 90° . Для фиксации индикатора на кронштейне служат фиксаторы *Ф*. Измерение температуры воды в пробирке *П* осуществляется с помощью термopары хромель-алюмель *Т*, подключенной через клеммную колодку к миллиампермилливольтметру М 2020.

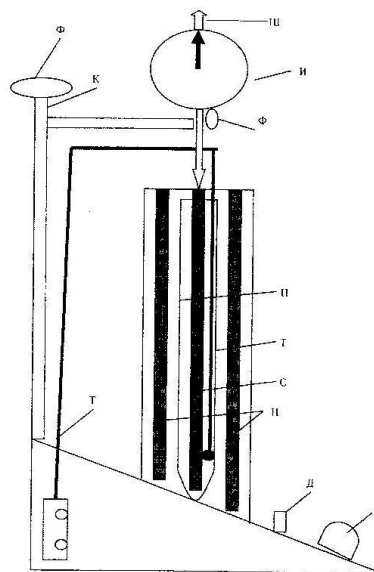


Рисунок 11.1 -- Установка для определения коэффициента линейного расширения твердых тел

Ход работы

- 1 Измерить штангенциркулем начальную длину стержня l_0 , при комнатной температуре t_0 .

2 Пробирку на 2/3 объема заполнить водой и опустить в нее образец так, чтобы сферический конец образца упирался в дно пробирки.

3 Установить индикатор на крайней в таком положении, чтобы верхний конец образца находился в пределах вертикального хода штока индикатора, и зафиксировать его фиксатором Ф.

4 Плавным оттянуть шток индикатора вверх, установить индикатор над пробиркой и опустить шток в углубление на торце образца, осторожно перемещая индикатор в горизонтальной плоскости установить образец вертикально. Зафиксировать положение индикатора фиксатором.

5 Поворотом шкалы индикатора совместить нуль шкалы со стрелкой.

6 Осторожно поместить спай термопары в пробирку так, чтобы она не касалась образца. При этом термопару соединить с миллиампермилливольтметром М 2020 (предел измерений установить на 0,15 мА).

7 Произвести измерения длины образцов через каждые 10° , начиная от комнатной температуры вплоть до кипения воды в пробирке.

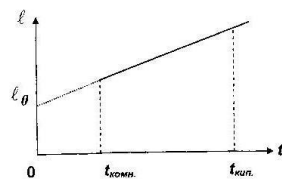


Рисунок 11.2 - График зависимости длины образца от температуры $l = f(t)$

8 Построить график зависимости длины от температуры для каждого образца $l = f(t)$ (рисунок 11.2) и методом экстраполяции определить длину тела l_0 при 0°C .

9 Величину коэффициента линейного расширения определить по формуле $\alpha = \frac{l - l_0}{l_0 \Delta t}$.

10 Результаты измерений занести в таблицу 11.1 либо в таблицу 11.2.

11 Произвести математическую обработку результатов измерения.

Таблица 11.1 – Данные измерений

Исследуемый материал (сталь, алюминий)	Число делений миллиампервольметра, п. дел.	$t, ^\circ\text{C}$	Число делений индикатора, п. дел.	$l, \cdot 10^{-3} \text{ м}$	$l, \text{ м}$	$l_0, \text{ м}$	$\alpha, \text{ К}^{-1}$	$\bar{\alpha}, \text{ К}^{-1}$
1								
2								
3								
4								

Таблица 11.2 – Данные измерений

Исследуемый материал (сталь, алюминий)	$l_1, \text{ м}$	Число делений п	$\Delta l, 10^{-3} \text{ м}$	$l_2, \text{ м}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\alpha, \text{ К}^{-1}$	$\bar{\alpha}, \text{ К}^{-1}$
1								
2								
3								
4								

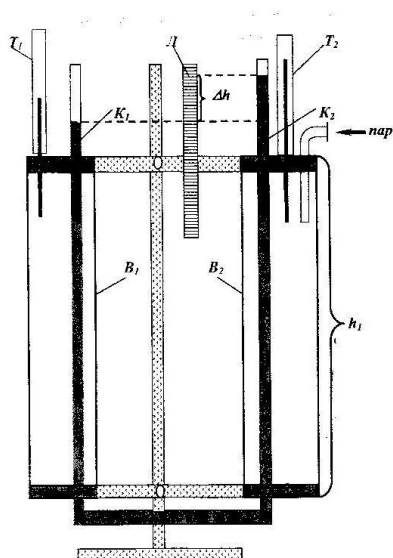


Рисунок 11.3 – Схематичное изображение установки Дюлонга и Пти для определения среднего коэффициента объемного расширения жидкостей

Содержание

Введение	4
Тема 1 Идеальный газ и его законы.....	5
Тема 2 Закон Максвелла.....	12
Тема 3 Кинстические характеристики движения молекул.....	17
Тема 4 Первое начало термодинамики	22
Тема 5 Второе начало термодинамики, энтропия.....	31
Тема 6 Поверхностные явления	39
Тема 7 Симметрия твердых тел	56
Тема 8 Теплоемкость твердых тел	72
Тема 9 Фазовые превращения	77
Тема 10 Процессы переноса	82
Тема 11 Тепловое расширение твердых и жидких тел.....	100
Литература	111

Практическое пособие ставит своей целью оказание помощи студентам физических специальностей в овладении основными физическими закономерностями молекулярной физики и теплоты и приобретении элементарных навыков экспериментирования.

Не менее существенно создать и закрепить навыки ведения лабораторного журнала, построения графиков и оценки достоверности полученных результатов.

Описания к лабораторным работам начинаются с теоретических сведений по изучаемой теме. Они составлены так, чтобы ясное представление о существе изучаемых явлений и применяемом методе измерений могли себе составить как те студенты, которые уже прослушали этот материал на лекциях, так и те, которые только приступают к изучению соответствующего раздела молекулярной физики.

После теоретических сведений приводятся описания измерительной аппаратуры, обычно довольно подробные. Затем следуют задания, регламентирующие последовательность работы студентов при проведении измерений. Перед тем, как к ним приступить, студенту рекомендуется проделать ряд простых опытов, позволяющих понять особенности исследуемого явления и измерительной аппаратуры, убедиться в ее исправности, оценить надежность результатов. Проведение таких опытов и их описание в отчете мы считаем важнейшей составной частью работы студента. Задания определяют тот необходимый минимум, без выполнения которого работа не может считаться выполненной.

Предлагаемый вариант практического пособия по разделу молекулярной физики курса общей физики соответствует постановке работ в лаборатории молекулярной физики университета.

Литература

- 1 Кикоин, А. К. Молекулярная физика : учеб. пособие для студ. физич. спец. вузов / А. К. Кикоин. — М. : Наука, 1978. — 480 с.
- 2 Сивухин, Д. В. Общий курс физики : в 5 т. Т.2. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. — М. : Наука, 1990. — 591 с.
- 3 Матвеев, А. Н. Курс молекулярной физики : учебн. для физ. спец. вузов / А. Н. Матвеев. — М. : Высшая школа, 1987. — 360 с.
- 4 Ландау, Л. Д. Механика и молекулярная физика / Л. Д. Ландау, А. И. Ахиезер, Е. М. Лившиц. — М. : Наука, 1969. — 287 с.



РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИИ

Учебное издание

Желонкина Тамара Петровна

ОБЩАЯ ФИЗИКА

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПОСОВИЕ

по разделу «Молекулярная физика» для студентов
физических специальностей университета

Редактор В. И. Шкрядова
Корректор В. В. Калугина
Компьютерная верстка В. И. Старокожева

Лицензия № 02330/0133208 от 30.04.04.
Подписано в печать 10.09.08. Формат 60х84 1/16.
Бумага писчая №1. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 6,57.
Уч.- изд. л. 7,06. Тираж 100 экз. Заказ № 6
2160-00

Отпечатано с оригинала-макета на ризографе
учреждения образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»
Лицензия № 02330/0056611 от 16.02.04.
246019, г. Гомель, ул. Советская, 104

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМ. Ф. СКОРИНЫ

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ