

Міністерство освіти та науки України
Львівський національний університет імені Івана Франка

П.М. ЯКІБЧУК, А.В. КОРОЛИШИН

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

Лабораторний практикум

Навчальний посібник

Львів

Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка

2009

УДК 539.1 (076.5)
ББК В36я 73-5
Я45

Рецензенти:

д-р фіз.-мат. наук професор *З.М. Микитюк*
(Національний університет "Львівська політехніка");

д-р фіз.-мат. наук професор *Л.Д. Дідух*
(Тернопільський державний технічний університет імені Івана Пулюя)

д-р фіз.-мат. наук професор *М.А. Рувінський*
(Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника)

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки України
як навчальний посібник для студентів
вищих навчальних закладів
Лист № 14/18-Г-1922 від 18.07.08 р.*

Якібчук П.М., Королишин А.В.

Я45 Молекулярна фізика. Лабораторний практикум. – Львів:
Львівський національний університет імені Івана Франка.
2009. – 130 с.
ISBN 978-966-613-714-5.

У навчальному посібнику описані лабораторні роботи, подані в "Молекулярному практикумі" фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка. Мета практикуму полягає в тому, щоб навчити студента самостійно користуватися основними вимірювальними приладами і познайомитись з методами вимірювань різних фізичних величин, які використовуються в даному розділі фізики.

УДК 539.1 (076.5)
ББК В36я 73-5

© Якібчук П.М., Королишин А. В., 2009
© Львівський національний
університет імені Івана Франка, 2009

ISBN 978-966-613-714-5

ЗМІСТ

Передмова.....	5
ВИМІРЮВАННЯ. ЗАПИС І ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. ОЦІНКА ПОХИБОК	6
1. Математичне опрацювання результатів вимірювань	6
2. Обчислення похибок у разі прямих вимірювань	7
3. Опрацювання результатів у разі непрямих (посередніх) вимірювань.....	8
4. Про приблизні обчислення.....	11
5. Правила заокруглювання у випадку математичних операцій над числами	11
6. Запис результатів.....	13
7. Зображення експериментальних результатів на графіках.....	13
8. Проведення кривих через експериментальні точки.....	17
<i>Лабораторна робота 1.</i> Визначення тиску.....	19
<i>Лабораторна робота 2.</i> Вимірювання температури.....	24
<i>Лабораторна робота 3.</i> Використання рівняння стану ідеального газу для визначення об'єму та густини.....	31
<i>Лабораторна робота 4.</i> Визначення універсальної газової сталої методом відкачування	37
<i>Лабораторна робота 5.</i> Визначення відношення C_p / C_v методом Клемана–Дезорма	40
<i>Лабораторна робота 6.</i> Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул газу	46
<i>Лабораторна робота 7.</i> Визначення коефіцієнта взаємної і водяної пари дифузії повітря.....	51
<i>Лабораторна робота 8.</i> Визначення вологості повітря (за точкою роси)	57
<i>Лабораторна робота 9.</i> Вимірювання вологості повітря психрометром	60
<i>Лабораторна робота 10.</i> Визначення критичного стану речовини	63
<i>Лабораторна робота 11.</i> Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідин методом Стокса.....	67

<i>Лабораторна робота 12.</i>	Визначення та дослідження температурної залежності кінематичної в'язкості рідин за допомогою віскозиметра ВПЖ-12	71
<i>Лабораторна робота 13.</i>	Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом відриву краплі	74
<i>Лабораторна робота 14.</i>	Дослідження залежності коефіцієнта поверхневого натягу від температури і концентрації розчину	77
<i>Лабораторна робота 15.</i>	Визначення питомої теплоємності відносним методом рідин	83
<i>Лабораторна робота 16.</i>	Визначення коефіцієнта об'ємного розширення рідин методом Дюлонга і Пті	86
<i>Лабораторна робота 17.</i>	Визначення питомої теплоємності методом охолодження металів	90
<i>Лабораторна робота 18.</i>	Визначення коефіцієнта термічного розширення твердих тіл	93
<i>Лабораторна робота 19.</i>	Вивчення кристалізації металічних сплавів методом кривих охолодження	97
<i>Лабораторна робота 20.</i>	Вивчення явища кристалізації з розчину	103
<i>Лабораторна робота 21.</i>	Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл відносним методом	106
<i>Лабораторна робота 22.</i>	Дослідження фазових переходів	109
<i>Лабораторна робота 23.</i>	Вивчення статистичних закономірностей в системі багатьох частинок	114
Додатки		121
Список літератури		128

ПЕРЕДМОВА

Молекулярна фізика – це розділ науки, що вивчає фізичні властивості і агрегатні стани тіл в залежності від їх молекулярної будови, сил взаємодії між частинками, які утворюють тіла, і характеру теплового руху цих частинок.

В запропонованому навчальному посібнику описані лабораторні роботи, подані в “Молекулярному практикумі” фізичного факультету Львівського національного університету імені Івана Франка. Мета практикуму полягає в тому, щоб навчити студента самостійно користуватися основними вимірювальними приладами і познайомитись з методами вимірювань різних фізичних величин, які використовуються в даному розділі фізики.

Опис робіт починається з теоретичних відомостей. Вони складені так, щоб студенти, які уже прослухали матеріал на лекціях, і ті, котрі тільки починають вивчення цього розділу фізики мали чітке уявлення про сутність фізичних явищ, що вивчаються, і метод вимірювань, який застосовується в лабораторній роботі.

Після теоретичних відомостей надається опис вимірювальної апаратури. В подальшому наводяться завдання, які регламентують послідовність виконання роботи студентів при проведенні вимірювань. В кінці кожної роботи містяться контрольні питання.

Практикум складений у відповідності до робочої програми з курсу “Молекулярна фізика і термодинаміка”, який викладається студентам природничих факультетів вищих навчальних закладів.

ВИМІРЮВАННЯ. ЗАПИС І ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. ОЦІНКА ПОХИБОК

1. Математичне опрацювання результатів вимірювань

Експериментальна фізика займається вимірюванням фізичних величин і з'ясуванням взаємозалежностей та співвідношень між ними. Тому головним моментом фізичного дослідження є *акт вимірювання*.

Виміряти фізичну величину означає порівняти її з однорідною їй фізичною величиною, прийнятою за одиницю. Наприклад, довжину тіла порівнюють з метром, масу – з кілограмом, тривалість процесу – з секундою тощо.

Вимірювання фізичних величин поділяють на *прямі* і *непрямі* (посередні).

Якість вимірювань визначена їхньою точністю. У разі прямих вимірювань точність дослідів визначають з аналізу точності методу і приладів, а також із повторюваності результатів вимірювань. Точність непрямих (посередніх) вимірювань залежить від надійності даних, які використовують для розрахунку, та від структури формул, які пов'язують ці дані з шуканою величиною.

Під час вимірювань неминуче виникають похибки. Похибки поділяють на *систематичні* та *випадкові*. Окремо розглядають так звані *промахи*, або невдалі вимірювання, які потрібно просто відкинути.

Систематичні похибки виникають унаслідок несправності вимірювального приладу або помилки в методиці вимірювання. Їх можна позбутися, якщо усунути причину виникнення. Надалі будемо вважати, що систематичні похибки у нас не виникатимуть. Зазначмо, що систематичними іноді називають *похибки приладу*.

Випадкові похибки виникають внаслідок різних причин, які неможливо усунути повністю: недосконалість приладу, недосконалість методу вимірювання, органів зору людини і т.п. Випадкові похибки необхідно звести до мінімуму і врахувати після завершення вимірювань фізичної величини.

2. Обчислення похибок у разі прямих вимірювань

Пряме вимірювання виконують справу тоді, коли фізичну величину порівнюють з одиницею (еталоном) безпосередньо за допомогою приладу. Наприклад: вимірювання розмірів тіла штангенциркулем або лінійкою, часу – секундоміром, напруги – вольтметром тощо.

Під час прямого вимірювання можливі два випадки:

1) повторні вимірювання дають різні, але близькі результати;
2) повторні вимірювання дають один і той же результат або умови досліду не дають змоги виконати повторні вимірювання. *В другому випадку похибкою вимірювання треба вважати похибку приладу.*

Нехай у першому випадку вимірювання фізичної величини x дало числа x_1, x_2, \dots, x_n . Зазначимо, що число n рекомендують брати непарним. У найпростішому випадку $n = 3$. Будемо вважати, що найближчим до істинного значення вимірюваної величини є *середнє арифметичне*

$$x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1)$$

Відхилення від середнього $\Delta x_1 = |x_c - x_1|$ назвемо *абсолютною похибкою* першого вимірювання, відповідно, $\Delta x_2 = |x_c - x_2|$ – абсолютною похибкою другого вимірювання і т.д. Величину

$$\Delta x_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (2)$$

назвемо *середньою абсолютною похибкою* вимірювання.

Величина

$$\delta x_c = \frac{\Delta x_c}{x_c}, \text{ або } \delta x_c = \frac{\Delta x_c}{x_c} \cdot 100\% \quad (3)$$

називають *середньою відносною похибкою* вимірювання.

Якість вимірювань звичайно визначена власне відносною, а не абсолютною похибкою. Наприклад, одна й та ж похибка в 1 °С у разі вимірювання температури зірки не суттєва, у випадку вимірювання температури кипіння води може бути більш суттєва, а під час визначення температури тіла хворої людини абсолютно недопустима. Це виникає тому, що відносна похибка вимірювань у трьох випадках є різною.

Похибку приладу $\Delta x_{\text{пр}}$ для електровимірювальних приладів визначають на підставі класу точності приладу або беруть такою, що дорівнює половині найменшої поділки приладу:

$$\Delta x_{\text{пр}} = \frac{(\text{класу точності}) \times (\text{максимальне значення шкали})}{100}. \quad (4)$$

У загальному випадку абсолютна похибка вимірюваної величини

$$\Delta x = \sqrt{\Delta x_{\text{с}}^2 + \Delta x_{\text{пр}}^2}, \quad (5)$$

відносна похибка –

$$\delta x = \frac{\Delta x}{x}, \quad \text{або} \quad \delta x = \frac{\Delta x}{x} \cdot 100\%. \quad (6)$$

3. Опрацювання результатів у разі непрямих (посередніх) вимірювань

На практиці (здебільшого) фізичну величину не вдається виміряти прямим способом. У такому разі використовують співвідношення, за допомогою якого цю величину можна обчислити через значення інших фізичних величин, які можна виміряти прямим способом. Наприклад, молярну масу повітря μ можна виміряти, якщо скористатися рівнянням стану ідеального газу

$$\mu = \frac{RTm}{pV},$$

усі параметри якого, за винятком $R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$, легко виміряти прямим способом і за допомогою попередньої формули обчислити μ . У цьому випадку постає запитання, як знайти абсолютну і відносну похибки величини μ , якщо відомі похибки ΔT , Δp і ΔV . Зазначмо, що в похибку $\Delta \mu$ буде внесена також похибка числа R , яке неможливо визначити точним числом.

Є спосіб, який дає змогу вирішити цю проблему для будь-якого функціонального зв'язку між фізичними величинами. Він ґрунтується на методі диференціального числення, зокрема, на обчисленні повного диференціала (нескінченно малого приросту) функції багатьох змінних.

Нехай маємо функцію

$$f(x, y, z, u, \dots), \quad (7)$$

повний диференціал цієї функції:

$$df = \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_{\substack{y=\text{const} \\ z=\text{const} \\ \dots}} + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_{\substack{x=\text{const} \\ z=\text{const} \\ \dots}} + \dots \quad (8)$$

За допомогою цього виразу одержують формулу для обчислення абсолютної похибки фізичної величини в разі непрямого вимірювання:

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| \Delta x + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| \Delta y + \dots \quad (9)$$

Як бачимо, всі частинні похідні беруть зі знаком плюс, а диференціали змінних замінюють на абсолютні похибки величин, виміряних прямим способом. У такому випадку формула (9) дає максимально можливу похибку величини f .

На практиці зручніше користуватися таб. 1, яка дає правила обчислення похибок Δf і δf у найважливіших випадках.

Зазначимо, що абсолютну похибку Δf зручно обчислювати першою, коли робоча формула є адитивною (додавання і віднімання), а відносну похибку δf - коли формула мультиплікативна (множення, ділення, піднесення до степеня).

Таблиця 1.

Правила обчислення абсолютної та відносної похибок

Формула	Абсолютна похибка Δf	Відносна похибка δf
$f = x + y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\delta f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$f = x - y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\delta f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$f = x \cdot y$	$\Delta f = x\Delta y + y\Delta x$	$\delta f = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} = \delta x + \delta y$
$f = \frac{x}{y}$	$\Delta f = \frac{x\Delta y + y\Delta x}{y^2}$	$\delta f = \frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y} = \delta x + \delta y$
$f = x^n$	$\Delta f = nx^{n-1}\Delta x$	$\delta f = n \frac{\Delta x}{x} = n\delta x$

У робочій формулі для обчислення фізичної величини f можуть бути табличні величини (π , g , k , h , R ...). Вони впливають на значення похибки вимірюваної величини f і тому їхні похибки необхідно враховувати. Абсолютною похибкою таблично заданого значення (якщо вона не зазначена прямо) вважають число, що дорівнює половині одиниці останнього розряду цього значення.

Наприклад, для $\pi = 3,14$ $\Delta\pi = 0,005$; для $\pi = 3,142$ $\Delta\pi = 0,0005$; для $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ $\Delta g = 0,05 \text{ м/с}^2$; для $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ $\Delta g = 0,005 \text{ м/с}^2$.

П р и м і т к а. Іноді під час обчислення відносної похибки спочатку логарифмують вираз, а після цього обчислюють логарифмічну похідну і нарешті – відносну похибку.

4. Про приблизні обчислення

Результатом вимірювання або обчислення є число. Наприклад:

5 м;	0,02 А;	0,003 Тл;	$2 \cdot 10^3$ кг/м ³ ;	10^5 Па
5,0 м;	0,020А;	3,1 мТл;	$2,0 \cdot 10^3$ кг/м ³ ;	$1,0 \cdot 10^5$ Па
5,01 м;	20,3 мА;	3,10 мТл;	$2,04 \cdot 10^3$ кг/м ³ ;	$1,01 \cdot 10^5$ Па

У першому рядку всі числа мають одну значущу цифру, у другому – дві, а в третьому – три значущі цифри. Чим більше значущих цифр має число, тим з більшою точністю виміряна або обчислена фізична величина. Кількість значущих цифр не змінюється в разі переходу від одиниць (метрів) до їхніх кратних часток (сантиметрів, міліметрів, мікрометрів), і навпаки:

$$2,3 \text{ м} = 2,3 \cdot 10^2 \text{ см} = 2,3 \cdot 10^3 \text{ мм} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ мкм.}$$

Значущими цифрами числа називають усі його цифри, крім нулів, розміщені зліва від першої відмінної від нуля цифри.

Для визначення порядку фізичної величини або її оцінки достатньо однієї значущої цифри. Числа з двома значущими цифрами треба вважати результатом грубого вимірювання, а числа з трьома і чотирма значущими цифрами – результатом задовільного вимірювання.

5. Правила заокруглювання у випадку математичних операцій над числами

Обчислення певних фізичних величин особливо якщо їх виконують за допомогою калькуляторів, потребують заокруглення сумарного числа. Необхідна точність розрахунків визначена тим, що розрахунок не повинен вносити у вимірювання додаткової похибки.

Заокруглювання в разі додавання і віднімання всіх чисел виконують до розряду, на одиницю меншого, ніж розряд найменш

точного числа. В результаті потрібно зберігати стільки десяткових знаків, скільки їх у наближеному заданому з найменшою кількістю десяткових знаків:

$$23,2 + 0,442 + 7,247 \approx 23,2 + 0,44 + 7,25 = 30,89 \approx 30,9$$

У результаті множення і ділення потрібно зберігати стільки значущих цифр, скільки їх має наближене задане з найменшою кількістю значущих цифр:

$$30,9 \cdot 1,8364 \approx 30,9 \cdot 1,84 = 56,856 \approx 56,9;$$

$$56,9 : 2,412 \approx 56,9 : 2,41 = 23,609 \approx 23,6$$

У разі піднесення до степеня в результаті потрібно зберігати стільки значущих цифр, скільки їх має число, яке підносять до степеня:

$$(11,38)^2 = 129,5044 \approx 129,5.$$

У випадку знаходження коренів у результаті потрібно зберегти стільки значущих цифр, скільки їх має число, яке стоїть під коренем:

$$\sqrt{2,97} \approx 1,724 \approx 1,72$$

Під час обчислення проміжних результатів потрібно брати на одну цифру більше, ніж задано в заокругленнях у разі виконання математичних дій над числами. В кінцевому підсумку цю “запасну” цифру відкидають:

$$\begin{aligned} \frac{(23,2 + 0,442 + 7,247) \cdot 1,8364}{2,412} &\approx \frac{(23,2 + 0,44 + 7,25) \cdot 1,84}{2,41} \approx \\ &\approx \frac{30,89 \cdot 1,84}{2,41} \approx \frac{56,838}{2,41} \approx 23,58 \approx 23,6. \end{aligned}$$

6. Запис результатів

Результат вимірювань записують у вигляді

$$f = f_{\text{но}} \pm \Delta f, \quad \partial f = \dots$$

Наприклад, запис $m = 0,876 \pm 0,008$ означає, що в результаті вимірювань для маси тіла знайдено значення 0,876 г зі стандартною похибкою 0,008 г.

Похибку треба округлювати до двох значущих цифр, якщо перша з них є одиницею, і до однієї значущої цифри у решті випадків. Наприклад, правильно записувати

$$\pm 3; \pm 0,2; \pm 0,08; \pm 0,14.$$

У записі виміряного значення останньою повинна бути цифра того десяткового розряду, який використовують у разі зазначення похибки. Наприклад, один і той же результат залежно від похибки, може мати вигляд

$$1,2 \pm 0,2; 1,24 \pm 0,03; 1,234 \pm 0,012; 0,900 \pm 0,004 \text{ і т.д.}$$

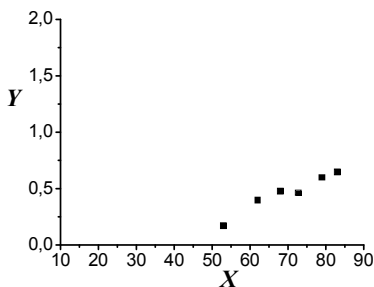
Отже, остання з записаних цифр (чи навіть дві з них, як у передостанньому прикладі) є сумнівною, а решта – достовірними.

7. Зображення експериментальних результатів на графіках

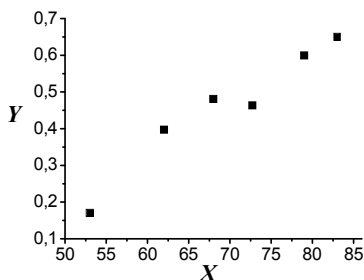
Результати експериментів відображають у вигляді не тільки таблиць, а й графіків. Для графіків ліпше використовувати спеціальний папір, наприклад, міліметровий або в клітинку.

У разі побудови графіків потрібно розумно вибирати масштаб, щоб виміряні точки розташувались на всій площині аркуша. На рис. 1 зображені приклади правильної і неправильно побудови графіків. На лівому (неправильно побудованому) графіку експериментальні точки займають нижню праву частину рисунка.

Щоб цього уникнути, потрібно вибрати більший масштаб по осі Y і змістити нуль абсцис, як це зроблено на правому графіку.



Неправильно



Правильно

Рис. 1. Вибір масштабу та початку відліку в разі побудови графіків.

Масштаб повинен бути зручним. Клітинка графіка (чи міліметрового паперу) може відповідати 0,1, 0,2, 0,5, 1,0, 2,0, 5,0, 10,0 одиницям величини, яку вимірюють, однак не 2,5, 3,0, 4,0, 7,0 і т.д. Якщо масштаб незручний, то нанесення експериментальних точок на графік і використання графіка потребують невинновдано багато часу, що нерідко призводить до неприємних помилок.

Графічне зображення результатів дає змогу швидко зрозуміти характерні особливості залежності, яку спостерігають і виявити помилкові результати. Наприклад, з графіка на рис. 1 видно, що крива $Y = Y(X)$ за збільшення X стає пологішою. Третя ліворуч точка випала. Очевидно, під час її вимірювання була допущена помилка. Якщо це не так, то в інтервалі біля цієї точки шукана залежність має різко виражену особливість. Такі особливості становлять великий інтерес. Тому потрібно уважно виміряти область, розташовану поблизу точки, що випала, і намагатись детально вивчити форму кривої в інтервалі знайденої особливості.

Точки, які наносяться на графіки, треба зображати чітко. Їх необхідно позначати олівцем, бо інакше помилково нанесену точку не можна буде видалити з графіка, не зіпсувавши його.

Ніяких ліній і міток, які пояснюють побудову точок, на графік наносити не можна, оскільки вони заважають аналізувати результати.

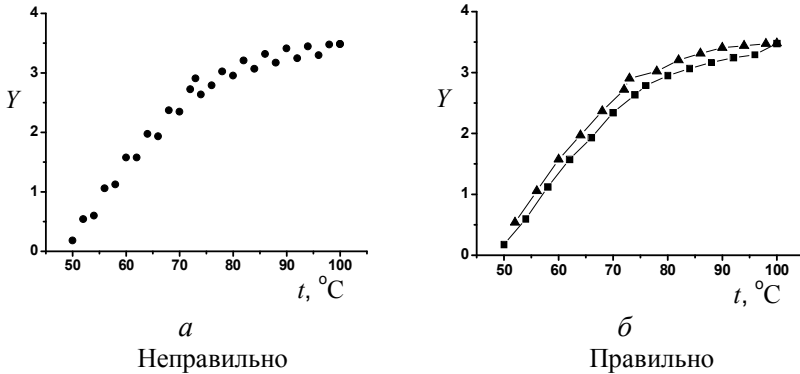


Рис. 2. Графічне зображення результатів, отриманих за різних умов.

Точки, отримані за різних умов (під час нагрівання й охолодження, збільшення чи зменшення навантаження, у різні дні тощо, корисно наносити різними кольорами чи різними значками. Це допомагає побачити нові явища. Наприклад, на графіках рис. 2, *a* і *б* – один і той самий набір точок. На рис. 2, *a* всі ці точки нанесені однаково, а на рис. 2, *б* точки, отримані під час нагрівання й охолодження, зображені по-різному (трикутниками і квадратами). На першому з графіків видно тільки розкид точок, а другий свідчить, що розкид насправді невеликий, однак точки, виміряні під час нагрівання і під час охолодження, лежать на різних кривих. Очевидно, що тільки рис. 2, *б* містить необхідну інформацію для аналізу і побудований грамотно.

Спосіб зображення на графіку експериментальних результатів залежить від того, чи відома їхня випадкова похибка. Якщо вона не відома (що частіше всього буває), то результати зображають крапками, а якщо відома, то ліпше зображати їх не крапками, а хрестиками. Піврозмір хрестика по горизонталі повинен дорівнювати стандартній похибці по осі абсцис, його

вертикальний піврозмір – похибці по осі ординат. У цьому випадку, якщо одна з помилок – через свою малу величину – не може бути зображена графічно, результати зображають рисочками, які витягнуті на $\pm\sigma$ в тому напрямі, де похибка немала. Важливість такого способу відображення результатів видно з рис. 3 *a, б*, де показано одні й ті ж експериментальні точки за різних похибок вимірювань. Графік 3, *a* безсумнівно, свідчить про нерегулярний хід залежності, яку вивчають. Ця залежність зображена на рис. 3, *a* кривою лінією. Ті ж дані за великих похибок досліду (див рис.3, *б*) з успіхом описує пряма лінія, оскільки лише одне вимірювання відступає від кривої більше, ніж на стандартну похибку (і менше, ніж на дві такі похибки). Та обставина, що в разі похибок рис. 3, *a* дані потребують проведення кривої, а на рис. 3, *б* цього – ні стає очевидною лише в разі зображення експериментальних результатів у вигляді хрестика похибок.

Зі сказаного не випливає, що, зображаючи результати дослідів не хрестиками похибок, а крапками, ми завжди робимо помилку. Якщо значення похибок уже відомі під час побудови графіка, то потрібно, звичайно, їх зображати. Однак переважно ці похибки в момент побудови графіка невідомі і їх треба визначати з розкиду точок на графіку. В таких випадках експериментальні дані ліпше зображати крапками.

Лінії, проведені через експериментальні крапки на рис. 3, *a* і *б*, не тільки полегшують обстеження даних, а й слугують прикладом опрацювання результатів досліду. Зазначимо, що криві на графіках не завжди проводять через експериментальні точки. Нерідко криві зображають залежність, отриману не з експерименту, а з теоретичних міркувань (чи з інших дослідів). У випадку побудови таких кривих виникає потреба попередньо нанести на графік декілька розрахованих точок. Ці точки треба наносити ледь помітно, щоб не сплутати з чіткими точками (чи хрестиками), які зображають експериментальні дані. Найліпше, щоб розраховані точки взагалі були не помітні.

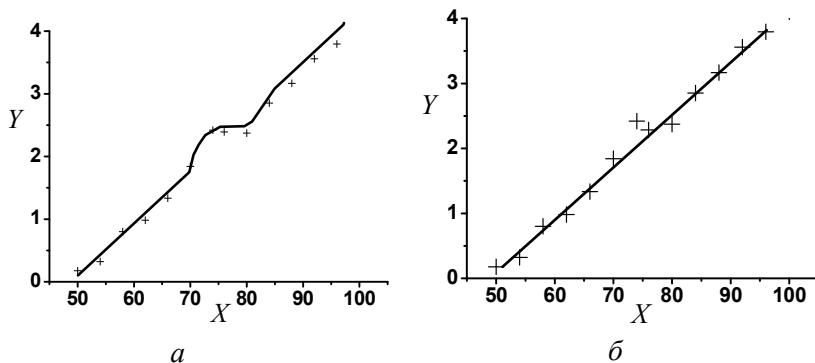


Рис. 3. Проведення кривої через експериментальні точки в разі різних похибок вимірювань. Права частина кривої (а) проведена неправильно – вище експериментальних точок.

Осі графіка повинні мати виразні, чіткі позначення. Поряд з поділками на зручних проміжках повинні бути нанесені цифри, які відповідають поділкам шкали. Цифри прийнято розташовувати по краях сітки. На рис. 1, 2 цифри стоять не біля кожної вертикальної лінії, а через одну.

На графіках повинно бути позначено, яка фізична величина і в якому масштабі відкладена на осі, як, наприклад, на рис. 1 і 2.

8. Проведення кривих через експериментальні точки

Через експериментальні точки завжди потрібно проводити найпростішу криву, яка сумісна з цими точками, тобто криву, від якої експериментальні дані відхиляються, як звичайно (в 2/3 випадків), не більше, ніж на стандартну похибку. Приклад таких кривих зображено на рис. 3. Не потрібно надавати кривим ніяких згинів, якщо експериментальні дані – у межах похибок – можна задовольнити без цього.

У разі проведення кривої потрібно стежити за тим, щоб на кожній достатньо великій її ділянці експериментальні точки були розташовані як вище, так і нижче кривої. Наприклад, на рис. 3, а

ліва частина кривої проведена правильно, а права – неправильно: жодна з точок не лежить вище цієї кривої.

Під час графічного опрацювання результатів потрібно пам'ятати, що “на око” можливо точно провести через експериментальні точки тільки пряму лінію. Тому, будуючи графік, потрібно намагатись, щоб очікувана залежність мала вигляд прямої лінії. Зокрема, вивчаючи залежність в'язкості рідини від температури, маємо право очікувати, що результати описуватиме закон.

$$\eta = Ae^{\frac{u}{kT}}.$$

Якщо відкласти на осях графіка η і T , то точки ляжуть на експоненту, яку провести на око майже неможливо. Однак якщо відкласти на осях $\ln\eta$ і $1/T$, то графік набуде вигляду прямої лінії. Під час вимірювань завжди потрібно пильнувати, щоб точки на графіку, який потім буде побудований, розташувались достатньо рівномірно. У нашому прикладі, для побудови графіка в координатах $\ln\eta$ і $1/T$ потрібно вибирати температуру так, щоб точки лежали на однакових проміжках у шкалі $1/T$, а не в T .

Лабораторна робота 1

Визначення тиску

Мета роботи: оволодіти методами вимірювання тиску рідин і газів.

Завдання 1. Вивчення рідинних манометрів.

Прилади і матеріали: рідинні манометри різних типів.

Теоретичні відомості

Тиск є одним із параметрів стану термодинамічної системи. За означенням він чисельно дорівнює відношенню сили тиску F до площі S , на яку діє сила F :

$$P = F/S. \quad (1.1)$$

Тиск вимірюють у паскалях: $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$.

Згідно з молекулярно-кінетичною теорією газів, тиск газу на стінки посудини зумовлений ударами молекул у стінку і передаванням їй їхнього імпульсу. Значення тиску залежить від концентрації молекул n та абсолютної температури T газу:

$$P = nkT, \quad (1.2)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана.

У практичній діяльності людині доводиться вимірювати тиск від дуже великих (порядку 10^{11} Па) до дуже малих (порядку 10^{-11} Па) значень. Зрозуміло, що охопити весь цей діапазон тиску за допомогою якогось одного методу неможливо.

Прилади для вимірювання тиску – манометри – поділяють на дві категорії. До однієї з них належать такі, які безпосередньо визначають тиск як відношення сили до площі. Такі прилади називають первинними. Інша категорія манометрів передбачає вимірювання фізичних величин, які пов'язані з тиском певною функціональною залежністю. Такі манометри називають вторинними.

Первинними є поршневі манометри. В них силу тиску рідини або газу на поршень урівноважує інша сила, значення якої відоме. Такою силою, зокрема, може бути сила ваги. За відомих значень площі поршня і сили тиск визначають за формулою (1.1). Первинні манометри використовують для градування та перевірки вторинних манометрів.

Рідинні манометри теж належить до первинних і за конструктивними особливостями можуть суттєво відрізнитися між собою. На рис.1.1 показані схеми найчастіше використовуваних рідинних манометрів. Чутливим елементом тут є стовп рідини, який зрівноважує вимірюваний тиск. Тиск обчислюють за формулою

$$P = \rho gh, \quad (1.3)$$

де ρ – густина барометричної рідини, (використовують ртуть, воду, спирт, толуол) g – прискорення вільного падіння; h – висота рівня рідини. Оскільки h залежить від ρ , то рідинний манометр градуують не в паскалях, а в міліметрах. На підставі формули (1.3) можна з'ясувати, що 1 мм ртутного стовпчика дорівнює 133,3 Па, 1 мм водяного – 9,8 Па.

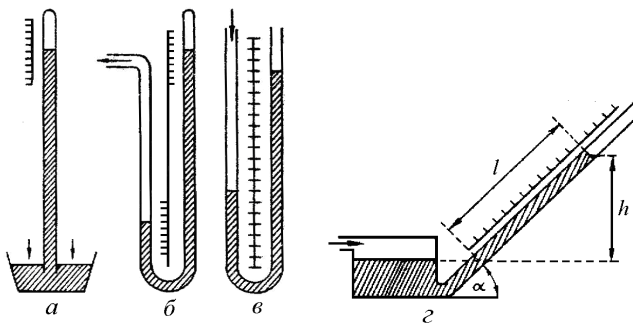


Рис. 1.1. Рідинні манометри:

a – чашковий барометр; *б* – ртутний вакуумметр; *в* – U - подібний диференціальний манометр; *г* – мікроманометр з постійним рівнем відліку і нахиленою трубкою.

Чутливість рідинного манометра залежить від густини рідини, яке в ньому використовують, і прискорення вільного падіння. В манометрі з нахиленою трубкою чутливість залежить ще від кута нахилу α трубки (див. рис. 1.1, ϵ). З виразу (1.3) одержимо

$$\frac{dh}{dp} = \frac{1}{\rho g} \left(\frac{i}{\tilde{I} \dot{a}} \right). \quad (1.4)$$

Для манометра з нахиленою трубкою

$$\frac{dl}{dp} = \frac{1}{\rho g \sin \alpha}. \quad (1.5)$$

Якщо трубка манометра вузька, то треба вводити поправки на капілярні явища, тобто враховувати тиск Лапласа P_L , зумовлений кривиною поверхні. Для циліндричної трубки

$$P_E = \frac{2\delta}{R} = \frac{4\delta}{d}, \quad (1.6)$$

де δ – коефіцієнт поверхневого натягу манометричної рідини за температури вимірювання; R – радіус кривизни поверхні рідини в трубці; d – діаметр трубки.

Під час особливо точних вимірювань потрібно врахувати поправку на зведення до нормальної сили тяжіння, яка складається з двох частин. Перша з них ΔP_φ залежить від географічної широти φ , а друга ΔP_H – від висоти H над рівнем моря місця встановлення манометра:

$$\Delta P_\varphi = - P \cdot 0,0026 \cdot \cos 2\varphi, \quad (1.7)$$

$$\Delta P_H = - PH \cdot 0,000000196.$$

У зведених поправках P – тиск, виміряний на широті φ , H – висота над рівнем моря.

Густина манометричної рідини, довжина шкали манометра змінюються з температурою. Як звичайно, покази зводять до температури 0°C . Для цього використовують формулу

$$P_0 = P[1 - (\beta - \alpha)t], \quad (1.8)$$

де P_0 і P – тиски за температури 0 і $t^\circ\text{C}$, відповідно; β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини в манометрі; α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу шкали.

Хід роботи

1. Визначити чутливість ртутного манометра. З'ясувати особливості його будови.
2. Обчислити похибки на капілярність, на зведення до нормальної сили тяжіння, температурну похибку. Порівняти їх з похибкою відрахування різниці рівнів для заданого манометра.
3. Визначити чутливість і похибки водяного манометра.
4. Вивчити особливості будови мікроманометра з нахиленою трубкою.
5. Ознайомитися з будовою і принципом роботи мікроманометра МКВ-250.

Завдання 2. Вивчення деформаційних манометрів

Прилади і матеріали: барометр-анероїд, барограф, трубчастий манометр.

Теоретичні відомості

Деформаційні манометри належать до вторинних, тобто таких, що вимірюють не безпосередньо тиск, а деформацію, зумовлену тиском. Чутливим елементом у таких манометрах є пружна оболонка, яка деформується під дією тиску. Залежно від конструкції чутливого елемента деформаційні манометри поділяють на мембранні, сильфонні та трубчасті (рис.1.2). Простота і компактність забезпечили манометрам цього типу широке використання в різних галузях науки й техніки.

Дія барометра-анероїда (див. рис.1.2) ґрунтується на зрівноваженні атмосферного тиску пружною силою деформованої

гофрованої мембрани. Деформація мембрани зумовлює переміщення стрілки по шкалі. Градуюють такі барометри за показами ртутного барометра.

Прилад, призначений для тривалого записування змін атмосферного тиску, називають барографом. Спеціальна діаграмна стрічка проградуєвана в одиницях тиску і розрахована на добу або тиждень запису спеціальним чорнилом, яке не висихає.

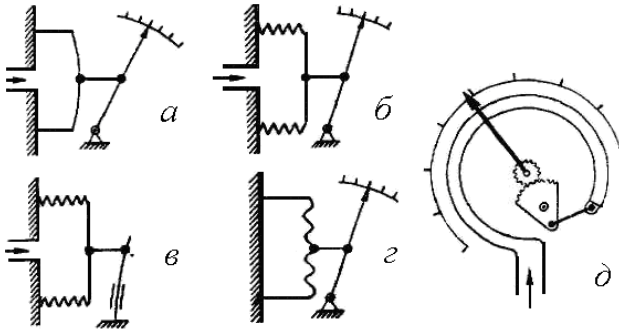


Рис. 1.2. Деформаційні манометри:

a – мембранний; *б* – сифонний; *в* – сифонний з тензодатчиком;
г – анероїд; *д* – трубчастий.

У трубчастому манометрі чутливим елементом є плоска, зігнута дугою трубка, один кінець якої приєднують до об'єму, у якому вимірюють тиск, а другий, запаяний до передавального механізму (див. рис.1.2, *д*). На честь винахідника – французького вченого Е. Бурдона – зігнуту трубчасту пружину називають трубкою Бурдона. У разі зміни тиску рідини або газу трубка зазнає деформування. Переміщення її запаяного кінця через передавальний механізм надає руху стрілки, яка показує тиск за піками приладу. Градуюють такі манометри за допомогою первинних приладів – поршневих манометрів; змінюючи пружні властивості трубки Бурдона, одержують манометри різної чутливості й для різних діапазонів тиску. Деформаційні манометри дають змогу вимірювати тиск у межах від 10 до 10^9 Па.

Хід роботи

1. Ознайомитися з будовою барометра-анероїда. Виміряти атмосферний тиск, зробивши не менше п'ять вимірювань. Обчислити похибку відлічування тиску.
2. Визначити чутливість анероїда.
3. Ознайомитися з будовою анероїдного барографа. Визначити його чутливість, а також похибку вимірювання атмосферного тиску.
4. Ознайомитися з будовою трубчастого манометра, його конструктивними особливостями. За написами на шкалі визначити клас точності приладу, а також похибку вимірювання тиску.
5. З'ясувати, в чому полягає відмінність двох манометрів, розрахованих на різні тиски.

Контрольні питання

1. *Яка причина тиску газу на стінки посудини?*
2. *Що зумовлює атмосферний тиск?*
3. *Які ви знаєте типи манометрів?*
4. *Що станеться зі стовпчиком ртуті в досліді Торрічеллі, якщо трубку нахилити?*
5. *Який манометр називають диференціальним?*
6. *Від чого залежить чутливість деформаційних манометрів?*
7. *Поясніть, чому з авторучки в літаку може вилитись чорнило.*

Лабораторна робота 2

Вимірювання температури

Мета роботи: оволодіти методами вимірювання температури і вивчити принцип дії різних термометрів.

Завдання 1. Перевірка основних точок рідинного термометра

Прилади і матеріали: термос, зразковий термометр з ціною поділки 0,1 °С, досліджувані термометри – ртутний і спиртовий, нагрівник, колба з водою, лід або сніг.

Теоретичні відомості

Температура є кількісною мірою ступеня нагрятості тіла. Для її вимірювання використовують методи, які ґрунтуються на зміні залежно від зміни температури певних властивостей речовини за умови, що параметри, які характеризують ці властивості, можна порівняно легко виміряти. Найчастіше використовують об'ємне або лінійне розширення тіл (дилатометричні термометри), зміну електричного опору (електричні термометри опору), зміну термоелектрорушійної сили (термоелектричні пірометри), зміну властивостей випромінювання нагрітих тіл (пірометри випромінювання).

Кожний з методів охоплює певний температурний діапазон:

термометри розширення	від 0 до 650 °С
термометри опору	від - 200 до + 650 °С
термоелектричні пірометри	від - 50 до + 2500 °С
пірометри випромінювання	від 100 до 1400 °С

Розвиток науки і техніки зумовив потребу створення єдиної температурної шкали, незалежної від вибору термометричного тіла і термометричної величини.

Тривалий час використовували термометричну шкалу Цельсія, реперними точками в якій брали точку плавлення льоду і точку кипіння води за тиску 10^5 Па. Один градус у цій шкалі відповідав одній сотій частці температурного інтервалу між цими точками.

Термодинамічна шкала температур збігається зі шкалою газового термометра, заповненого ідеальним газом, і ґрунтується на пропорційній залежності об'єму від температури. Як реперну точку для термодинамічної шкали температур використовують потрійну точку води, температура якої – 273,16 К. Одиницю для вимірювання температури визначено як $1/273,16$ температурного інтервалу між потрійною точкою води й абсолютним нулем температур. Абсолютний нуль не є реперною точкою, оскільки такої температури досягнути в принципі неможливо. Твердження про недосяжність абсолютного нуля температури відоме як третє начало термодинаміки.

Якщо, як термометричне тіло вибрати ідеальний газ, а як

термометричну величину – тиск, то за сталого об'єму термодинамічну температуру можна обчислити за формулою

$$T = \frac{273,16}{P_0} P(\hat{E}), \quad (2.1)$$

де P_0 – тиск газу за температури потрійної точки води; P – тиск газу за вимірюваної температури.

Для термометрів лінійного розширення ґрунтується на відносному видовженні в разі нагрівання двох твердих тіл, які мають дуже відмінні коефіцієнти лінійного розширення. Однак ці термометри як вимірювальні прилади не набули поширення. Проте за цим принципом працює низка температурних реле для сигналізації або регулювання температури.

У рідинних термометрах як термометричні рідини використовують ртуть (від $-38,87$ до $+650$ °С), етиловий спирт (від -70 °С), пентан (від -200 °С). На рис.2.1, *a* показана будова рідинного термометра, складається з трьох частин: балона *1* з термометричною рідиною, капіляра *2* і шкали *3*. Скло, з якого виготовляють термометри, має невеликий коефіцієнт теплового розширення.

Різні термометри мають різну чутливість. Якщо об'єм балона з рідиною – V , радіус капілярної трубки – r , висота стовпчика рідини – h , то

$$V + \pi r^2 h = V(1 + \beta T), \quad (2.2)$$

де β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення термометричної рідини. Тоді чутливість термометра

$$\frac{dh}{dT} = \frac{V\beta}{\pi r^2}. \quad (2.3)$$

Вітчизняна промисловість випускає термометри, що мають ціну найменшої поділки $0,01$ °С. Для вимірювання невеликого інтервалу температур при збереженні високої чутливості використовують так званий вкорочений термометр, балон якого

нецілком заповнений рідиною. Для вимірювання температури в медицині застосовують максимальний термометр, капіляр якого має звуження. Останнім часом, однак, чимраз ширшого застосування набувають термометри на термочутливих фарбах.

Ртутний термометр використовують також для регулювання температури. Тоді у верхній частині капіляра є введена тонка контактна дротина, положення якої регулюють (див. рис.2.1, б). За заданої температури стовпчик ртуті і дротина створюють електричний контакт і замкнуть коло, у яке увімкнено реле виконуючого пристрою.

Похибки, які виникають у разі вимірюванні температури, зумовлені переважно такими причинами: 1) неповне занурення термометра в середовище, де вимірюють температуру; 2) нециліндричність капіляра; 3) поправка на тиск пари ртуті за високих температур та ін. Якщо термометр не можна занурити повністю, то похибки на стовпчик, що виступає, обчислюють за формулою

$$\Delta T = \alpha_v (T - T_0)L, \quad (2.4)$$

де α_v – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини в склі (для ртуті $\alpha_v = 0,000156$); T – виміряна термометром температура; T_0 – середня температура стовпчика, що виступає виміряна допоміжним термометром; L – довжина стовпчика рідини в термометрі, що виступає.

Хід роботи

1. Для перевірки нульової точки термометрів необхідно приготувати посудину з льодом або снігом. Занурити робочі частини термометрів у посудину із сумішшю льоду з дистильованою водою. Через 5 хв записати покази кожного досліджуваного термометра. Далі відліки знімати через кожні півхвилини (п'ять – сім значень).

2. Точки кипіння води перевірити в колбі, куди помістити досліджуваний термометр за допомогою гумового корка з отвором. Балон з рідиною термометра не повинен торкатися поверхні води. Коли вода в колбі закипить, зробити відлік температури досліджуваним термометром. Повторити відлік температури п'ять – сім разів. Записати значення атмосферного тиску і визначити температуру кипіння води з таблиць.
3. Знайти поправки до показів досліджуваних термометрів в обох реперних точках.
4. Визначити чутливість досліджуваних термометрів.

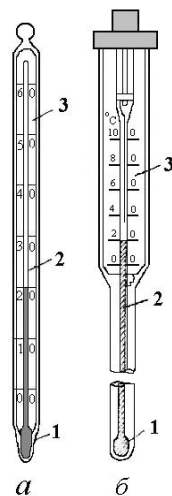


Рис. 2.1 Термометри рідинні

Завдання 2. Виготовлення та градуювання термопар

Прилади і матеріали: дротини з хромелю, алюмелю, копелю, пристрій для зварювання термопар, потенціометр ПП-63, термометр з ціною поділки $0,5^{\circ}\text{C}$, електропіч, регулятор напруги, посудина Дюара, лід або сніг.

Теоретичні відомості

Для вимірювання температури широко застосовують термоелектричні пірометри, оскільки вони можуть працювати в значному діапазоні температур, а їхні покази можливо передавати дистанційно. Їхня дія ґрунтується на термоелектричних явищах у спаях різних матеріалів. Якщо маємо спай двох різних

провідників, то такий прилад називають термопарою. Термоелектрорушійна сила ε , що виникає на кінцях провідників під час нагрівання спаю, залежить від температури. Для деяких термопар ця залежність лінійна:

$$\Delta\varepsilon = \alpha\Delta T, \quad (2.5)$$

де α – коефіцієнт пропорційності, що залежить від матеріалів, з яких виготовлена термопара, а також від температури; ΔT – різниця температур спаю і вільних кінців термопари. Чутливість термопари залежить від α . Нині широко застосовують такі термопари: платинородій - платина (ПП), хромель - алюмель (ХА), хромель - копель (ХК), мідь-константан та ін.

Для перетворення показів вимірювального приладу, що увімкнений у коло термопари, необхідно мати градувальний графік. Стандартні термопари, градування яких відомі, є взаємозамінними і не потребують окремого градування. Проте внаслідок неоднорідності термопарних матеріалів можливі помітні відхилення від стандартних градувань. Тому в особливо відповідальних випадках термопари й градують за допомогою зразкових термопар типу ПП або за певними реперними точками. Як реперні точки беруть:

точку кипіння кисню	–	182,97 °С;
потрійну точку води	–	0,01 °С;
точку кипіння води	–	100 °С;
точку кипіння сірки	–	444,6 °С;
точку кристалізації срібла	–	960,8 °С;
точку кристалізації золота	–	1063,0 °С.

Якщо потрібно виміряти різницю температур двох просторово розділених точок, то використовують так звану диференціальну термопару (рис.2.2). Спаї такої термопари поміщають у досліджувані точки, унаслідок чого на виході одержують термо-е.р.с., пропорційну до різниці температур у цих точках. Таку термопару досліджують у цьому завданні. Один зі спаїв поміщають у посудину з танучим льодом або снігом, а другий – у місце, де потрібно визначити температуру. Термоелектрорушійну

силу вимірюють компенсаційним методом за допомогою потенціометра постійного струму, наприклад, ПП-63.

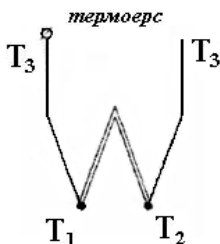


Рис.2.2. Диференціальна термопара.

Хід роботи

1. Для виготовлення диференціальної термопари взяти три шматки термопарного дроту – два з одного, а один – з іншого матеріалу, наприклад, два мідні й один константановий. Довжини їх повинні бути до 0,5 м. За допомогою зварювального пристрою зробити спаї, намагаючись надати їм кулястої форми.
2. Вільні кінці термопари приєднати до вимірювального пристрою, приладу (мілівольтметр, потенціометр).
3. Один зі спаїв опустити в посудину з подрібленим танучим льодом або снігом. У разі відхилення стрілки приладу ліворуч поміняти місцями спаї, тобто в лід помістити інший спай, який будемо називати "холодником". "Гарячий" спай помістити в піч разом зі зразковим термометром.
4. Зробити відліки температури за термометром і термо-е.р.с. термопари. Результати записати в таблицю. Ступінь нагрівання електропечі регулювати регулятором напруги.
5. Діапазон температури в разі градування термопари повинен бути не менше ніж $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. За одержаними даними побудувати градувальний графік термопари, тобто залежність термо-е.р.с. від температури T . Визначити з графіка коефіцієнт термо-е.р.с. заданої термопари, а також порівняти його з табличним значенням.

Контрольні питання

1. На яких фізичних принципах ґрунтуються різні типи термометрів?
2. Що таке термометрична величина?
3. Яке тіло вибирають як термометричне в термодинамічній шкалі температур?
4. Пояснити принцип дії максимального термометра; контактного термометра.
5. Яка величина буде термометричною для термопари?
6. Які переваги мають термопари перед рідинними термометрами?

Лабораторна робота 3

Використання рівняння стану ідеального газу для визначення об'єму та густини

Мета роботи оволодіти методом визначення густини поруватих і сипких тіл на підставі використання газових законів, визначити відносну густину пари ефіру.

Завдання 1. Визначення густини поруватих і сипких тіл

Прилади і матеріали: волюметр, терези, різноважки, досліджувані матеріали – пінопласт, подрібнений мармур.

Теоретичні відомості

Для визначення густини поруватих і сипких тіл, густина яких менша, ніж густина води, не придатні методи, що ґрунтуються на гідростатичному зважуванні або на використанні мензурок з рідиною для визначення об'єму. В таких випадках застосовують газовий волюметр, що дає змогу визначити об'єм тіла на підставі законів ідеальних газів.

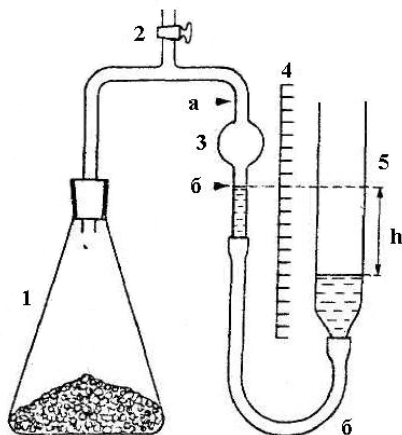


Рис. 3.1. Волюметр

Волюметр (рис.3.1) складається з посудини 1, об'єм V якої невідомий. Посудина щільно закрита гумовим корком, у який встановлено скляну трубку. Трубка з'єднує посудину з кулястим розширенням 3. Відросток з краном 2 дає змогу відділяти посудину від зовнішнього середовища. Кулясте розширення 3 має відомий об'єм V_0 і сполучене гнучким шлангом з широкою посудиною 5, у яку налита дистильована вода. За допомогою лінійки 4 можна визначити різницю рівнів води у трубках. Посудину 5 можна фіксувати на будь-якій висоті за допомогою гвинта.

За умов, коли відкрито кран 2, посудину 5 пересувають угору, доки рівень води в трубці 3 з розширенням не досягне позначки a . Повітря в посудині 1 перебуває під атмосферним тиском H . Якщо кран 2 закрити й посудину 5 опускати, то повітря в приладі буде розширюватись, доки рівень води не досягне позначки $б$. Об'єм газу стане $V + V_0$, а тиск знизиться на h_1 мм водяного стовпчика. Оскільки процес ізотермічний, то є виконується закон Бойля - Маріотта:

$$VH = (V + V_0)(H - h_1). \quad (3.1)$$

Якщо в посудину I помістити досліджуване тіло об'ємом V_x , то об'єм повітря в системі буде зменшений на V_x . У цьому випадку за аналогічного досліду закон Бойля - Маріотта набуде вигляду

$$(V - V_x)H = (V - V_x + V_0)(H - h_2). \quad (3.2)$$

З рівнянь (3.1) і (3.2) знаходимо

$$V_x = VH_0 \frac{h_2 - h_1}{h_1 h_2}. \quad (3.3)$$

Густина тіла

$$\rho = \frac{m}{V_x} = \frac{mh_1 h_2}{HV(h_2 - h_1)}, \quad (3.4)$$

де m – маса досліджуваного тіла, яку визначаємо зважуванням.

Хід роботи:

1. Посудину I щільно закрити корком. Відкрити кран 2 та, піднімаючи трубку 5 , довести рівень води в трубці з кулястим розширенням 3 до позначки a .
2. Закрити кран 2 і опускати трубку 5 , доки рівень води в лівому коліні не досягне позначки b , тобто об'єм повітря збільшиться на V_0 . Закріпити широку трубку 5 у цьому положенні за допомогою гвинта.
3. Визначити в міліметрах різницю рівнів h_1 води в лівій і правій трубках. Відліки зробити з інтервалом у кілька секунд п'ять разів. Знайти середнє значення \bar{h}_1 та похибку Δh_1 .
4. Вийняти з посудини I корок; засипати досліджуване тіло в посудину I і виконати дослід, описаний у пунктах 1–3. Знайти \bar{h}_2 та Δh_2 .
5. Вийняти корок і висипати з посудини I досліджувану речовину на шальку терезів. Визначити масу тієї кількості речовини, що була засипана в посудину I , і похибку вимірювання. Результат зважування виразити в кілограмах і записати в таблицю.
6. Визначити атмосферний тиск H у міліметрах ртутного стовпчика і похибку його визначення.

7. За формулою (3.4) знайти шукану густину ρ . Оскільки h_1 і h_2 виражені в міліметрах водяного стовпчика, а H – у міліметрах ртутного, то в знаменнику формули (3.4) треба дописати множник 13,6:

$$\rho = \frac{mh_1h_2}{13,6HV_0(h_2 - h_1)} \quad (3.5)$$

Завдання 2. Визначення відносної густини пари ефіру

Прилади і матеріали: скляна пробірка з відростком, сухопарник, вимірний циліндр, термометр, лінійка, терези, рівноважки.

Теоретичні відомості

Для визначення відносної густини пари ефіру $(C_2H_5)_2O$ використовують рівняння стану ідеального газу

$$PV = \frac{m}{\mu}RT, \quad (3.6)$$

з якого можна визначити густину газу ρ :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu P}{RT}. \quad (3.7)$$

Під відотною густиною розуміють відношення густини ρ заданого газу до густини ρ_0 повітря за тих самих умов, тобто за однакових температури і тиску:

$$\sigma = \frac{\rho}{\rho_0} = \frac{\mu}{\mu_0}. \quad (3.8)$$

Різні гази, якщо вони підлягають законам ідеальних газів, за однакових умов містять однакову кількість молів, тому

$$\frac{m}{\mu} = \frac{m_0}{\mu_0}, \quad \text{або} \quad \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{m}{m_0}; \quad (3.9)$$

$$\sigma = \frac{m}{m_0}. \quad (3.10)$$

Оскільки

$$m_0 = \frac{\mu_0 PV}{RT}, \quad (3.11)$$

то

$$\sigma = \frac{m}{\mu_0} \frac{RT}{PV}. \quad (3.12)$$

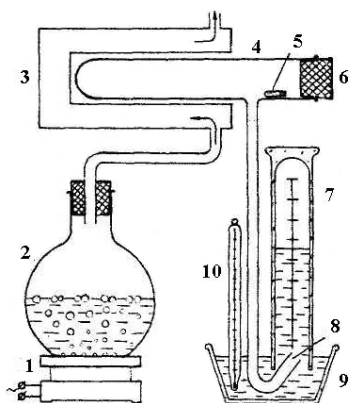


Рис. 3.2. Схема установки для визначення відносної густини пари ефіру.

Хід роботи

1. Увімкнути електроплитку 1 в мережу (рис.3.2).
2. Знайти масу ампули 5 з корком. В ампулу налити приблизно 1 см³ ефіру, зважити її та знайти масу ефіру.
3. У посудину 9 налити воду й опустити зігнутий кінець трубки 8, а також циліндр 7, наповнений водою. Циліндр у такому положенні закріпити.
4. Ампулу 5 з ефіром помістити в пробірку 4, яку щільно закрити корком 6.
5. Коли вода в колбі 2 закипить і пара почне виходити з сухопарника 3, перевести сухопарик у вертикальне положення. У цьому разі ампула 5 зміститься в гарячу ділянку пробірки 4, пара ефіру виштовхне корок ампули 5 і витіснить повітря з пробірки в циліндр 7 через трубку 8. Повітря матиме таку ж температуру, як вода в посудині 9. Її виміряти термометром 10.
6. Коли виділення бульбашок повітря з трубки 8 припиниться, визначити об'єм повітря в циліндрі 7, а також різницю рівнів h води в циліндрі 7 і посудині 9.
7. Записати значення атмосферного тиску H_0 . Тиск повітря в циліндрі

$$P = 133,4(H_0 - \frac{h}{13,6} - f) \quad (\text{Па}), \quad (3.13)$$

де f – пружність насиченої пари в циліндрі 7, яку визначаємо з таблиць. З урахуванням (3.13)

$$\sigma = \frac{mRT}{133,4\mu_0(H_0 - \frac{h}{13,6} - f)V}. \quad (3.14)$$

Контрольні питання

1. Які фізичні моделі використовують у молекулярній фізиці?
2. За яких умов газ можна вважати ідеальним?
3. Від чого залежить тиск, що його чинить ідеальний газ на стінки посудини?
4. Зобразити ізотермічний процес на площині в координатах p, V ; V, T і P, T .

5. Як розташовані на графіку ізотерми певної маси газу за різних температур?
6. Побудувати графік ізобаричного процесу для певної маси газу в координатах P, V ; V, T ; P, T . Намалювати кілька ізобар для різних тисків.
7. Побудувати графік ізохоричного процесу в координатах P, V ; V, T ; P, T . Як відрізнятимуться графіки для різних об'ємів; різних мас, різних молярних мас?

Лабораторна робота 4

Визначення універсальної газової сталої методом відкачування

Мета роботи: оволодіти методом відкачування повітря з посудини для визначення універсальної газової сталої.

Прилади і матеріали: скляна колба, аналітична вага, помпа, U-подібний ртутний манометр.

Теоретичні відомості

Стан газу можна охарактеризувати трьома величинами – параметрами стану: тиском p , об'ємом V і температурою T . Рівняння, яке пов'язує ці три величини, називають рівнянням стану речовини.

Рівнянням стану ідеального газу є рівняння Клайперона

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (4.1)$$

де m – маса газу, μ – молярна маса газу, R – універсальна газова стала.

Якщо розглянути газ за сталої температури і сталого об'єму в двох станах за різних тисків p_1 і p_2 , то можна отримати вирази, зручні для визначення R :

$$p_1 V = \frac{m_1}{\mu} R T ; \quad (4.2)$$

$$p_2 V = \frac{m_2}{\mu} R T . \quad (4.3)$$

Звідси

$$R = \frac{\mu(p_1 - p_2)V}{(m_1 - m_2)T} . \quad (4.4)$$

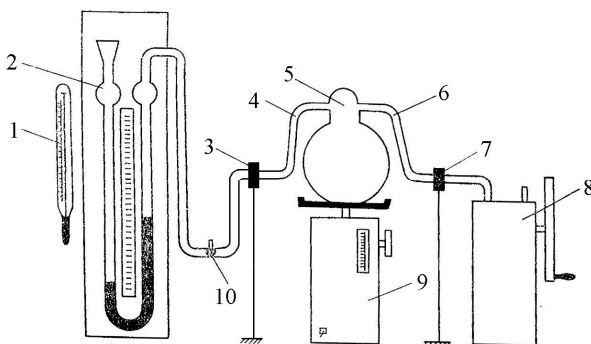


Рис.4.1. Прилад для визначення універсальної газової сталої методом відкачування

Прилад – це колба 5 (рис. 4.1), яка стоїть на аналітичній вазі 9 і має два відростки з припаяними на кінцях двома скляними кранами 3 і 7. Крани мають відростки, на які одягають вакуумні шланги. Один зі шлангів (лівий 4) з'єднує робочу колбу з U-подібним ртутним манометром, який закріплений на масивній плексигазовій стійці 2. Другий шланг 6 з'єднує правий відросток мірної колби з ручною помпою Комовського 8.

Хід роботи

1. Відкрити крани 3, 7 і робочу колбу зважити на аналітичній вазі для визначення маси повітря, яке міститься в колбі.
2. Виміряти температуру T повітря в приміщенні лабораторії термометром l .
3. Робочу колбу з'єднати з манометром та помпою і відкачати до деякого тиску p_2 . У цьому випадку U-подібний манометр 2 показує різницю між атмосферним тиском p_1 і тиском у колбі p_2 . Ця різниця пов'язана з різницею рівнів ртуті, її визначають за рівнянням

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho gh, \quad (4.5)$$

де ρ – густина ртуті, g – прискорення вільного падіння.

4. Крани 3, 7 закрити. Аналітичною вагою визначити масу повітря, що міститься в колбі після відкачування.
5. З урахуванням рівняння (4.5) одержати остаточний вираз для визначення універсальної газової сталої:

$$R = \frac{\mu \rho ghV}{(m_1 - m_2)(t + 273^\circ)}$$

У цьому випадку $h = h_1 - h_2$, де h_2 – рівень ртуті у лівому коліні манометра в процесі відкачування; h_1 – рівень ртуті в правому коліні.

Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю.

№ №/І	h, м	m ₁ , кг	m ₂ , кг	R, Дж/ моль	ΔR, Дж/ моль·К	E, %

Контрольні питання

1. Дати означення ідеального газу.
2. Сформулювати закон Авогадро.
3. Пояснити фізичний зміст універсальної газової сталої.

Лабораторна робота 5

Визначення співвідношення C_p / C_v методом Клемана–Дезорма

Мета роботи: експериментально визначити співвідношення теплоємностей повітря за сталих тиску й об'єму.

Прилади і матеріали: балон об'ємом 20 - 25л і герметично сполучений з ним відкритий рідинний манометр, помпа.

Теоретичні відомості

Теплоємністю тіла називають фізичну величину, що чисельно дорівнює кількості теплоти, необхідної для підвищення температури цього тіла на один кельвін.

Нехай тіло одержує кількість теплоти δQ і його температура підвищується на dT , тоді

$$c_{\text{об'єм}} = \frac{\delta Q}{dT}. \quad (5.1)$$

Для газів значення теплоємності суттєво залежить від умов, за яких газ одержує теплоту. Розглянемо два випадки.

1. Об'єм газу сталий ($V = \text{const}$). Тоді газ роботи не виконує ($\delta A = 0$) і за першим законом термодинаміки

$$\delta Q = dU + pdV, \quad (5.2)$$

рівність для внутрішньої енергії –

$$U = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} RT; \quad (5.3)$$

для одного моля –

$$c_V = \frac{\delta Q_V}{dT} = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} R. \quad (5.4)$$

2. Тиск газу сталий ($P = \text{const}$):

$$c_p = \frac{\delta Q_p}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{PdV}{dT} = \frac{i}{2} R + R = \frac{i+2}{2} R\theta. \quad (5.5)$$

Тут використано рівняння стану $p dV = R dT$ для одного моля, у випадку ізобарного процесу.

Як бачимо, молярні теплоємності за сталого тиску і сталого об'єму відрізняються на газову сталу:

$$c_p = c_v + R. \quad (5.6)$$

Рівняння (5.6) відоме як рівняння Маєра.

На підставі (5.4) і (5.5) одержуємо співвідношення теплоємностей:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i+2}{i}. \quad (5.7)$$

Отже, теплоємність ідеального газу не залежить від температури, а визначена лише структурою молекул (точніше – числом ступенів вільності i).

Адіабатичним називають процес, який відбувається без теплообміну системи з зовнішнім середовищем. Іншими словами, термодинамічна система не одержує теплоти ($\delta Q = 0$).

Тоді, згідно з першим законом термодинаміки (5.2), одержуємо

$$dU + p dV = 0. \quad (5.8)$$

На підставі (5.3) і рівняння стану

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT = \frac{m}{\mu} c_v dT \quad \text{і} \quad p = \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V},$$

перепишемо (5.8) у вигляді

$$\frac{m}{\mu} c_v dT + \frac{m}{\mu} \frac{RT}{V} = 0, \quad (5.9)$$

або

$$\frac{dT}{T} + \frac{R}{c_v} \frac{dV}{V} = 0. \quad (5.10)$$

Оскільки $\frac{R}{c_v} = \frac{c_p - c_v}{c_v} = \gamma - 1$, то після інтегрування та потенціювання одержуємо

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}.$$

Замінімо температуру згідно з рівнянням стану $p = \frac{\mu}{m} \frac{pV}{R}$, одержимо рівняння адіабати у вигляді рівняння Пуасона:

$$pV^\gamma = \text{const}. \quad (5.11)$$

Безпосереднє визначення величин c_p і c_v пов'язане зі значними труднощами. Тому на практиці експериментально знаходять величини $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ та c_p , а потім обчислюють c_v .

Для визначення співвідношення $\frac{c_p}{c_v}$ запропоновано багато методів. Найпростіший з них експериментально метод Клемана і Дезорма, що полягає в послідовному проходженні досліджуваного газу через три стани, яке відбувається завдяки стисненню і

розширенню газу за умов, що забезпечують перебіг адіабатичного процесу.

Установка Клемана–Дезорма складається із балона XI з повітрям, помпи 1 і водяного манометра 5 (рис 5.1). У балон із закритим краном 4 накачують повітря. Тиск повітря в балоні підвищується, і

$$p_1 = H + h_1,$$

де h_1 – надлишок тиску повітря в балоні над атмосферним тиском H . Значення h_1 вимірюють манометром 5 . Відкривають на короткий час кран 3 , щоб тиск у балоні зрівнявся з атмосферним ($p_2 = H$), після чого закривають кран.

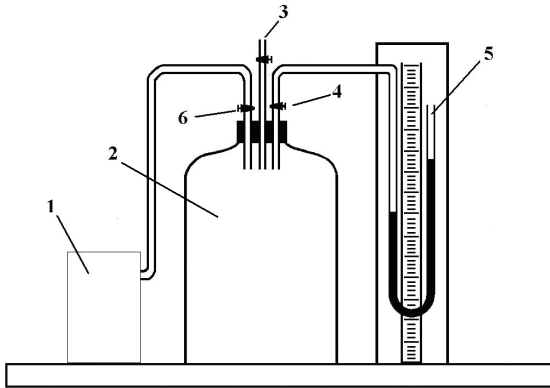


Рис. 5.1. Установка Клемана–Дезорма.

Нехай маса повітря після нагнітання помпою в посудині об'ємом V дорівнює m . У випадку відкручування крана частина повітря виходить. Позначимо масу повітря, що виходить, через Δm , тоді маса повітря, що залишилось, $m_1 = m - \Delta m$.

Маса повітря m_1 , що міститься в об'ємі V , займала перед відкручуванням крана менший об'єм V_1 . Оскільки процес

короткочасний і помітного теплообміну між газом та стінками балона не відбувається, то його можна вважати адіабатичним. Згідно з рівнянням Пуасона (для маси газу (13.11) m_1) отримаємо

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma. \quad (5.12)$$

Унаслідок адіабатичного розширення температура газу знизилась, а після теплообміну через невеликий проміжок часу дорівнюватиме кімнатній. У цьому разі тиск газу підвищиться до $p_3 = H + h_2$.

Початковий і кінцевий стани газу спостерігають за однакової температури. Тому на підставі закону Бойля - Маріота

$$p_1 V_1 = p_3 V. \quad (5.13)$$

Розв'яжемо рівняння (5.12) і (5.13) відносно γ , отримаємо

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg p_1 - \lg p_3}. \quad (5.14)$$

Розкладемо $\lg p_1$ і $\lg p_3$ в ряд Тейлора, обмежившись у цьому випадку двома першими членами:

$$\begin{aligned} \lg p_1 &= \lg (H + h_1) = \lg H + \frac{h_1}{H} + \dots; \\ \lg p_3 &= \lg (H + h_2) = \lg H + \frac{h_2}{H} + \dots \end{aligned}$$

Підставимо ці значення у формулу (5.14), отримаємо

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (5.15)$$

Отже, робота з визначення γ зводиться до вимірювання різниці висот h_1 і h_2 у коліні манометра.

Хід роботи

1. З закрученим 4 і відкритим 6 кранами балон за допомогою помпи 1 накачати деяку кількість повітря. Накачування повинно тривати доти доки різниця рівнів рідини в манометрі 5 не досягне 20 - 25 см. Після цього закрутити кран 6. Стиснення приводить до того, що температура газу в балоні підвищується.
2. Через декілька хвилин, коли температура повітря всередині посудини досягне кімнатної (положення рівнів рідини в манометрі вже не змінюється), виміряти різницю рівнів рідини в манометрі, тобто h_1 з точністю до 1 мм.
3. На мить відкрити кран 3 і закрутити його відразу, як тільки тиск у посудині зрівноважиться атмосферним (у цей час рівні рідини в манометрі будуть на однаковій висоті) і зникне звук, створений повітрям, що витікає. У цьому випадку повітря в посудині охолоджується.
4. Через деякий час повітря в балоні нагріється і його температура зрівняється з кімнатною. Внаслідок цього виникне деяка різниця рівнів рідини в колінах манометра h_2 , яку треба визначити з точністю до 1 мм.
5. Дослід виконати п'ять – сім разів.
6. За формулою (5.15) знайти γ .

Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю.

№ $\frac{\gamma}{i}$	h_1 , м	h_2 , м	γ	$\Delta\gamma$	E, %
----------------------	-----------	-----------	----------	----------------	------

Контрольні питання

1. Чому теплоємності газу різні в залежності від методів і умов нагрівання?
2. Чому c_p більше, ніж c_v ?
3. Який процес називають адіабатичним?
4. Що відбувається з внутрішньою енергією газу під час адіабатичного процесу?
5. Що таке число ступенів вільності? Як це число пов'язане з γ ? Знаючи γ (з досліду), визначте число ступенів вільності молекул повітря.

Лабораторна робота 6

Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметра молекул газу

Мета роботи: визначити експериментально середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекул повітря, досліджуючи його протікання через вузький капіляр.

Прилади і матеріали: прилад для визначення середньої довжини вільного пробігу молекул, водяний барометр, секундомір.

Теоретичні відомості

Довжиною вільного пробігу молекули називають шлях, пройдений молекулою між двома послідовними зіткненнями. Якщо середня кількість зіткнень молекули з іншими молекулами за одиницю часу позначити через ν , а середню арифметичну швидкість – через $\langle v \rangle$, то середня довжина вільного пробігу

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\nu}. \quad (6.1)$$

Молекули ідеального газу є точковими, тобто їхніми розмірами нехтують. Для обчислення середньої кількості зіткнень необхідно враховувати розміри молекул.

Ефективним діаметром d молекули назвемо мінімальну відстань, на яку можуть наблизитися центри двох молекул. Величину

$$\sigma = \pi d^2 \quad (6.2)$$

називають ефективним перерізом молекули. Припустимо, що всі молекули газу, крім однієї, не рухаються. Траєкторія молекули, яка рухається і зазнає випадкових зіткнень з іншими молекулами (зіткнення відбуваються за законами зіткнень пружних куль), має

вигляд ламаної лінії, кожен відрізок якої є довжиною вільного пробігу молекули. За одиницю часу молекула опише лінію, довжина якої чисельно дорівнюватиме середній швидкості $\langle v \rangle$. Побудуємо тепер навколо цієї ламаної лінії, як осі циліндр з поперечним перерізом σ .

Якщо n – кількість молекул в одиниці об'єму, то всередину цього циліндра потрапить $n \langle v \rangle \sigma$ центрів молекул, і це число буде середньою кількістю зіткнень за одиницю часу. Детальніший розрахунок, який враховує рух усіх молекул газу, передбачає множення на $\sqrt{2}$, отже,

$$\nu = \sqrt{2} n \langle v \rangle \sigma. \quad (6.3)$$

Звідси середня довжина вільного пробігу молекул, згідно з (6.1) – (6.3),

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d^2}, \quad (6.4)$$

тобто обернено пропорційна до кількості молекул в одиниці об'єму.

Мета нашої роботи – визначення середньої довжини вільного пробігу й ефективного діаметра молекул повітря шляхом вимірювання його коефіцієнта внутрішнього тертя.

Для вимірювання коефіцієнта внутрішнього тертя можна використати метод витікання рідини чи газу через вузьку капілярну трубку. Об'єм газу V , який протікає крізь вузьку трубку з круглим внутрішнім перерізом за час τ , визначають за формулою Пуазейля:

$$V = \frac{1}{\eta} \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8l}, \quad (6.5)$$

де r – радіус капіляра; l – довжина капіляра; Δp – різниця тиску на кінцях капіляра, який зумовлює протікання газу.

З рівняння (6.5) коефіцієнт внутрішнього тертя

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p \tau}{8lV}. \quad (6.6)$$

Усі величини правої частини рівняння (6.6) доступні для безпосереднього вимірювання, відповідно, ним можна користуватися для експериментального визначення коефіцієнта внутрішнього тертя газу.

Кінетична теорія газів визначає зв'язок між коефіцієнтом внутрішнього тертя газів η , середньою довжиною вільного пробігу молекул газу $\langle \lambda \rangle$ і середньою арифметичною швидкістю $\langle v \rangle$ їхнього руху у такому вигляді:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle, \quad (6.7)$$

де ρ – густина газу. Точніше виведення співвідношення (6.7), що враховує розподіл швидкостей молекул за законом Максвелла, дає інше значення коефіцієнта пропорційності. Наприклад, для повітря співвідношення (6.7) набуває вигляду

$$\eta = \frac{1}{2} \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle. \quad (6.8)$$

Підставимо в цей вираз значення

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}; \quad \rho = \frac{p\mu}{RT}$$

і значення η з рівняння (6.6) і виконаємо елементарні перетворення, отримаємо таку формулу для обчислення середньої довжини вільного пробігу:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{2\pi r^4 \Delta p \tau R T}{8lV \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} p^\mu}, \quad (6.9)$$

де T – абсолютна температура, R – газова стала, μ – молярна маса газу, p – атмосферний тиск.

Різницю тисків на кінцях капіляра, що її спричиняє протікання газу, знаходимо за допомогою водяного барометра (рис. 6.1):

$$\Delta p = (h_2 - h_1) \rho_w g, \quad (6.10)$$

де h_1 і h_2 – рівні водяних стовпців; ρ_w – густина води; g – прискорення вільного падіння.

Отже, остаточна формула для обчислення довжини вільного пробігу молекул повітря така:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\pi r^4 R T (h_2 - h_1) \rho_w g \tau}{4lV \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} p^\mu}. \quad (6.11)$$

Зі співвідношення (6.4) можна визначити ефективний діаметр молекул газу за заданої температури, якщо відомі $\langle \lambda \rangle$ і n .

Кількість молекул в одиниці об'єму визначають з рівняння

$$n = n_0 \frac{PT_0}{P_0T}, \quad (6.12)$$

де n_0 – кількість молекул в одиниці об'єму за нормальних умов (P_0, T_0), так зване число Лошмідта.

З рівнянь (6.4) і (6.12) σ виразимо формулою

$$\sigma = \sqrt{\frac{P_0 T}{\sqrt{2} \pi \langle \lambda \rangle n_0 P T_0}}. \quad (6.13)$$

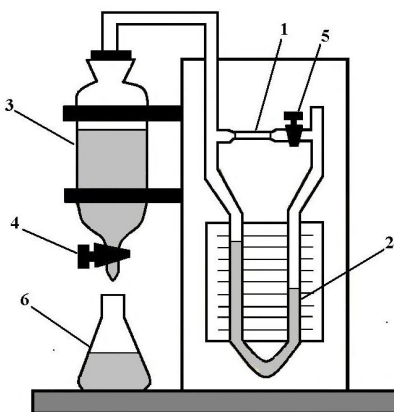


Рис. 6.1. Установка для вимірювання середньої довжини вільного пробігу молекул газу:

- 1 – капіляр;
- 2 – U-подібний водяний манометр;
- 3 – колба з водою;
- 4, 5 – краники;
- 6 – мірний стакан.

Хід роботи

1. Відкрутити краники 4 і 5.
2. Під дією сили тяжіння вода з колби 3 починає натікати в мірний стакан 6. За об'ємом води в стакані 6 визначити об'єм V повітря, що проходить через капіляр 1. Коли набирається 50–70 cm^3 води, закрити краники 4 і 5.
3. Під час проходження повітря через капіляр зняти покази водяного манометра 2, який показує різницю тисків на кінцях капіляра. Для цього зафіксувати рівень стовпців у колінах манометра. Під час проходження повітря через капіляр зафіксувати положення стовпця води у лівому h_2 і в правому h_1 , колінах.
4. Час проходження повітря через капіляр зафіксувати секундоміром.
5. За допомогою формули (6.11) обчислити довжину вільного пробігу молекул повітря $\langle \lambda \rangle$.

Температуру T виміряти термометром, атмосферний тиск – барометром, які є в лабораторії. Значення τ і l наведені на установці.

6. Ефективний діаметр молекул повітря обчислити за формулою (6.13).
7. Дослід повторити декілька разів.

1)

№ $\frac{\zeta}{i}$	$V_3, \text{ м}^3$	$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$\tau, \text{ с}$	$\lambda, \text{ м}$	$\Delta\lambda, \text{ м}$	$E, \%$
---------------------	--------------------	------------------	------------------	-------------------	----------------------	----------------------------	---------

2)

№ $\frac{\zeta}{i}$	$\lambda, \text{ м}$	$\sigma, \text{ м}$	$\Delta\sigma, \text{ м}$	$E, \%$
---------------------	----------------------	---------------------	---------------------------	---------

Контрольні питання

1. Які явища називають явищами перенесення? Чому ці явища так називають?
2. Яку величину називають середньою довжиною вільного пробігу молекул? Як вона залежить від температури газу?
3. Який зв'язок між швидкістю молекул, довжиною вільного пробігу і кількістю зіткнень за одиницю часу?
4. Який зв'язок між $\langle \lambda \rangle$ і P в разі ізотермічного процесу?

Лабораторна робота 7

Визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря та водяної пари

Мета роботи: вивчення дифузії як одного з явищ перенесення; визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари за допомогою швидкості випаровування рідини з капіляра.

Теоретичні відомості

Дифузія – це процес вирівнювання концентрації газів, який супроводжується перенесенням маси відповідного компонента

газу від області з великою концентрацією до області з меншою. Масу компонента газу, яка переміщається внаслідок дифузії через поверхню площею S перпендикулярно до осі OX за час τ , визначають згідно з законом Фіка:

$$M = -D \frac{d\rho}{dx} S \tau, \quad (7.1)$$

де D – коефіцієнт дифузії; $\frac{d\rho}{dx}$ – градієнт густини компонента газу.

Для ідеального газу

$$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v_T \rangle, \quad (7.2)$$

тут $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу молекули; $\langle v_T \rangle$ – середня швидкість теплового руху молекул, $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$.

Розглянемо частково заповнену водою вузьку трубку сталого перерізу S , відкриту з одного боку, вісь X спрямуємо вздовж осі трубки. На межі з водою ($X = 0$) парціальний тиск водяної пари P_{Π} в трубці дорівнює тиску насиченої пари P_H за температури досліду. Тиск водяної пари в трубці змінюється вздовж осі X від значення P_H до P_1 біля відкритого кінця трубки ($X=h$), яке визначене вологістю повітря в лабораторії, відповідно, вздовж осі трубки існує градієнт парціального тиску пари $\frac{dP_1}{dx}$, внаслідок чого в ній виникає дифузійний потік M пари, напрямлений уверх. Густину пари ρ_1 можна виразити через її парціальний тиск, використовуючи рівняння стану ідеального газу:

$$\rho_1 = \frac{m}{V} = \frac{P_1 \mu_1}{RT} \quad (7.3)$$

Підставимо співвідношення (7.3) у формулу закону Фіка (7.1), визначимо масу пари, яка переміщається через площинку поперечного перерізу трубки за 1 с:

$$M_{II} = -D \frac{d\rho_{II}}{dx} S = -\frac{D\mu_{II}}{RT} \frac{dP_{II}}{dx} S \quad (7.4)$$

Якщо знехтувати масою пари, яка переміщається конвекційним потоком, що виникає в трубці, то масу пари M_I можна виразити через швидкість зменшення рівня рідини в капілярі:

$$M_I = \rho_D S \frac{\Delta h}{\Delta \tau}, \quad (7.5)$$

де ρ_D - густина рідини; Δh – зменшення рівня рідини за час $\Delta \tau$. Підставимо вираз у (7.5) у формулу (7.4), отримаємо

$$\rho_D \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = -\frac{D\mu_I}{RT} \frac{dP_I}{dx}. \quad (7.6)$$

Розділимо змінні й проінтегруємо цю рівність; отримаємо:

$$\rho_D RT \frac{\Delta h}{\Delta \tau} \int_0^h dx = -D\mu_I \int_{P_1}^{P_2} dP_I$$

або

$$\rho_D RT \frac{\Delta h}{\Delta \tau} h = -D\mu_I (P_2 - P_1).$$

Звідси

$$D = \frac{\rho_D RT h \frac{\Delta h}{\Delta \tau}}{\mu_I (P_2 - P_1)}, \quad (7.7)$$

де D – коефіцієнт взаємної дифузії; ρ_D – густина рідини (води); R – універсальна газова стала ($R=8,31$ Дж/(моль·К)); h – відстань від поверхні води до верхнього краю трубки; T – температура води в капілярі та повітря в лабораторії; Δh – зменшення рівня рідини за час $\Delta\tau$; μ_f – молярна маса води; P_f – тиск насиченої пари; P_1 – тиск пари, яка зумовлена вологістю повітря в лабораторії.

Формулу (7.7) можна використовувати для експериментального визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари, нехтуючи конвекційним потоком пари, який виникає в трубці. У разі врахування конвекційного потоку отримаємо точнішу формулу для визначення коефіцієнта взаємної дифузії:

$$D = \frac{\rho_D R T h \frac{\Delta h}{\Delta\tau}}{\mu_f P_f \ln \frac{P_0 - P_1}{P_0 - P_i}}, \quad (7.8)$$

де P_0 – атмосферний тиск.

Зазначимо, що за умови $P_0 \approx P_1$ з рівності (7.8) можна дуже просто отримати формулу (7.7).

Для визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари використовують експериментальну установку ФПТ1-4, загальний вигляд якої зображений на рис. 7.1.

Головним елементом установки є мікроскоп 2, на предметному столику якого розміщені робочий елемент 1, що складається з вимірювача, до рухомої частини якого прикріплений корпус з органічного скла. В отворі корпусу розміщена скляна трубка (капіляр) з дистильованою водою.

Для підсвічення трубки під час вимірювання використовують ліхтар, світло від якого потрапляє до робочого елемента по світловоду з органічного скла. Яскравість світіння лампи задають регулятором “Підсвічення капіляру”, знаходиться на передній панелі блока приладу 4.

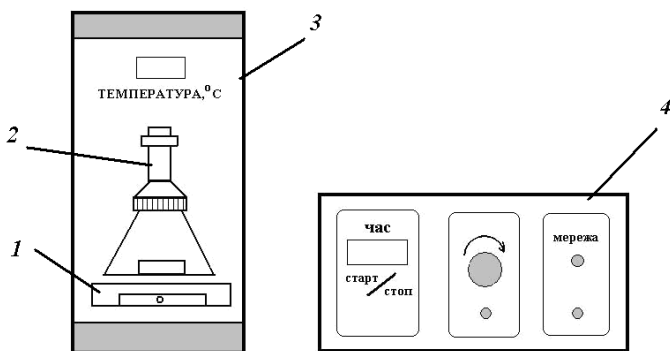


Рис.7.1. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ 1-4.

1 - робочий елемент; 2 – мікроскоп; 3 – блок робочого приладу; 4 – блок приладів.

Час випаровування води з капіляра вимірюють секундоміром, що розміщений у блоці приладів і реєструє й час на цифровому індикаторі “Час”.

Температуру повітря в блоці робочого елемента вимірюють напівпровідниковим термометром, який реєструє на цифровому індикаторі “Температура” блока робочих приладів.

Ціна поділки α окулярної шкали мікроскопа зазначена на робочому столі.

Хід роботи.

1. Зняти захисний кожух з мікроскопа і підвісити його на гвинтах задньої панелі. Тубус мікроскопа поставити в положення, за якого предметний столик з робочим елементом буде розташований вертикально.
2. Переконайтесь у тому, що регулятор підсвічення капіляра в положенні мінімальної яскравості; увімкнути прилад.
3. Регулятором підсвічення капіляра задати вигідне для роботи освітлення. Домогтись чіткого зображення капіляра в мікроскопі.
4. Переміщаючи капіляр обертанням гайки вимірювача, встановити зображення верхнього краю трубки напроти нульової поділки

шкали окуляра мікроскопа. Зняти покази зі шкали вимірювача, визначити рівень h_0 верхнього кінця трубки.

- Обертанням гайки вимірювача встановити зображення меніска рідини напроти нульової поділки шкали окуляра мікроскопа, попередньо домігшись чіткого зображення меніска. Зняти покази зі шкали вимірювача, визначити рівень h_p меніска рідини. Обчислити значення $h = h_p - h_0$.
Значення h , $h_{ж}$ і h_0 записати в таблицю .

№												
$\frac{с}{і}$	$h_0, м$	$h_p, м$	$h, м$	$п, по-діл.$	$\tau, с$	$\Delta p / \Delta \tau, по-діл./с$	$\Delta h / \Delta \tau, м/с$	$P_0, Па$	$T, К$	$P_{нр}, Па$	$P_l, Па$	$D, м^2/с$

- Встановити зображення меніска в нижній частині окуляра мікроскопа, враховуючи, що під час випаровування рідини перевернуте зображення меніска переміщається вгору, записати положення меніска в поділках п шкали й увімкнути секундомір.
- Спостерігати у мікроскоп за рухом меніска рідини через кожні 5 поділок шкали окуляра, значення п і часу τ випаровування рідини записати в таблицю.
- Виконати вісім-десять вимірювань положення меніска. У разі виходу зображення меніска з поля зору необхідно обертанням гайки вимірювача повернути його в початкове положення.
- Виміряти температуру повітря в робочому елементі приладу.
- Встановити регулятор підвіски капіляра в положення мінімальної яскравості, після чого вимкнути прилад. Тубус мікроскопа встановити у вертикальне положення.

Опрацювання результатів

- Побудувати графік залежності кількості поділок p окулярної шкали мікроскопа від часу τ : $p=f(\tau)$ і за нахилом отриманої усередненої прямої знайти середнє значення $\Delta p / \Delta \tau$. Помножити це значення на ціну поділки α окулярної шкали, обчислити середнє значення швидкості випаровування рідини з капіляра $\Delta h / \Delta \tau$.

2. З використанням значення $\Delta h/\Delta t$ за формулою (7.8) чи (7.7) (за рекомендацією викладача) обчислити коефіцієнт взаємної дифузії повітря і водяної пари, враховуючи, що густина води $\rho_p = 10^3 \text{ кг/м}^3$, молярна маса води $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Тиск насиченої водяної пари визначити з таблиці, де наведені залежність тиску P_H і густина ρ насиченої водяної пари від температури, а тиск водяної пари P_1 біля відкритого кінця трубки знайти за значенням відносної вологості ϕ (у відсотках) в приміщенні лабораторії:

$$P_1 = \frac{\phi}{100} P_H .$$

3. Оцінити похибки результатів вимірювань.

Контрольні питання та завдання

1. У чому полягає явище дифузії?
2. Напишіть формулу закону Фіка і поясніть фізичний зміст коефіцієнта дифузії.
3. Напишіть формулу для коефіцієнта дифузії ідеального газу.
4. Що таке парціальний тиск? Як можна визначити тиск суміші газів?
5. Що таке відносна вологість повітря? Як її можна виміряти?
6. У чому полягає метод визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари за допомогою швидкості випаровування рідини з капіляра?
7. Виведіть формулу для визначення коефіцієнта взаємної дифузії.
8. Назвіть основні джерела похибок цього методу вимірювань.

Лабораторна робота 8

Визначення вологості повітря (за точкою роси)

Мета роботи: оволодіти методами визначення абсолютної та відносної вологості за допомогою гігрометра.

Прилади і матеріали: гігрометр Ламбрехта, термометр, гумова груша-помпа, скляний екран, ефір

Теоретичні відомості

Повітря – суміш газів. Відповідно, *атмосферний тиск* – сума парціальних тисків (за законом Дальтона) усіх газів, що міститься в атмосфері, – азоту, кисню, вуглекислого газу, інертних газів тощо.

Оскільки Земля на 2/3 покрита водою, то в атмосфері є водяна пара. Вологість повітря зумовлена наявністю в ньому водяної пари. Маса водяної пари може змінюватися як за абсолютною величиною, так і за ступенем насичення, що, відповідно, характеризують абсолютною і відносною вологістю.

Абсолютна вологість повітря кількісно дорівнює масі водяної пари в грамах, що міститься в 1 м³ повітря, тобто її густині. Коли температура невисока й пара далека від стану насичення, то значення абсолютної вологості визначені парціальним тиском водяної пари в повітрі P_a (виражають в одиницях тиску).

Під відносною вологістю φ слід розуміють відношення абсолютної вологості до маси або до парціального тиску водяної пари, яка насичує простір за тої самої температури. Це відношення виражають у відсотках. Отже,

$$\varphi = \frac{P_a}{P_0} \cdot 100\%, \quad (8.1)$$

де P_a – абсолютна вологість; P_0 – парціальний тиск водяної пари, за якого наявна в повітрі водяна пара стає насиченою, тобто починає конденсуватися на охолодженій поверхні.

Основні способи визначення вологості повітря ґрунтуються на методах точки роси і психрометра.

Вологість повітря методом точки роси визначають за допомогою гігрометра Ламбрехта (рис. 8.1). Цей прилад складається з тонкого металевого полірованого диска 1, на зворотному боці якого є резервуар 5. Резервуар наполовину наповнюють ефіром і вставляють термометр 3 через отвір 4. Через інший отвір за допомогою гумової трубки з грушею 6 продувають повітря.

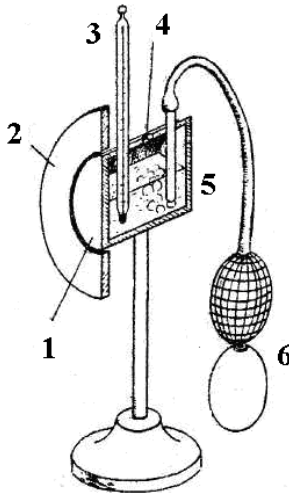


Рис.8.1. Схема гігрометра Ламбрехта.

Ефір швидко випаровує і диск *1* у цьому разі охолоджується. Коли резервуар охолідиться до деякої температури, то блискуча поверхня диска *1* стає порівняно з кільцем *2* матовою внаслідок конденсації водяної пари з повітря. Фіксують температуру T_1 , що відповідає моменту потемніння поверхні диска *1*. Припиняють продування повітря, визначають T_2 , зникнення роси.

Унаслідок теплової інерції температури появи і зникнення роси неоднакові, проте мало відрізняються одна від одної. Для визначення точки роси потрібно взяти середнє арифметичне величин T_1 і T_2 , тобто $T = \frac{1}{2}(T_1 + T_2)$.

$$T = \frac{1}{2}(T_1 + T_2).$$

За відомою точкою роси з таблиць знаходять абсолютну вологість. Відносну вологість визначають за формулою (8.1).

Хід роботи

1. Відокремити гігрометр від спостерігача скляним екраном, поставивши його так, щоб блискучий диск *1* був добре освітлений.

2. Вийняти термометр 3, наполовину наповнити ефіром резервуар гігрометра 5. Поставити термометр на місце.
3. Повільно продуваючи за допомогою груші 6 повітря в гігрометр, уважно стежити за станом кільця 1 та показом термометра. В момент появи легкого серпанку роси на блискучій поверхні кільця 1 припинити продування повітря і зафіксувати температуру T_1 (з точністю до $0,5^\circ\text{C}$).
4. Продовжувати уважно стежити за станом блискучої поверхні кільця 1, у момент зникання роси визначити температуру T_2 (з точністю до $0,5^\circ\text{C}$). Знайти середнє арифметичне значень T_1 і T_2 .
5. Дослід повторити п'ять разів.
6. Визначити температуру повітря в кімнаті T_0 (з точністю до $0,5^\circ\text{C}$).
7. Знайти з таблиці пружності P_a і P_0 пари, що насичує простір за знайдених точок роси T і температури кімнати T_0 .
8. Визначити відносну вологість повітря за формулою (8.1).
9. Обчислити похибки.

Контрольні питання

1. *Що ми розуміємо під терміном пара?*
2. *Яку пару називають ненасиченою; насиченою?*
3. *Що таке точка роси?*
4. *Що таке дефіцит вологості?*
5. *Яке практичне значення має вимірювання вологості повітря?*

Лабораторна робота 9

Вимірювання вологості повітря психрометром

Мета роботи: оволодіти методами визначення абсолютної і відносної вологості за допомогою психрометра Асмана. Визначення сталої психрометра.

Прилади і матеріали: психрометр Асмана, психрометрична таблиця, номограма відносної вологості, піпетка, дистильована вода, барометр-анероїд.

Теоретичні відомості

Якщо взяти два однакові нормальні термометри, кульку одного з яких безперервно змочує вода, то покази обох термометрів відрізнятимуться. Внаслідок випаровування води мокрий термометр показуватиме нижчу температуру, ніж сухий. Чим нижча вологість навколишнього повітря, тим інтенсивніше випаровування і тим нижчі покази мокрого термометра. Значення показів сухого і мокрого термометрів дають змогу визначити вологість повітря.

Аспіраційний психрометр Асмана складається з двох нікельованих трубок, через які за допомогою спеціального вентилятора, розміщеного у верхній частині приладу, з певною сталою швидкістю проходить потік повітря. Всередині цих трубок є два термометри – один сухий, інший змочений. Нікельовані трубки захищають термометри від нагрівання променевою енергією.

Для визначення відносної вологості за допомогою аспіраційного психрометра можна використати номограму відносної вологості (рис. 9.1). Для цього по горизонталі знаходимо цифру, яка відповідає температурі сухого термометра, і цифру, яка відповідає температурі вологого термометра.

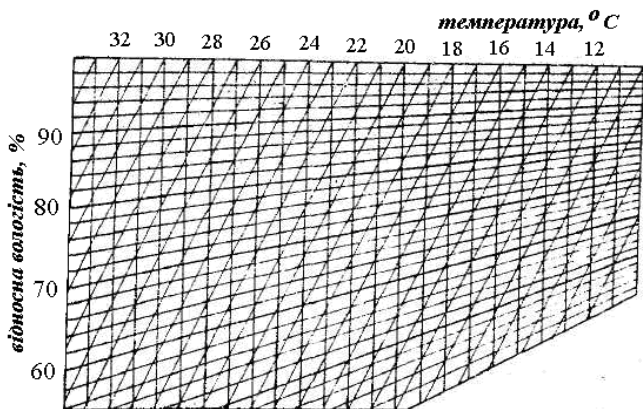


Рис. 9.1. Номограма відносної вологості повітря.

Відносну вологість знаходять за розміщенням точки перетину двох прямих – вертикальної, яка відходить від цифри, що відповідає температурі сухого термометра, і похилої, яка відходить від цифри, що відповідає значенню вологого термометра. Значення відносної вологості подають числами, написаними на вертикальній прямій. Наприклад, сухий термометр показує 22°C, вологий – 17°C, на перетині вертикальної прямої, що відходить від 22°C, і похилої, що відходить від 17°C, знаходимо точку, яка відповідає відносній вологості 58%.

За формулою (8.1), множенням відносної вологості на пружність насиченої пари води за температури досліду (ці дані взяти з таблиць), знаходять абсолютну вологість. Є і готові таблиці, які дають змогу легко знаходити вологість повітря за показами сухого і змоченого термометрів.

Різниця між пружністю пари P_1 , яка насичує простір за температури змоченого термометра, і пружністю пари P_a , яка міститься в повітрі кімнати, пропорційна до різниці температур сухого t_2 і вологого t_1 термометрів, а також атмосферного тиску H :

$$P_1 - P_a = AH(t_2 - t_1). \quad (9.1)$$

Коефіцієнт пропорційності A , так звана стала психрометра, або психрометричний коефіцієнт, залежить від конструкції приладу і дуже сильно – від швидкості руху повітря в межах малих значень швидкості, а в разі великих швидкостей змінюється мало. Психрометр з примусовим рухом повітря називають аспіраційним. У психрометрі Асмана повітря продувають вентилятором зі швидкістю 3–5 м/с.

Із формули (9.1) визначаємо психрометричну сталу A :

$$A = \frac{P_1 - P_a}{H(t_2 - t_1)}. \quad (9.2)$$

Хід роботи:

1. За допомогою піпетки змочити водою батист на резервуарі вологого термометра аспірометра Асмана.
2. Запустити вентилятор, плавно обертаючи ручку заводу.
3. Через 3–4 хв після запуску вентилятора записати покази сухого і вологого термометрів.
4. Досліди повторити в п'яти різних місцях лабораторії по три рази.
5. Знайти відносну вологість повітря за номограмою і таблицею (що на робочому місці студента). За формулою (8.1) обчислити абсолютну вологість повітря в лабораторії.
6. Результати записати у відповідну таблицю.
7. Обчислити сталу психрометра за формулою (9.2).
8. Обчислити похибки.

Контрольні питання

1. *Для чого термометри в аспіраційному психрометрі поміщено в нікельовані металеві трубки?*
2. *На підставі яких відомостей, будують залежність тиску та насиченої пари від температури?*
3. *Чому ми використовуємо залежність тиску насиченої пари від температури для знаходження як абсолютної вологості, так і максимальної?*
4. *Яка розмірність психрометричного коефіцієнта?*
5. *Що таке дефіцит вологості?*
6. *Яке практичне значення має вимірювання вологості повітря?*

Лабораторна робота 10

Визначення критичного стану речовини

Мета роботи: визначити критичну температуру ефіру.

Прилади і матеріали: термостат з прозорими стінками, скляні ампули з досліджуваною речовиною.

Теоретичні відомості

На відміну від ідеального газу, в реальному газі не можна знехтувати власними розмірами молекул газу і силами взаємодії між ними. Ці два чинники є свідченням того, що рівняння стану реального газу відрізняється від рівняння стану ідеального газу. Зокрема, рівняння голландського фізика Ван-дер-Ваальса, яке якісно досить добре описує поведінку маси m реального газу, має вигляд

$$\left(p + \frac{m^2}{\mu^2} \cdot \frac{a}{V^2}\right) \left(V - \frac{m}{\mu} b\right) = \frac{m}{\mu} RT. \quad (10.1)$$

Тут a і b – поправки Ван-дер-Ваальса, сталі для конкретного газу, проте різні для різних газів. Поправка b пропорційна до сумарного власного об'єму молекул одного моля газу. Точніше, це в чотири рази більший власний об'єм числа Авогадро молекул газу. Величину $\frac{a}{V_0^2} = p_i$ називають *внутрішнім тиском*, який існує в об'ємі одного моля газу V_0 внаслідок взаємодії між молекулами (вандерваальсове притягання). Цей внутрішній тиск разом із зовнішнім тиском p (який створюють наприклад, стінки посудини) становить повний тиск $p + \frac{m^2}{\mu^2} \cdot \frac{a}{V^2}$, що існує всередині об'єму газу V .

Рівняння Ван-дер-Ваальса для одного моля газу таке:

$$\left(p + \frac{a}{V_0^2}\right) (V_0 - b) = RT. \quad (10.2)$$

Рівняння (10.2) переходить у рівняння стану ідеального газу за високих температур (тобто в разі значних розріджень), коли поведінка реального газу мало відрізняється від поведінки ідеального.

Рівняння Ван-дер-Ваальса є рівнянням третього степеня відносно V , тобто кожному значенню тиску p за фіксованої температури T відповідає одне (за високих температур) або три (за низьких температур) дійсні значення V . Ті тиск і температура, за яких усі три дійсні корені рівняння (10.2) збігаються, називають *критичним тиском* p_K і *критичною температурою* T_K , а відповідний молярний об'єм – *критичним молярним об'ємом* V_{0K} .

Для кожного газу p_K, T_K, V_{0K} мають цілком певні значення і є константами газу. Вони пов'язані з поправками Ван-дер-Ваальса такими співвідношеннями:

$$T_K = \frac{8a}{27bR}; V_{0K} = 3b; p_K = \frac{a}{27b^2}, \quad (10.3)$$

звідки

$$\frac{p_K V_{0K}}{T_K} = \frac{3}{8} R. \quad (10.4)$$

Критичний стан довільної маси газу m може існувати при p_K і T_K лише в певному об'ємі

$$V_K = \frac{m}{\mu} V_{0K}. \quad (10.5)$$

Це означає, що критичний стан можливий тільки тоді, коли об'єм посудини V_{Π} , у якій міститься маса газу m , дорівнює критичному об'єму V_K . Якщо $V_{\Pi} > V_K$, то рідина, що нагрівається, вся випаровує ще до досягнення критичної температури. Якщо $V_{\Pi} < V_K$, то газ буде скрапленим ще до досягнення критичної температури.

Хід роботи

1. Через регулятор напруги ввімкнути ультратермостат *1* на повільне нагрівання (рис. 10.1).
2. Звернути увагу на положення меніска в рідині, яка знаходиться в запаяній колбі *2*, появу і зникнення критичної опалесценції. Критична температура буде в інтервалі початку та кінця опалесценції. Температуру визначити з допомогою термомпари *3* під'єднаної до мілівольтметра *4*.
3. Аналогічні спостереження проводити під час охолодження. Значення температури в момент появи меніска відповідатиме критичній температурі.
4. Обчислити з формули (10.3) критичну температуру. Значення *a* і *b* наведені на установці. Результат порівняти з отриманим експериментально.

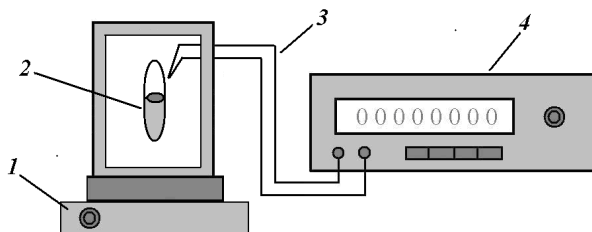


Рис. 10.1. Установка для вивчення критичного стану речовини.

Контрольні питання та завдання

1. Дайте означення реального газу.
2. Що таке критичний стан речовини?

Лабораторна робота 11

Визначення коефіцієнта внутрішнього тертя рідин методом Стокса

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт внутрішнього тертя рідини (в'язкості) методом падаючої кульки, який запропонував Стокс.

Прилади і матеріали: скляний циліндр з рідиною, мікрометр, секундомір, кульки різного діаметра, масштабна лінійка.

Теоретичні відомості

Розглянемо два шари рідини, які рухаються перпендикулярно до осі OZ з різними швидкостями v_1 і v_2 відповідно (рис. 11.1). Дослід доводить, що між шарами виникає сила внутрішнього тертя, пропорційна до градієнта швидкості та площі поверхні шарів, по якій вони дотикаються між собою:

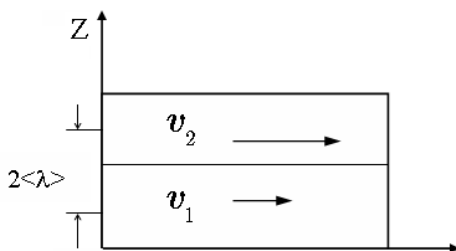


Рис. 11.1. Два шари рідини, які рухаються перпендикулярно до осі OZ з різними швидкостями.

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S. \quad (11.1)$$

Ця формула відома як формула Ньютона для сили в'язкості. Коефіцієнт пропорційності η називають коефіцієнтом в'язкості, який характеризує властивості конкретної рідини. Як видно з (11.1), коефіцієнт в'язкості – це фізична величина, що чисельно дорівнює силі, яка виникає між двома шарами рідини чи газу одиничної площі за градієнта швидкості, що дорівнює одиниці. Коефіцієнт в'язкості вимірюють у Паскалях на секунду (Па·с).

Якщо маленька кулька повільно рухається в рідині, то вона зазнає опору, зумовленого в'язкістю рідини. Причому в цьому випадку спостерігають не тертя кульки до рідини, а тертя окремих шарів рідини між собою: кульку покриває тонкий шар, який рухається зі швидкістю кульки. Наступні, віддаленіші від кульки шари рідини рухаються зі щораз меншими швидкостями. Стокс теоретично довів, що під час падіння кульки в рідині, нескінченній в усіх напрямках, без будь-яких завихрень, силу тертя, що діє на неї, виражає формула

$$F = 6\pi\eta rv, \quad (11.2)$$

де v – швидкість падіння кульки; r – радіус кульки.

На кульку, що падає в рідині, діють три сили:

1) сила земного тяжіння, напрямлена вертикально вниз:

$$F_{\text{тяг}} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{к}} g$$

($\rho_{\text{к}}$ – густина кульки, r – радіус кульки; g – прискорення вільного падіння);

2) сила Архімеда, напрямлена вертикально вгору:

$$F_A = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{\text{р}} g$$

($\rho_{\text{р}}$ – густина рідини);

3) сила опору, напрямлена вертикально вгору:

$$F = 6\pi\eta rv.$$

Запишемо рівняння руху заданої кульки:

$$ma = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{д}}) - 6\pi\eta r v. \quad (11.3)$$

При руску кульки зі збільшенням швидкості зростатиме й сила опору. За деякого значення швидкості v сили, що діють на кульку, зрівноважаться. Рух кульки в цьому випадку буде рівномірним. Тому рівняння (11.3) перепишемо в такому вигляді:

$$0 = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{д}}) - 6\pi\eta r v. \quad (11.4)$$

Звідси коефіцієнт внутрішнього тертя:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{д}}}{v}. \quad (11.5)$$

Кинути кульку в необмеженому середовищі практично неможливо, оскільки рідина завжди міститься в якійсь посудині, що має стінки. Врахування наявності стінок, дна посудини і поверхні рідини під час руху кульки вздовж осі циліндричної посудини приводить до такого виразу для коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{р}}}{v} \frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}} \frac{1}{1 + 3,3 \frac{r}{h}}, \quad (11.6)$$

де R – радіус поперечного перерізу циліндричної посудини; h – висота стовпа рідини в ній. Оскільки $\frac{r}{h}$ для такої установки дуже мале, то для обчислення коефіцієнта внутрішнього тертя можна використовувати простішу формулу:

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{(\rho_{\text{к}} - \rho_{\text{р}})\tau}{l(1 + 2,4 \frac{r}{R})},$$

де l – шлях, який проходить кулька за τ секунд.

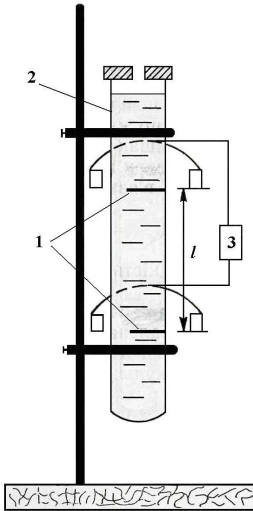


Рис. 11.2. Установка для вимірювання в'язкості рідини методом Стокса.

Хід робіт

1. Виміряти мікрометром діаметри кульок і визначити їхні радіуси.
2. Виміряти відстань між кільцями l на скляному циліндрі 2 з рідиною.
3. Пінцетом опустити кульку в циліндр так, щоб вона падала вздовж осі циліндра. Виміряти секундоміром 3 час падіння кульки між кільцями на скляному циліндрі.
4. Дослід повторити п'ять разів з різними кульками.
5. Визначити коефіцієнт внутрішнього тертя з кожного досліду та знайти середнє значення. Обчислити абсолютну та відносну похибки експерименту.

Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю.

Густини кульок, густина рідини та діаметр циліндра зазначені на установці.

№ $\frac{\rho}{\rho_0}$	r , м	l , м	τ , с	η , Па·с	$\Delta\eta$, Па·с	E , %

Контрольні питання

1. Що таке в'язкість? У яких одиницях вимірюють коефіцієнт в'язкості?
2. Які сили діють на кульку, що падає в рідині?
3. Чому, починаючи з деякого часу, кулька рухається рівномірно?
4. Як змінюється швидкість руху кульки зі збільшенням її діаметра?

Лабораторна робота 12

Визначення та дослідження температурної залежності кінематичної в'язкості рідин за допомогою віскозиметра ВПЖ-12

Мета роботи: визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості деяких рідин віскозиметром ВПЖ-2, та дослідити його залежність від температури.

Прилади і матеріали: віскозиметри ВПЖ-2, нагнітальна помпа, досліджувальні рідини, секундомір, електроплитка, термометр.

Теоретичні відомості

У цій роботі визначаємо коефіцієнт кінематичної в'язкості γ , що пов'язаний з коефіцієнтом динамічної в'язкості η (див. лабораторну роботу № 11) співвідношенням

$$\eta = \gamma\rho, \quad (12.1)$$

де ρ – густина рідини.

У системі СІ коефіцієнт кінематичної в'язкості γ вимірюють у метрах квадратних за секунду ($\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$).

Конструкція віскозиметра ВПЖ-2.

Віскозиметр ВПЖ-2 – це U-подібна трубка зображена на рис.12.1, одне коліно, якої має три розширення 3 і капіляр 4. Друге коліно має резервуар 2, у якому міститься досліджувана рідина, з'єднаний через шланг з помпою 1.

Коліно з трьома розширеннями міститься у спеціальній скляній посудині 5, в яку можна заливати підігріту воду чи проганяти пару через отвори 6.

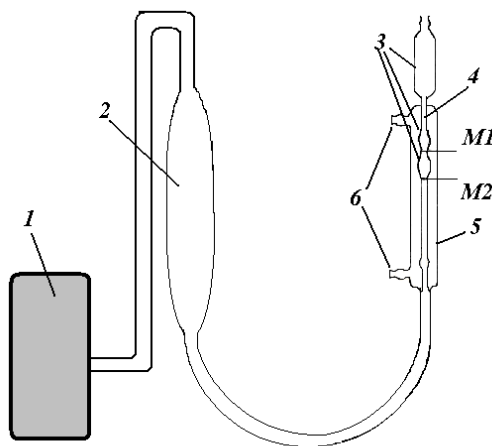


Рис. 12.1. Віскозиметр ВПЖ-2

Хід роботи

1. Налити досліджувані рідини у віскозиметри так, щоб був заповнений резервуар 2.
2. За допомогою помпи 1 нагнати рідину так, щоб верхнє розширення 3 заповнилось до третини свого об'єму.
3. Вийняти шланг з помпи 1 і зафіксувати час проходження меніска рідини між помітками M1 і M2. Дослід повторити декілька разів. Коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини визначають за формулою

$$\gamma = c \cdot t, \quad (12.2)$$

де γ – коефіцієнт кінематичної в'язкості; t – час протікання рідини між позначками $M1$ і $M2$; C – константа, що набуває різних значень, в залежності від діаметра капілярів, об'єму розширення і тощо. (Значення константи наведено на приладі).

4. Визначити абсолютну і відносну похибки результатів вимірювання.

Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю.

Примітки:

- а) вимірювання кінематичної в'язкості виконати для різних рідин;
- б) отримати температурну залежність коефіцієнта кінематичної в'язкості рідин. Для цього нагріти воду за допомогою електронагрівника, температуру визначити за допомогою термометра. Теплу воду залити в посудину через отвір 6, попередньо помістивши досліджувану рідину в розширення 1 і закривши отвір корком 7. Після нагрівання рідини, вийняти корок і зафіксувати час t проходження меніска рідини між позначками $M1$ і $M2$.

Обчислити коефіцієнт кінематичної в'язкості. Дослід повторити для різних температур від -20 до 90 °С;

- в) побудувати графік температурної залежності кінематичної в'язкості рідин, які досліджують.

№ $\frac{C}{i}$	t, c	$\gamma, \frac{i^2}{\bar{n}}$	$\Delta\gamma, \frac{i^2}{\bar{n}}$	$E, \%$
-----------------	--------	-------------------------------	-------------------------------------	---------

Контрольні питання та завдання

1. Поясніть молекулярно-кінетичний механізм в'язкості в рідині.
2. Чому швидкість шару рідини, який прилягає до циліндра, дорівнює нулю?
3. Поясніть різницю залежності коефіцієнта в'язкості від температури в рідинах і газах.

Лабораторна робота 13

Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом відривання краплі

Мета роботи: визначити коефіцієнт поверхневого натягу води методом відривання краплі.

Прилади і матеріали: закріплені на штативі бюретки, дослідні рідини, хімічний стакан, аналітична вага з набором важок.

Теоретичні відомості

На межі поділу фаз за різниці міжмолекулярних взаємодій в обох фазах речовина перебуває в особливому стані, який характеризує поверхневим натягом.

У випадку межі поділу рідина – пара поверхневий натяг характеризує молекулярні сили зчеплення в рідкій фазі. Сумарна сила, яка діє на довільну молекулу всередині рідини, у середньому дорівнює нулю, тоді як на поверхні рідини вона відмінна від нуля і напрямлена всередину рідини. Ці сили зумовлюють додатковий тиск на рідину. Тому молекула, яка виходить на граничний шар, повинна виконати роботу проти сил цього тиску і, отже, її потенціальна енергія буде більшою.

Коефіцієнт поверхневого натягу α чисельно дорівнює роботі на утворення одиниці площі поверхні поділу фаз в оборотному ізотермічному процесі.

Отже молекули поверхневого шару рідини мають певний надлишок енергії, на відміну від молекул, що містяться всередині рідини. Цю надлишкову енергію називають *вільною поверхневою енергією* W . Вільна поверхнева енергія зростає зі збільшенням площі поверхневої рідини $W \sim S$. Якщо розглядати властивості поверхневого шару, то можна переконатися, що коефіцієнт поверхневого натягу чисельно дорівнює вільній поверхневій енергії, віднесеній до одиниці площі поверхні рідини:

$$\alpha = \frac{W}{S}. \quad (13.1)$$

Названими вище вказаними властивостями поверхневого шару рідини зумовлений особливий стан. Подібно до стану натягнутої пружної плівки, рідина прагне зменшити свою поверхню.

Сили поверхневого натягу направлені по дотичній до поверхні рідини і діють перпендикулярно до будь-якої лінії, проведеної на цій поверхні, тобто коефіцієнт поверхневого натягу α чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю довжини довільної лінії l , уявно проведеної на поверхні рідини:

$$\alpha = \frac{F_l}{l}. \quad (13.2)$$

Коефіцієнт поверхневого натягу вимірюють у ньютонках на метр ($\frac{Н}{м}$) або Джоулях на метр квадратний ($\frac{Дж}{м^2}$).

Коли рідина витікає з вертикальної трубки, то на її кінці утворюється поверхнева плівка. Ця плівка розтягується під дією сили тяжіння рідини і набуває сферичної форми. Сила тяжіння тягне рідину вниз, збільшуючи розмір краплі і розтягуючи поверхню; поверхневий натяг намагається зменшити поверхню плівки. В момент відривання краплі її сила тяжіння дорівнює силі поверхневого натягу:

$$mg = F_H. \quad (13.3)$$

Розривання поверхневої плівки під час відривання краплі відбувається по краю шийки капіляра, довжина якого дорівнює πd , де d – діаметр шийки. Тому сила поверхневого натягу рідини:

$$F_l = \pi d \cdot \alpha. \quad (13.4)$$

З (13.3), матимемо

$$mg = \pi d \cdot \alpha, \quad (13.5)$$

звідки

$$\alpha = \frac{mg}{\pi d}, \quad (13.6)$$

де m – маса однієї краплі.

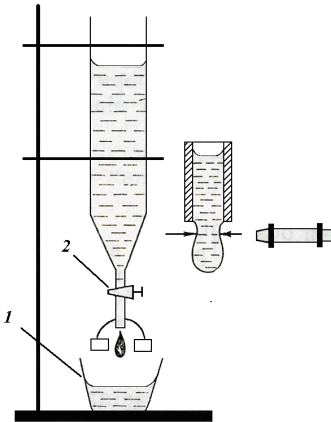


Рис. 13.1. Установка для визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом відривання краплі.

Хід роботи

1. Визначити масу скляної посудини 1 (рис. 13.1) за допомогою терезів.
2. Відкрити кран 2 і відрегулювати його так, щоб рідина, витікаючи, крапала два-три рази за секунду.
3. Підставити скляну посудину 1 і накрapati певну кількість крапель. Зважити посудину з рідиною, відняти масу посудини 1 , поділивши отримане значення на кількість крапель, визначити масу однієї краплі m .
4. Дослід повторити декілька разів для різної кількості крапель.
5. За формулою (13.6) обчислити коефіцієнт поверхневого натягу. Діаметр шийки капіляра зазначений на установці.
6. Обчислити абсолютну і відносну похибки результатів експерименту.
Результати вимірювань та обчислень записати в таблицю.

Примітки

а) для отримання температурної залежності коефіцієнта поверхневого натягу залити в бюретки рідину, попередньо нагрівши її на електроплитці й вимірявши температуру. Дослід виконати декілька разів для різних температур від 20 до 90 °С.

Побудувати графік залежності α від температури;

б) для отримання залежності коефіцієнта поверхневого натягу від концентрації розчину солі NaCl у воді по чергово залити в бюретки розчин різної концентрації. Побудувати графік залежності α від концентрації розчину.

№ $\frac{C}{I}$	N	m , кг	α , $\frac{I}{I}$	$\Delta\alpha$, $\frac{I}{I}$	E, %
--------------------	---	----------	--------------------------	--------------------------------	------

Контрольні питання та завдання

1. Дайте “енергетичне” і “силове” визначення коефіцієнта поверхневого натягу. Які одиниці вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу?
2. Куди напрямлена сила поверхневого натягу?
3. Як залежить коефіцієнт поверхневого натягу від температури?
4. Які чинники впливають на коефіцієнт поверхневого натягу?
5. Поясніть механізм капілярних явищ.

Лабораторна робота 14

Дослідження залежності коефіцієнта поверхневого натягу від температури і концентрації розчину

Мета роботи: поглибити знання про властивості поверхневого шару рідини, дослідивши залежність поверхневого натягу рідин від температури і концентрації

Завдання 1. Визначення залежності коефіцієнта поверхневого натягу від температури.

Прилади і матеріали: спеціальна установка, термометр, електроплитка.

Теоретичні відомості

Визначення залежності коефіцієнта поверхневого натягу від температури (метод Кантора - Ребіндера) полягає в тому, що у досліджувану рідину 2 опускають вертикальну трубку 1, через яку продувають повітря. Вимірюють той найбільший тиск P , за якого з нижнього кінця трубки 1 виділяється бульбашка.

Схема установки показана на рис. 14.1. Наповнений водою аспіратор 3 сполучений трубками з посудиною 4 і манометром 5.

У посудину 4 налита досліджувану рідину 2. Через корок проходить скляна трубка, нижній кінець якої витягнутий, щоб утворився вузький вихідний отвір. Кінець трубки 1 доторкається до поверхні рідини в посудині 4. Посудину 4 розміщують у стакані з водою 6. Температуру води вимірюють термометром 7. Воду в стакані 6 підігрівають плиткою 9.

За допомогою крана 8 вся установка сполучена з атмосферою. Кран 10 слугує для створення розрідження в системі шляхом випускання води з аспіратора 3. Манометром 5 вимірюють надмір атмосферного тиску, необхідного для проштовхування бульбашки повітря через кінчик трубки 1 в рідину, яка міститься в посудині 4.

Коефіцієнт поверхневого натягу обчислюють за формулою

$$\sigma = kP, \quad P = pgh, \quad (14.1)$$

де k – стала приладу; P – надмір тиску, необхідний для проштовхування бульбашки через трубку 1 за певної температури води в посудині 4.

Сталу приладу визначають за формулою

$$k = \frac{\sigma_0}{P_0}; \quad P = \rho gh, \quad (14.2)$$

де σ_0 – коефіцієнт поверхневого натягу дистильованої води за кімнатної (відомої) температури; P_0 – надмір тиску за тієї ж температури.

Отже, для визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини за різних температур використаємо формулу

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{P_0} P = \sigma_0 \frac{h}{h_0}. \quad (14.3)$$

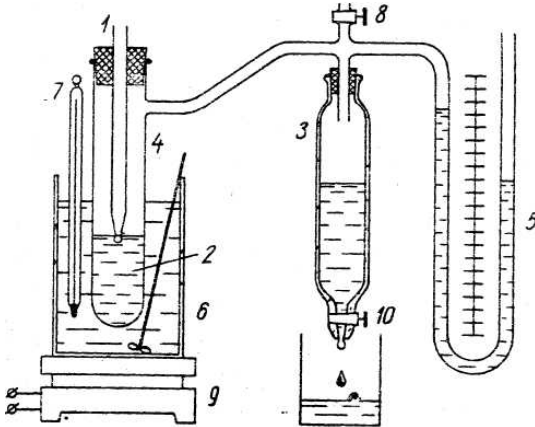


Рис. 14.1. Схема установки для визначення залежності σ (T).

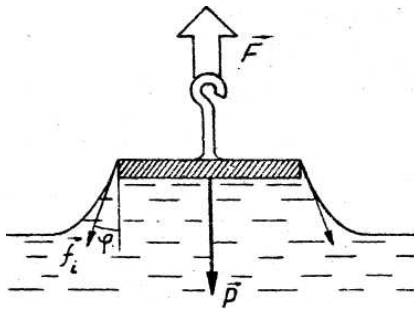


Рис. 14.2. Дія сил поверхневого натягу на пластинку.

Хід виконання роботи:

1. Відкрутити кран 8, який сполучає установку з атмосферою.
2. Переконатись, що рівні рідини в манометрі 5 однакові, закрутити кран 8 та відкрутити кран 10 аспіратора.
3. Усталити певну частоту формування бульбашок у посудині 4, які утворюються на кінці капіляра 1. Зробити не менше п'яти відліків максимальної різниці рівнів рідини h_0 манометра. Знайти середнє значення різниці рівнів.
4. Закрутити кран 10, визначити температуру досліджуваної рідини t_0 .
5. Знайти в таблицях коефіцієнт поверхневого натягу води σ_0 , який відповідає температурі досліді t_0 .
6. Визначити за формулою (14.2) сталу приладу k .
7. Нагріти воду в посудинах 6 та 4 на 10° , постійно її перемішуючи мішалкою (кран 8 відкритий).
8. Закрутити кран 8. Відкрутити кран 10, знову описаним вище способом визначити різницю рівнів h у манометрі за нової температури.
9. За формулою (14.3) обчислити коефіцієнт поверхневого натягу для цієї температури.
10. Дослід проводити через кожні 10° доти доки вода не нагріється до $80 - 90^\circ\text{C}$.
11. За даними досліді побудувати графік залежності коефіцієнта поверхневого натягу води від температури: $\sigma = f(t)$.

Завдання 2. Дослідження коефіцієнта поверхневого натягу, від концентрації розчину

Прилади і матеріали: торсійна вага, пластинки з гачками, розчини води й етилового спирту (різних концентрацій), фільтрувальний папір.

Теоретичні відомості

Розчинення різних речовин у рідині приводить до зміни поверхневого натягу. Якщо розчинити у воді спирти, ефіри, то

поверхневий натяг зменшується. Це зумовлено тим, що розчинена речовина збирається переважно у поверхневому шарі і має менший поверхневий натяг. Такі речовини називають поверхнево-активними. Інші речовини (цукор, різні солі) збільшують поверхневий натяг. Такі речовини концентруються поза поверхневим шаром.

Наше завдання – дослідити залежність коефіцієнта поверхневого натягу розчину етилового спирту у воді. Етиловий спирт має менший коефіцієнт поверхневого натягу, ніж вода, тому розчини різної концентрації будуть мати проміжні значення σ . Використаємо метод визначення сили відривання пластинки від поверхні рідини. Силу відриву визначимо за допомогою торсійної ваги.

Для того, щоб відірвати пластинку від поверхні рідини, необхідно прикласти силу F , не меншу від суми ваги пластинки P і сили f , потрібної для розірвання поверхневої плівки рідини довжиною L , тобто сили поверхневого натягу (рис. 14.2):

$$F = P + f, \quad (14.4)$$

де $f = \sum f_i \cos \varphi = \sigma L \cos \varphi$ – сумарна сила поверхневого натягу, що діє по всій довжині контуру пластинки L . У разі повного змочування кут $\varphi=0$, тому з виразу (14.4) одержимо

$$\sigma = \frac{F - P}{L}. \quad (14.5)$$

Для пластинки у формі круглого диска діаметром d $L = \pi d$, для прямокутної зі сторонами a і b $L = 2(a+b)$, для плоскої фігури іншої форми треба визначити довжину її периметра. Якщо в пластинах є отвори, то визначимо сумарну довжину периметрів отворів і зовнішньої форми плоскої фігури. Наприклад, для шайби із зовнішнім діаметром D і діаметром отвору d $L = \pi(D+d)$.

У випадку відривання плоскої фігури від поверхні рідини на ній залишається краплина, яку втримують сили поверхневого натягу. Тому у формулах (14.4) і (14.5) під P потрібно розуміти вагу пластинки разом з краплиною рідини.

Якщо довжину контуру, по якому відбувається відривання плоскої фігури, визначити важко, то використовують порівняльний метод визначення σ . Цей метод ґрунтується на застосуванні виразу (14.5) до рідини з відомим значенням σ , наприклад, до води. У цьому випадку

$$\sigma_0 = \frac{F_0 - P_0}{L}, \quad (14.6)$$

де F_0 – сила, яку треба прикласти, щоб відірвати пластинку від поверхні еталонної рідини (води); P_0 – вага пластинки з краплиною цієї рідини; σ_0 – її коефіцієнт поверхневого натягу за температури досліду.

З виразів (14.5) і (14.6) одержимо

$$\sigma = \frac{F - P}{F_0 - P_0} \sigma_0. \quad (14.7)$$

Хід роботи:

1. Перевірити правильність установки за рівнем торкщої ваги. Якщо потрібно, встановити її за рівнем.
2. За допомогою аретира вивільнити коромисло торсїї ваги. Важелем перемістити стрілку ваги на нульову позначку. У цьому разі покажчик повинен збігатися з вертикальною рисою в нижній частині шкали.
3. Вимірювання розміри пластинки, виконавши не менше п'яти вимірювань кожної величини.
4. Підвісити пластинку на гачок коромисла торсїї ваги (вага повинна бути в зааретованому стані) й обережно підвести посудину з рідиною до контакту з пластинкою. Закріпити посудину в такому положенні за допомогою гвинта.
5. Обережно пересуваючи важіль, знайти значення сили F відривання пластинки від поверхні рідини. Вимірювання виконати не менше п'яти разів і знайти середнє значення F .
6. Виконати аретування торсїї ваги і за допомогою фільтрувального паперу висушити пластинку. Вимірювання для всіх розчинів відомої та невідомої концентрації.

7. За формулою (14.5) або (14.7) обчислити коефіцієнт поверхнево натягу для всіх розчинів. Побудувати графік залежності $\sigma = \sigma(c)$ і знайти концентрацію C_x розчину, як не зазначена.

Контрольні питання

1. Що називають коефіцієнтом поверхневого натягу?
2. Чому коефіцієнт поверхневого натягу залежить від температури? За якої температури він дорівнює нулю? Чому?
3. Як впливають молекули домішок на коефіцієнт поверхневого натягу чистої рідини? Якими дослідami це можна підтвердити?
4. Які речовини називають поверхнево-активними?
5. Як впливає коефіцієнт поверхневого натягу на міцність твердих тіл?
6. Що потрібно знати, щоб правильно графічно зобразити результати експерименту?

Лабораторна робота 15

Визначення питомої теплоємності рідин відносним методом

Мета роботи: освоїти відносний метод визначення питомої теплоємності рідини.

Прилади і матеріали: досліджувані рідини, два електрокалориметри, два калориметричні термометри, джерело постійного струму.

Теоретичні відомості

Питомою теплоємністю речовини називають фізичну величину, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку потрібно затратити, щоб нагріти 1 кг цієї речовини на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m(T_2 - T_1)}. \quad (15.1)$$

Ця формула справджується у тому випадку, коли теплоємність зі змінною температури змінюється незначно. Точнішу формулу для c можна записати у диференціальному вигляді:

$$c = \frac{1}{m} \frac{\delta Q}{dT}. \quad (15.2)$$

Формула (15.2) визначає теплоємність за кожної заданої температури, а формула (15.1) – середню теплоємність в інтервалі температур від T_1 до T_2 .

У випадку, коли в системі відбуваються тільки теплові явища, тобто якщо енергія від одних тіл до інших переходить шляхом теплообміну, то алгебраїчна сума кількостей теплоти, отриманих і переданих усіма тілами, які беруть участь у теплообміні, дорівнює нулю:

$$Q_1 + Q_2 + Q_2 + \dots + Q_n = 0. \quad (15.3)$$

Останнє рівняння – рівняння теплового балансу – виражає закон збереження енергії для описуваного випадку. Рівняння (15.1) – (15.3) називають калориметричними, вони є вихідними за різних способів вимірювання кількості теплоти і теплоємностей.

Установка для визначення питомої теплоємності рідин складається з двох калориметрів (рис. 15.1) із мішалками і термометрами. В калориметри вміщено послідовно сполучені спіралі з однаковими великими опорами. Один з калориметрів наповнюють рідиною з відомою питомою теплоємністю c_a (дистильована вода), інший – досліджуваною рідиною з питомою теплоємністю c_x . Під час проходження струму в спіралях виділяється однакова кількість теплоти, яка витрачається на нагрівання калориметрів з мішалками та термометрами і рідин.

Кількість теплоти, одержана першим і другим калориметрами, мішалками і рідинами, така:

$$Q_1 = (m_b c_b + m_1 c_1)(T_1' - T_1) + \Delta Q_1; \quad (15.4)$$

$$Q_2 = (m_x c_x + m_2 c_2)(T_2' - T_2) + \Delta Q_2, \quad (15.5)$$

де m_a – маса води; m_x – маса невідомої рідини; m_1, m_2 – маса калориметрів з мішалками; c_a – питома теплоємність води; c_x – питома теплоємність невідомої рідини; c_1, c_2 – питома теплоємність калориметрів з мішалками; $T_{1,2}'$, $T_{1,2}$ – відповідно кінцеві і початкові температури рідин в калориметрах; ΔQ_1 , ΔQ_2 – втрати теплоти в навколишньому середовищі.

Експеримент проводять так, щоб різниці температур $T_1' - T_1$ і $T_2' - T_2$ не перевищували 3 - 4 К, а втрати теплоти в навколишнє середовище були якнайменшими, тому величинами ΔQ_1 і ΔQ_2 можна знехтувати.

Кількість теплоти, що її віддає кожн спіраль під час проходження струму I за час τ , є однаковою, тому ми можемо порівняти Q_1 і Q_2 , звідки отримаємо формулу для обчислення питомої теплоємності невідомої рідини:

$$c_x = \frac{1}{m_x} \left[(m_a c_a + m_1 c_1) \frac{T_1' - T_1}{T_2' - T_2} - m_2 c_2 \right]. \quad (15.6)$$

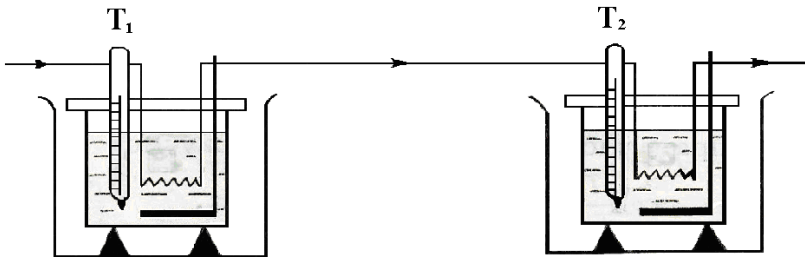


Рис. 15.1. Установа для визначення питомої теплоємності рідин відносним методом.

Хід роботи

1. Наповнити калориметри рідинами.
 2. Зняти покази термометрів T_1 і T_2
- Значення m_b , m_x , m_1 , m_2 , c_b , c_1 , c_2 зазначені на установці.
3. Увімкнути джерело постійного струму.
 4. Коли різниця температур обох рідин усталиться приблизно на $3 \sim 4$ К, зняти покази термометрів T_1' і T_2' .
 5. За формулою (7.6) обчислити c_x .
 6. Обчислити абсолютну і відносну похибки експерименту.
- Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

№	T_1 , К	T_2 , К	T_1' , К	T_2' , К	c_x , Äæ / êä · Ê	Δc_x , Äæ / êä · Ê	E, %
---	--------------	--------------	---------------	---------------	---------------------------	----------------------------------	------

Контрольні питання та завдання

1. Чому в процесі вимірювання необхідно безперервно перемішувати рідини?
2. Як визначити похибку в показах термометра?
3. Дати визначення молярної теплоємності речовини.
4. Пояснити, чому питома теплоємність тої самої речовини в різних агрегатних станах різна.

Лабораторна робота 16

Визначення коефіцієнта об'ємного розширення рідин методом Дюлонга і Пті

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт об'ємного розширення рідин.

Прилади і матеріали: прилад Дюлонга і Пті, нагрівач, термометр, барометр, досліджувані рідини.

Теоретичні відомості

Унаслідок лінійного розширення збільшується об'єм тіла. Розглянемо тіло у вигляді куба з ребром l . Нехай його початковий об'єм за 0°C $V_0 = l^3$. Очевидно, за температури t об'єм тіла можна визначити, за з рівнянням

$$V = l^3(1 + \alpha t)^3 = V_0(1 + \alpha t)^3. \quad (16.1)$$

Підніmemo $(1 + \alpha t)$ до куба і знехтуємо членами, які містять α^2 і α^3 (оскільки вони дуже малі), отримаємо

$$V = V_0(1 + 3\alpha t) = V_0(1 + \beta t), \quad (16.2)$$

де $\beta = 3\alpha$ – середній коефіцієнт об'ємного розширення

Істинний коефіцієнт об'ємного розширення дорівнює

$$\beta = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dt}. \quad (16.3)$$

Дюлонг і Пті запропонували вимірювати β за допомогою методу сполучених посудин. Цей метод ґрунтується на використанні рівноваги двох стовпців рідини, коли рідина в них має різну температуру. У цьому разі розширення посудини не впливає на результат.

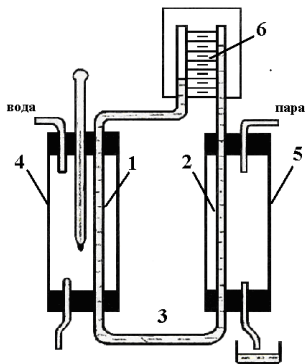


Рис. 16.1. Прилад Дюлонга і Пті.

Прилад Дюлонга і Пті (рис. 16.1) складається з U-подібної трубки 1-2-3, наповненої досліджуваною рідиною. Одне коліно 1 підтримують за температури t_1 завдяки циркуляції води у скляній муфті 4, що охолоджує коліно. Температуру води контролюють термометром. Інше коліно 2 підтримують за температур t_2 водяною паром, яку пропускають через скляну запобіжну муфту 5. Температуру t_2 визначають з таблиць залежності температури кипіння води від тиску (атмосферний тиск вимірюють барометром) або обчислюють за допомогою емпіричної формули

$$t_2 = 100 + 0,0375(P_{\text{атм}} - 760), \quad (16.4)$$

де $P_{\text{атм}}$ – атмосферний тиск, у мм.рт.ст.

Верхні частини трубок 1 і 2 наближені одна до одної. Це зроблено для того, щоб можна було визначити висоту рівнів рідин в трубках h_1 і h_2 за однією шкалою б.

Оскільки температура рідини в стовпцях 1 і 2 різна, то густини рідини теж будуть різними ρ_1 і ρ_2 . Різні також і висоти стовпців рідини h_1 і h_2 .

Очевидно, що

$$h_1 \rho_1 = h_2 \rho_2, \quad (16.5)$$

проте

$$\rho_1 = \frac{m_1}{V_1} = \frac{m_1}{V_0(1+\beta t_1)} = \frac{\rho_0}{1+\beta t_1}, \quad (16.6)$$

аналогічно,

$$\rho_2 = \frac{\rho_0}{1+\beta t_2}, \quad (16.7)$$

де ρ_0 – густина рідини за 0°C .

З рівнянь (16.5) – (16.7) для коефіцієнта об'ємного розширення

$$\beta = \frac{h_2 - h_1}{h_1 t_2 - h_2 t_1}. \quad (16.8)$$

Отже, визначення β зводиться до вимірювання h_1 , h_2 і температур t_1 , t_2 в обох колінах.

Хід роботи

1. Пропускати через скляні муфти воду і пару, доки рівні рідини в трубах не змінюватимуться. У цьому разі треба досягнути якомога більших значень $\Delta h = h_2 - h_1$.
2. Зробити відліки h_1 і h_2 , а також визначити t_1 і t_2 .
3. За формулою (16.8) обчислити коефіцієнт β .
4. Вимірювання виконати для різних рідин і за значенням β й таблицею визначити речовину.
Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

№ $\frac{c}{i}$	h_1 , м	h_2 , м	t_1 , °C	t_2 , °C	α , K ⁻¹	$\Delta\alpha$, K ⁻¹	E, %

Контрольні питання та завдання

1. Пояснити теплове розширення рідини з погляду молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.
2. Який зв'язок між β і α ?

Лабораторна робота 17

Визначення питомої теплоємності металів методом охолодження

Мета роботи: визначити питому теплоємність невідомого металу методом порівняння кінетики охолодження двох зразків, один з яких виготовлений із металу з відомою питомою теплоємністю.

Прилади і матеріали: установка для визначення теплоємності металів, термопара з мілівольтметром і потенціометром, набір зразків.

Теоретичні відомості

Кількість теплоти ΔQ , яку віддає метал масою m під час охолодження на ΔT градусів, визначаються за формулою

$$\Delta Q = mc\Delta T. \quad (17.1)$$

Якщо охолодження відбувається протягом часу $\Delta\tau$, то (17.1) можна записати так:

$$\Delta Q = mc \frac{\Delta T}{\Delta\tau} \Delta\tau, \quad (17.2)$$

де $\frac{\Delta T}{\Delta\tau}$ – швидкість охолодження металу.

Величину ΔQ можна також обчислити на підставі закону охолодження Ньютона:

$$\Delta Q = \alpha(T_i - T_n)S\Delta\tau, \quad (17.3)$$

де α – коефіцієнт теплообміну (тепловіддачі), $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\right]$; S – площа поверхні зразка; T_i і T_n – температури поверхні охолоджуваного зразка і навколишнього середовища.

Привіряємо (17.2) і (17.3), отримаємо

$$mc \frac{\Delta T}{\Delta \tau} = \alpha (T_n - T_c) S \quad . \quad (17.4)$$

Уважають, що величини $\frac{\Delta T}{\Delta \tau}$, α , T_n і T_c , які фігурують у формулах (17.1) і (17.3), не залежать від координат точок зразків металів. Це, звичайно, потрібно забезпечити за умов досліду.

Запишемо вираз (17.4) для двох зразків однакої форми і розмірів (еталонного і досліджуваного) та вважаємо, що $T_{n1} = T_{n2}$, $\alpha_1 = \alpha_2$ (перше наближення) і температура T_c в обох випадках є сталою, поділимо один вираз на інший, отримаємо

$$c_1 = c_2 m_2 \left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_2 \Bigg/ m_1 \left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_1 , \quad (17.5)$$

де $\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_1$ і $\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau} \right)_2$ – швидкості охолодження зразків металу за однакової температури (їх визначають експериментально).

Отже, питому теплоємність досліджуваного металу c_1 можна визначити, порівнюючи швидкість його охолодження зі швидкістю охолодження еталонного зразка. Для цього використовують спеціальну установку, показану на рис. 17.1.

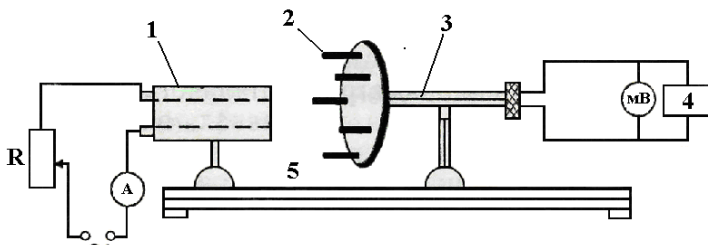


Рис. 17.1. Установка для визначення питомої теплоємності металів методом охолодження.

У кільцевій муфельній печі 1 нагрівають зразки 2, які містять усередині спаї термопари 3, з'єднаної з мілівольтметром і потенціометром 4. Електропіч може вільно переміщатися на підставці 5.

Хід роботи

1. Досліджуваний зразок нагріти в печі до температури 500 – 600 °С (за цим процесом стежимо за допомогою потенціометра).
2. Вийняти зразок з печі, дослідити кінетику його охолодження, урхопивши діаграмну стрічку потенціометра КСП2. На стрічці отримати залежність температури зразка від часу $T = f(\tau)$. Аналогічні дослідження виконати для інших зразків.
3. Визначити швидкості охолодження $\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1$ і $\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2$ з графіків на діаграмній стрічці. Значення зміни температур ΔT для різних зразків виміряти лінійкою, взявши однакові проміжки часу $\Delta \tau$ для обох зразків.
4. За формулою (17.5) визначити c_1 , узявши значення c_2 з таблиці питомих теплоємностей для твердих матеріалів.
5. Обчислити абсолютну і відносну похибки експерименту. Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

№ з/і	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_1$, К/с	$\left(\frac{\Delta T}{\Delta \tau}\right)_2$, К/с	c_1 , Дж/кг·°С	Δc_1 , Дж/кг·°С	Е, %
-------	--------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------	---------------------	----------------------------	------

Контрольні питання

1. Що називають теплоємністю? У яких одиницях її вимірюють?
2. Як на підставі цієї роботи можна перевірити закон Дюлонга і Пті?
3. Чому площі S_1 і S_2 зразків повинні бути однаковими?

Лабораторна робота 18

Визначення коефіцієнта термічного розширення твердих тіл

Мета роботи: експериментально визначити коефіцієнт термічного розширення твердих тіл.

Прилади і матеріали: установка для вимірювання коефіцієнта термічного розширення.

Теоретичні відомості

Теплове розширення твердих тіл пов'язане з характером залежності сил притягання і відштовхування між двома сусідніми частинками від відстані r між ними. Нехай r_0 – рівноважна відстань між сусідніми частинками. В довільний момент часу відстань між ними

$$r = r_0 + x, \quad (18.1)$$

де x – взаємне зміщення частинок від положення рівноваги, зумовлене тепловими коливаннями. З рис. 18.1 видно, що внаслідок різної залежності сил притягання і відштовхування між частинками від відстані r між ними крива залежності взаємної

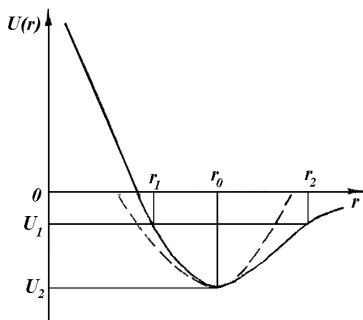


Рис. 18.1 Крива залежності потенціальної енергії взаємодії частинок.

потенціальної енергії W_I від r не є параболічною близько до точки $r = r_0$. Це означає, що сили, які діють у ґратці, не можна вважати квазіпружними. Вони залежать від зміщення x частинок з положення рівноваги не за законом

$$F = -kx, \quad (18.2)$$

де k – коефіцієнт пружності. Вираз, що описує зміщення цих частинок, містить члени з x у другому і вищих степенях. Чим більша амплітуда теплових коливань у кристалічній ґратці, тим сильніший вплив цих нелінійних членів. Однак треба пам'ятати, що збільшення амплітуди коливань з підвищенням температури само по собі ще не означає розширення кристала, якщо ці коливання є строго гармонічними. Насправді, збільшення амплітуди гармонічних коливань двох сусідніх частинок твердого тіла не приведе до збільшення середньої відстані між ними. Річ у тому, що коливання частинок твердого тіла не є гармонічними. В першому наближенні можна вважати, що на частинку діє сил

$$F_x = -kx + bx^2. \quad (18.3)$$

Перший член у формулі (18.3) відображає собою квазіпружну силу, якій відповідає потенціальна енергія $\frac{kx^2}{2}$ гармонічних коливань. Відхилення від гармонічності коливань породжує другий член (bx^2), завдяки якому з підвищенням температури збільшується середня відстань між частинками твердого тіла. Тому коефіцієнт b інколи називають коефіцієнтом ангармонічності.

Отже, розміри більшості тіл з підвищенням температури збільшуються. У разі нагрівання тіла, яке має первинну довжину l , його відносне видовження пропорційне до зміни температури dt :

$$\frac{dl}{l} = \alpha \cdot dt, \quad (18.4)$$

де α – коефіцієнт пропорційності, який називають істинним коефіцієнтом лінійного розширення ($\alpha < 1$). Коефіцієнт лінійного розширення визначає відносне видовження тіла у разі зміни температури на один градус. Практично за невеликих змін температури α змінюється незначно, тому для розрахунків можна користуватися середнім коефіцієнтом лінійного розширення:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta l}{l_1(t_2 - t_1)}, \quad (18.5)$$

де t_1 і t_2 – відповідно, початкова та кінцева температури тіла; l_1 і l_2 – довжини тіла, які відповідають цим температурам.

Довжину тіла за будь-якої температури можна виразити через довжину за 0°C . З формули (18.5)

$$l_t = l_0(1 + \alpha t). \quad (18.6)$$

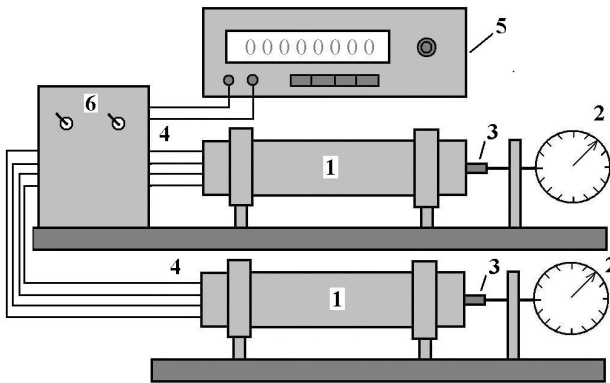


Рис. 18.2. Установка для визначення коефіцієнта термічного розширення твердих тіл

Основною частиною установки (рис. 18.2) є два нагрівники 1 циліндричного типу. На плиті закріплені індикатори 2. Які слугують для вимірювання зміни довжини досліджуваних

стрижнів 3 під час нагрівання за допомогою електричних нагрівників 1. Температуру вимірюють за допомогою хромель-копелевих термопар 4 і реєструють мілівольтметром 5. На панелі розміщені тумблери 6, за допомогою яких вмикають нагрівання печей і вимірювання температури.

Хід роботи

1. Скласти робочу таблицю, у якій записати значення напруги на кінцях хромель-копелевих термопар у мілівольтах, які відповідають температурам, за яких зніматимуть покази видовження досліджуваних стрижнів. Інтервал температур беруть від кімнатної до 100 °С через кожних 5 °С. Таблицю скласти для двох зразків.

№ $\frac{3}{I}$	T, K	U, mV	$\Delta l, m$
-----------------	--------	---------	---------------

2. Встановити в середнє нульове положення тумблери 6, у цьому разі кола живлення печі та вимірювання температури будуть розімкнуті.
3. Встановити індикатори видовження 4, 5 в нульове положення.
4. Штепсельну вилку автотрансформатора увімкнути в мережу з напругою 220 В.
5. Тумблери 6 перевести в крайні ліві положення.
6. Спостерігати за підвищенням температури, записувати у відповідну таблицю значення видовження стрижнів.
7. Переключити тумблери 6 в праве крайнє положення, увімкнути другий нагрівник і виконати відповідні вимірювання для іншого стрижня.
8. За допомогою формули (18.5) отримати значення α для кожної температури.
9. Побудувати графік залежності $\alpha = f(T)$.

Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

№ $\frac{3}{II}$	T, K	$\Delta l, m$	α, K^{-1}	$\Delta\alpha, K^{-1}$	$E, \%$
------------------	--------	---------------	------------------	------------------------	---------

Контрольні питання та завдання

1. Як пояснити з погляду молекулярно-кінетичної теорії теплове розширення тіл?
2. Якими одиницями вимірюють α ?
3. Виведіть точну формулу залежності лінійних розмірів тіла від температури з рівняння (18.4).

Лабораторна робота 19

Вивчення кристалізації металевих сплавів методом кривих охолодження

Мета роботи: експериментально методом кривих охолодження визначити питому теплоємність металевих сплавів та зміну ентропії цього процесу.

Прилади і матеріали: установка для вивчення кристалізації методом охолодження, досліджувані речовини, електронний потенціометр з діаграмною стрічкою.

Теоретичні відомості

Перехід речовини з рідкого стану в твердий відбувається за визначених температури і тиску. Цей процес називають кристалізацією. Процесу кристалізації відповідає зворотний процес плавлення. Плавлення кристалічного тіла відбувається за певної температури, що залежить від зовнішнього тиску, і супроводжується поглинанням теплоти. Цю теплоту називають прихованою теплотою плавлення. Під час кристалізації виділяється теплота кристалізації.

Переходи з газоподібного стану в рідкий, з рідкого стану в твердий належать до фазових переходів першого роду.

Прихована теплота плавлення, співвіднесена до маси речовини, є питомою прихованою теплотою плавлення. Іншими словами, питомою прихованою теплотою плавлення називають

кількість теплоти, необхідну для переходу 1 кг речовини з твердого стану в рідкий за температури плавлення без зміни температури.

Під час нагрівання твердого кристала збільшується амплітуда ангармонічних теплових коливань структурних одиниць (див. Лабораторну роботу 18). Це призводить до послаблення міжструктурних зв'язків і, врешті-решт, – до руйнування кристалічної ґратки, внаслідок чого відбувається зміна агрегатного стану: твердий–рідкий. Якщо змінюють стан системи, то можна визначити зміну функції стану – зміну ентропії. Ентропія є мірою неупорядкованості системи багатьох частинок. Чим вищий ступінь безладу в координатах і швидкостях частинок системи, тим більша імовірність W того, що система перебуватиме в стані безладу. Ентропію S системи визначають як

$$S = k \cdot \ln W, \quad (19.1)$$

де k – стала Больцмана.

Зміна ентропії системи внаслідок оборотного процесу перенесення зі стану A в стан B (які задані, наприклад, значеннями температур і об'ємів)

$$\Delta S = S_B - S_A = \int_A^B \frac{\delta Q}{T} \quad (\text{інтегральне визначення}). \quad (19.2)$$

Отже, ми маємо ще одну фізичну інтерпретацію зміни ентропії – кількість корисної ентропії, яка втрачається у розрахунку на одиницю температури.

Наша мета – визначення температури плавлення, питомої теплоти плавлення та обчислення зміни ентропії в разі охолодження двох сплавів.

Одним із методів визначення температури плавлення $T_{\text{п.е.}}$ є метод зняття кривої плавлення $T = f(\tau)$ за незмінних зовнішніх умов. Оскільки $T_{\text{п.е.}}$ значно залежить від чистоти речовини, то для визначення $T_{\text{п.е.}}$ найчастіше користуються

кінетикою кристалізації (тверднення), тобто – йдеться про зняття кривої тверднення (рис. 19.1.)

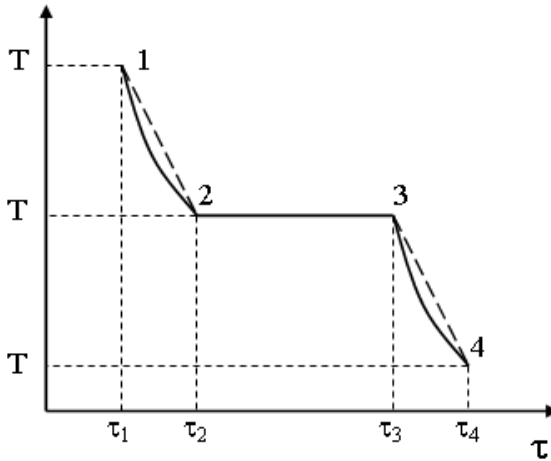


Рис. 19.1. Крива охолодження зразка.

Ділянка 1-2 на рис. 19.1. відповідає охолодженню рідкої фази до початку кристалізації, 2 - 3 – кристалізації зразка, а ділянка 3 - 4 – охолодженню твердого тіла. Температура $T_2 = T_{i.e.}$.

Для визначення питомої теплоти плавлення (кристалізації) реальну криву замінюють ідеалізованою (штрихові лінії).

Криву отримаємо, якщо використовуватимемо установку, зображену на рис. 19.2. Тигель зі сплавом розміщують усередині об'єму нагрівальної печі 1. Сигнал від диференціальної терморпари 2 подають на потенціометр КСП2-016 (3), шкала якого проградуєвана в градусах 4.

Кількість теплоти, що її в середньому передає зразок у рідкому стані з тиглем за одиницю часу;

$$q_1 = \frac{Q_1}{\tau_2 - \tau_1} = (mc + m_1c_1) \frac{T_1 - T_2}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (19.3)$$

де m і c – відповідно, маса і питома теплоємність зразка;
 m_1 і c_1 – відповідно, маса і питома теплоємність тигля.

Кількість теплоти, що виділяється за одиницю часу під час кристалізації зразка (ділянка 2 - 3),

$$q_2 = \frac{Q_2}{\tau_3 - \tau_2} = \frac{\lambda m}{\tau_3 - \tau_2}, \quad (19.4)$$

де λ – питома теплота кристалізації зразка.

Кількість теплоти, що виділяється під час охолодження зразка в твердому стані й тигля (ділянка 3 - 4):

$$q_3 = \frac{Q_3}{\tau_4 - \tau_3} = (mc' + m_1c_1) \frac{T_2 - T_4}{\tau_4 - \tau_3}, \quad (19.5)$$

де c' – питома теплоємність твердого зразка.

Величину q_2 можна визначити як середнє арифметичне значень q_1 і q_3 . (Використовуємо формулу (17.3)). Підставимо (19.3) і (19.5) у цю залежність, після перетворень, якщо $\tau_3 - \tau_2 = \tau_2 - \tau_1 = \tau_4 - \tau_3$, отримаємо

$$\lambda = \frac{1}{2m} \left[(mc + m_1c_1)(T_1 - T_2) + (mc' + m_1c_1)(T_2 - T_4) \right]. \quad (19.6)$$

Зміну ентропії зразка в процесі охолодження і кристалізації обчислюють так:

$$\begin{aligned} \Delta S &= S_4 - S_1 = \int_1^4 \frac{\delta Q}{T} = \Delta S_{21} + \Delta S_{32} + \Delta S_{43} = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} + \int_2^3 \frac{\delta Q}{T} + \int_3^4 \frac{\delta Q}{T} = \\ &= \int_{T_1}^{T_{i\ddot{e}}} cm \frac{dT}{T} + \frac{\lambda m}{T_{i\ddot{e}}} + \int_{T_{i\ddot{e}}}^{T_4} c'm \frac{dT}{T} = \\ &= cm \cdot \ln \frac{T_{i\ddot{e}}}{T} + \frac{\lambda m}{T_{i\ddot{e}}} + c'm \cdot \ln \frac{T_4}{T_{i\ddot{e}}}. \end{aligned} \quad (19.7)$$

Питому теплоту кристалізації (плавлення) можна визначити відносним методом, використовуючи криві охолодження двох зразків (у цьому випадку приймають один з них за еталонний, тобто з відомою $\lambda_{\text{ао}}$):

$$\lambda_{\text{ф}} = \frac{\lambda_{\text{ао}} \cdot m_{\text{ао}} \cdot \tau_{\text{ф}}}{m_{\text{ф}} \cdot \tau_{\text{ао}}}, \quad (19.8)$$

де $\tau_{\text{ф}}$ і $\tau_{\text{ао}}$ – відповідно, час кристалізації зразка й еталона.

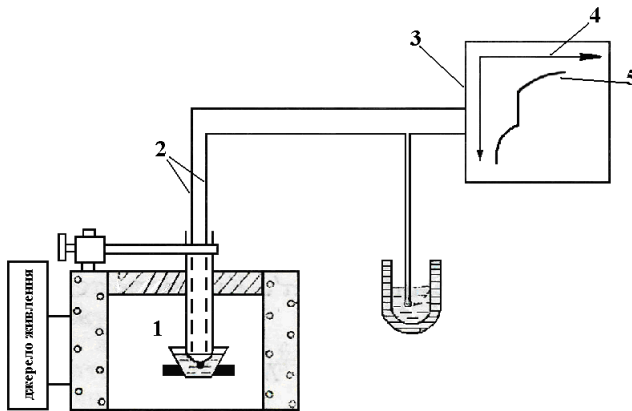


Рис. 19.2. Установа для вивчення кристалізації металевих сплавів методом кривих охолодження

Хід роботи

1. Нагріти зразок у печі 1 до температури $T > T_{\text{тв}}$ й увімкнути самописний потенціометр 3 (див.рис. 19.2) (вимкнувши піч).
2. Отримати криву охолодження, відрізати ділянку стрічки з одержаним графіком 5 (див.рис. 19.1). Щоб знайти точки 1 і 4 (рис. 19.1), потрібно від точок τ_2 і τ_3 зліво і вправо відкласти відрізки, що дорівнюють $\tau_3 - \tau_2$. Визначити з графіка

температури T_1 , T_2 і T_4 , які відповідають точкам 1, 2 (3) і 4, за формулою (19.6) обчислити значення λ .

Значення t , c , t_1 , c_1 , c' зазначені на установці.

3. За формулою (19.7) обчислити зміну ентропії ΔS для процесу охолодження і кристалізації.
4. Повторити аналогічні вимірювання і обчислення для другого зразка.
5. За формулою (19.8) обчислити $\lambda_{\text{ф.}}$ для другого зразка, використовуючи обидві криві охолодження.
Результати вимірювань і обчислень записати в таблиці.

1)

№ с / і	T_1 , К	T_2 , К	T_4 , К	λ , Äæ / êã	$\Delta\lambda$, Äæ / êã	E, %
------------	--------------	--------------	--------------	------------------------	------------------------------	------

2)

№ с / і	T_1 , К	$T_{\text{т.}}$, К	T_4 , К	ΔS , Äæ / Ê	$\Delta(\Delta S)$, Äæ / Ê	E, %
------------	--------------	------------------------	--------------	------------------------	--------------------------------	------

3)

№ с / і	$T_{\text{ф.}}$, ВІДН.ОД.	$T_{\text{д.}}$, ВІДН.ОД.	$\lambda_{\text{ф.}}$, Äæ / êã	$\Delta\lambda_{\text{ф.}}$, Äæ / êã	E, %
------------	-------------------------------	-------------------------------	------------------------------------	------------------------------------------	------

Контрольні питання та завдання

1. Пояснити з погляду молекулярно-кінетичної теорії процес плавлення і кристалізації.
2. Чому плавлення чи кристалізація відбуваються при незмінній температурі?
3. Яку теплоту називають прихованою теплотою плавлення?
4. Що таке "ентропія"?

Лабораторна робота 20

Вивчення явища кристалізації з розчину

Мета роботи: вивчити явище кристалізації з розчину.

Прилади і матеріали: мікроскоп, предметні стекла, набір пересичених розчинів, освітлювач.

Теоретичні відомості

Кристалізація – це утворення кристалів з пари, розчинів, розплавів, із речовини в твердому стані (аморфному чи іншому кристалічному), з електролітів у процесі електролізу, а також під час хімічних реакцій.

Для кристалізації необхідне порушення термодинамічної рівноваги в так званому материнському середовищі – пересичення розчину чи пари, переохолодження розплаву і тощо. Перенасичення чи переохолодження необхідні для кристалізації, характеризують відхиленням температури, концентрації, тиску, електричного потенціалу між фазами від їхніх рівноважних значень.

У більшості випадків швидкість кристалізації зростає зі збільшенням відхилення від рівноваги.

Кристалізація – фазовий перехід (першого роду) речовини зі стану переохолодженого (пересиченого) материнського середовища в кристалічну фазу, якій властива менша вільна енергія. Надлишковий тепловміст виділяється у вигляді прихованої теплоти кристалізації (див. Лабораторна робота 19). Частина цієї теплоти може перетворюватись у механічну роботу.

Переохоложене середовище може довго зберігати, не кристалізуючись, нестійкий метастабільний стан. Однак у разі досягнення деякого граничного для конкретних умов критичного переохолодження в рідині чи парі утворюється багато маленьких кристаликів – зародків кристалізації. Критичне переохолодження

залежить від температури, концентрації, складу середовища, його об'єму, наявності сторонніх частинок – центрів кристалізації (пилинок, кристаликів інших речовин тощо, на яких утворюються зародки), від матеріалу і стану поверхні стінок посудини, інтенсивності перемішування, дії випромінювання та ультразвуку.

Кристали (від грец. *krystallos* – лід) – це тверді тіла, які мають тривимірну періодичну атомну структуру і, за рівноважних умов утворення, природну форму правильних симетричних багатогранників. Основна ознака кристалічного стану – ґраткова атомна структура (кристалічна ґратка).

Атомну структуру кристалів описуються як сукупність у просторі однакових елементарних комірок, які повторюються і мають форму паралелепіпеда з ребрами a , b , c (періодами кристалічної ґратки). Довжини ребер a , b , c і кути α , β , γ між ними вимірюють рентгенографічно. Осі координат вибирають за певними правилами залежно від симетрії кристалів. Відповідно до симетрії кристалів є 230 різних способів розміщення частинок у кристалах.

Великі ідеальні монокристали вирощують з пересичених розчинів і переохолоджених розплавів, уводячи в них невеликі кристалики для затравки та не допускаючи самовільного зародження.

Більшість твердих тіл має дрібнокристалічну структуру, тобто складається з великої кількості хаотично розміщених один щодо одного кристалів, що зрослися. Такі тверді тіла називають *полікристалічними*.

Найпростіша форма кристалів – багатогранник, причому розміри окремих граней значно залежать від умов росту. Звідси – пластинчасті, голкові, ниткоподібні та інші форми кристалів. Під час росту великих огранених кристалів з нерухомого розчину (без перемішування) пересичення вище біля вершин і ребер кристала та менше в центральних частинах грані. Тому вершини стають провідними джерелами шарів росту. Якщо пересичення над центральними ділянками граней достатньо мале, то вершини обганяють центри граней. Плоска грань перестає існувати – виникають скелетні й так звані деревоподібні (дендритні) форми кристалів. Їхній появі сприяють також деякі домішки.

Реальні кристали завжди мають неоднорідний розподіл домішок. Домішки змінюють параметри кристалічної ґратки і на межах областей різного складу виникають внутрішні напруження. Це призводить до утворення дефектів – дислокацій і тріщин.

У цій роботі спостерігатимемо за кристалізацією з перенасиченого розчину.



Рис. 20.1. Мікроскоп за допомогою якого спостерігають за кристалізацією з перенасиченого розчину.

Хід роботи

1. Старанно протерти шматинною предметне скло 1 (рис. 20.1) і крапнути на нього невелику краплину пересиченого розчину 2 (солі, маргановоокислого калію).
2. Увімкнути освітлювач 3, спостерігати через мікроскоп за появою та подальшим ростом кристалів.
3. Зарисувати побачену картину за стадіями росту і появи нових кристалів, а також загальний вигляд у полі зору мікроскопа.
4. Повторити дослід з іншим розчином.

Контрольні питання та завдання

1. Який процес називають кристалізацією?
2. Від яких чинників залежить швидкість росту кристалів?
3. Пояснити, використовуючи власні зарисовки, різну форму кристаликів.

Лабораторна робота 21

Визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл відносним методом

Мета роботи: експериментально визначити теплопровідність твердих тіл.

Прилади і матеріали: прилад для визначення теплопровідності з шістьма термопарами, потенціометр з самописцем, циліндричні зразки з дюралюмінію й латуні, торцева піч.

Теоретичні відомості

Якщо тіло нагріте нерівномірно, то виникає процес перенесення кількості теплоти від більш нагрітих ділянок до менш нагрітих. Коли передавання теплоти не супроводжується перенесенням речовини, то процес називають теплопровідністю. Молекулярно-кінетична теорія речовини пояснює цей процес так. Оскільки температура – міра кінетичної енергії молекул, то різниця температур двох ділянок тіла свідчить про те, що кінетична енергія молекул у цих ділянках різна. Тому молекули двох сусідніх шарів, зіштовхуючись, переносять свою кінетичну енергію із шару в шар. Якщо процес стаціонарний і температура змінюється від шару до шару рівномірно, то кількість теплоти, яка передається через шар речовини товщиною l за час dt (рис. 21.1) виражає залежність

$$dQ = \chi \frac{T_1 - T_2}{l} dSt, \quad (21.1)$$

де $T_1 - T_2$ – різниця температури між перерізами A і B , S – площа поперечного перерізу тіла. Рівняння (21.1) називають рівнянням Фур'є. Коефіцієнт пропорційності χ називають коефіцієнтом теплопровідності. Величина $\frac{T_1 - T_2}{l}$ це зміна температури за одиницю довжини у напрямі передавання теплоти, її називають градієнтом температури. Якщо чисельно прийняти $S = 1$, $\frac{T_1 - T_2}{l} = 1$, то $Q = \chi$, тобто коефіцієнт теплопровідності чисельно дорівнює кількості теплоти, яка проходить через одиничну площину, перпендикулярну до потоку теплоти, за одиницю часу із градієнтом температури, що дорівнює одиниці. Точніше коефіцієнт теплопровідності залежить від температури, однак для невеликих визначених інтервалів температур його можна вважати сталим.

Серед методів вимірювання теплопровідності найбільшого використання набули стаціонарні, відмінною рисою яких є незмінність у часі розподілу температур у зразку (стаціонарність теплового потоку). Стаціонарні методи поділяють на абсолютні та відносні. Абсолютні методи пов'язані з вимірюванням теплового потоку через зразок, а також з урахуванням або неврахуванням теплових втрат з бокової поверхні. Це складне завдання, а тому в багатьох випадках використовують відносні методи вимірювання теплопровідності.

У разі застосування відносних методів потік з одного джерела тепла l пропускають через досліджуваний зразок 2 і еталон 3 з відомою теплопровідністю. Після усталення стаціонарного теплового режиму на еталоні 3 та зразку l виникають відповідні перепади температур, значення яких зумовлене теплопровідністю. Тоді з урахуванням формули (21.1) теплопровідність еталона та зразка будуть

$$\chi_{\text{вд.}} = Q / \tau \cdot l_{\text{вд.}} / S_{\text{вд.}} \cdot \Delta T_{\text{вд.}}^{-1}; \quad (21.2)$$

$$\chi_{\text{ет.}} = Q / \tau \cdot l_{\text{ет.}} / S_{\text{ет.}} \cdot \Delta T_{\text{ет.}}^{-1}. \quad (21.3)$$

Співвідношення коефіцієнтів теплопровідностей

$$\chi_{\hat{a}\hat{o}} / \chi_{\hat{c}\hat{o}} = l_{\hat{a}\hat{o}} / l_{\hat{c}\hat{o}} \cdot S_{\hat{c}\hat{o}} / S_{\hat{a}\hat{o}} \cdot \Delta T_{\hat{c}\hat{o}} / \Delta T_{\hat{a}\hat{o}} \quad (21.4)$$

Оскільки геометричні розміри всіх циліндрів однакові, то формула (21.4) набуде вигляду

$$\chi_{\hat{a}\hat{o}} / \chi_{\hat{c}\hat{o}} = \Delta T_{\hat{c}\hat{o}}' / \Delta T_{\hat{a}\hat{o}}' = \Delta T_{\hat{c}\hat{o}}'' / \Delta T_{\hat{a}\hat{o}}'', \quad (21.5)$$

де $\Delta T_{\hat{a}\hat{o}}' = T_5 - T_6$; $\Delta T_{\hat{a}\hat{o}}'' = T_9 - T_{10}$ – перепад температури на верхньому та нижньому циліндрах, $\Delta T_{\hat{c}\hat{o}} = T_7 - T_8$ – перепад температури на зразку (середньому циліндрі). Отже, теплопровідність обернено пропорційна до перепаду температури.

Хід роботи.

1. Увімкнути торцеву піч I .
2. Увімкнути потенціометр з самописцем 4 і отримати графіки залежності $T = f(\tau)$ для кожної точки на еталонах і зразку.
3. Відрізати діаграмну стрічку. Виміряти перепад температури на еталоні та зразку.
4. За допомогою формули (21.5) обчислити обрахунок $\chi_{\hat{c}\hat{o}}$.
Значення $\chi_{\hat{a}\hat{o}}$ взяти з таблиць.
5. Результати вимірювань і обчислень записати в таблицю.

№ \hat{c} / \hat{i}	$\Delta T_{\hat{c}\hat{o}}$, К	$\Delta T_{\hat{a}\hat{o}}$ К	$\chi_{\hat{c}\hat{o}}$ $\hat{A}\hat{o} / \hat{i} \cdot \hat{E}$	$\Delta \chi_{\hat{c}\hat{o}}$ $\hat{A}\hat{o} / \hat{i} \cdot \hat{E}$	Е, %

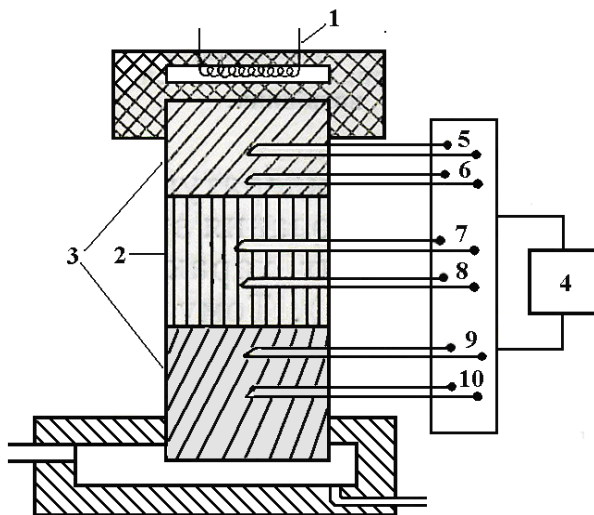


Рис. 21.1. Установка для вимірювання коефіцієнта теплопровідності відносним методом

Контрольні питання та завдання

1. Пояснити явище теплопровідності з погляду молекулярно-кінетичної теорії.
2. Що таке “фонон”?
3. Чому метали ліше проводять тепло, ніж діелектрики?

Лабораторна робота 22

Дослідження фазових переходів

Мета роботи: дослідження фазових переходів першого роду експериментальними методами.

Прилади і матеріали: електропіч, тигель, диференціальна термопара хромель - копель, досліджуваний метал, потенціометр ПП-63.

Завдання 1. Визначення температури плавлення кристалічних тіл

Плавлення і кристалізація є фазовими переходами першого роду, які супроводжуються зміною питомого об'єму і відбуваються за сталої температури. Характерною особливістю фазового переходу першого роду є виділення або поглинання певної кількості тепла. Температура фазового переходу залежить від тиску. Як звичайно, температури плавлення речовин у довідкових таблицях наводять для нормального атмосферного тиску $P_0 = 101\,325$ Па.

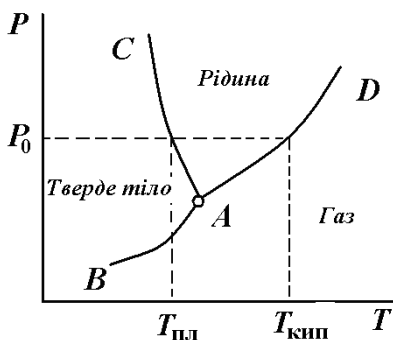


Рис. 22.1. Діаграма тиск-температура

Якщо кількість фаз хімічно однорідної речовини, які перебувають у рівновазі, дорівнює трьом, то стан цієї речовини на діаграмі стану в координатах $P - T$ можна зобразити точкою перетину A трьох ліній рівноваги (рис. 22.1): AB – лінія сублімації, AC – лінія плавлення, AD – лінія випаровування. Лінії рівноваги поділяють площину PT на три ділянки, яким відповідає певний агрегатний стан речовини – твердий, рідкий та газоподібний.

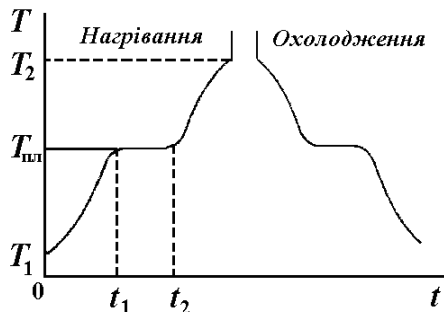


Рис. 22.2. Крива нагрівання–охолодження кристалічного твердого тіла

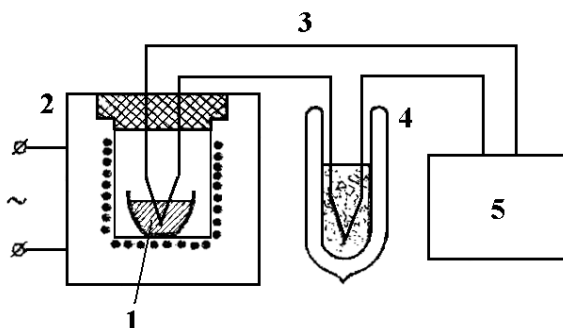


Рис. 22.3. Схема установки для знаходження точки плавлення легкоплавких металів

З рис. 22.1 видно, що за певних тисків речовина з підвищенням температури може переходити з твердого відразу в газоподібний стан (сублімація). Для легкоплавких металів, які досліджують у цій роботі, діаграма стану така, що потрібна точка лежить значно нижче від атмосферного тиску P_0 , тому під час нагрівання агрегатний стан металу буде змінюватися відповідно до рис. 22.1. На рис. 22.2 показано, як буде змінюватись температура кристалічного тіла, якщо до нього рівномірно підводити теплоту.

Температура T_1 тіла під час нагрівання буде підвищуватися, доки не досягне температури плавлення $T_{пл}$. Хоча тепло підводиться весь час рівномірно, температура протягом якогось проміжку часу $t_1 - t_2$ буде сталою. Енергія протягом цього часу витрачається на підсилення теплових коливань атомів у вузлах кристалічної ґратки і на руйнування ґратки. Кількість теплоти, необхідної для плавлення 1 кг речовини за температури плавлення, називають питомою теплотою плавлення.

Точку плавлення визначаємо за допомогою установки, схема якої зображена на рис. 22.3. Досліджуваний метал 1, поміщений у тигель, ставлять в електропіч 2. Один зі спаїв диференціальної термопари 2 поміщають у тигель з металом, а другий – у термос 4 із сумішшю води з льодом. Термопару приєднуєть до потенціометра 5, за допомогою якого вимірюють ерс термопари. Температуру визначають за допомогою градуювального графіка.

Хід робіт

1. Увімкнути піч в електромережу, записати час вмикання (годину і хвилину).
2. У термос 4 помістити лід або сніг і трохи води. Коли лід буде танути, у термосі тривалий час підтримуватиметься температура $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.
3. Переконатися, що спаї диференціальної термопари поміщено відповідно з рис. 22.3. Відрегулювати робочий струм потенціометра і виміряти е.р.с. термопари. За градуювальним графіком знайти температуру, записати час і значення температури.
4. У разі досягнення температури, що на $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ нижча від точки плавлення (визначає викладач), температуру і час записувати щохвилини у таблицю. Поблизу точки плавлення температура протягом деякого часу буде сталою.
5. Коли температура знову явно почне підвищуватися, вимкнути електропіч. Вона почне охолоджуватись. Продовжити відлік температури і часу, поки температура не досягне $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.
6. За даними вимірювань побудувати криву нагрівання й охолодження металу на міліметрівці. Визначити температуру плавлення $T_{пл}$ з одержаного графіка. Порівняти одержане значення $T_{пл}$ для заданого металу з табличним і пояснити причину відмінності.

Завдання 2. Дослідження залежності температури кипіння води від тиску

Прилади і матеріали: спеціальна установка, що містить помпу Комовського, манометр, нагрівник, систему охолодження, термометр.

Як видно з рис. 22.1 (крива *AD*), рівновага рідкої і газоподібної фаз можлива за різних температур і тисків. Інакше кажучи, температура кипіння рідини залежить від тиску, власне, підвищується з підвищенням тиску. Експериментально цю залежність можна дослідити за допомогою установки, зображеної на рис. 22.4.

Скляну колбу *1* з водою нагрівають електроплиткою. Температуру в ній вимірюють термометром *2*. Конденсатор Лібиха *5* охолоджують водою з резервуара *3* і він за допомогою помпи *4* забезпечує замкнутий цикл. Стабілізатор тиску *6* приєднаний до манометра *7* і помпи Комовського *8*.

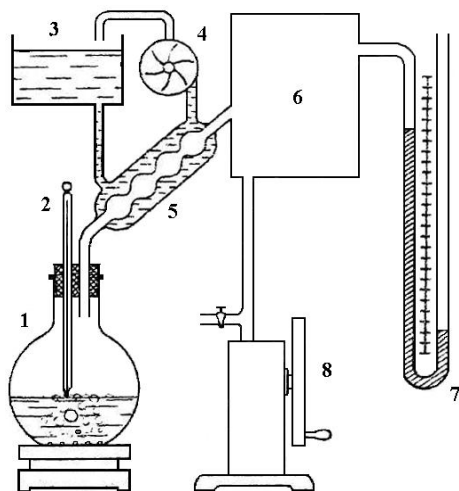


Рис. 22.4. Схема установки для дослідження залежності температури кипіння від тиску.

Хід робіт

1. Увімкнути електроплиту в електромережу.
2. Відкачати повітря з системи, наскільки це можливо для установки. Записати показ манометра ΔP . Тиск у колбі різний $P_0 - \Delta P$.
3. Коли вода а колбі почне кипіти, зробити декілька відліків температури за термометром 2 і записати їх.
4. За допомогою крана 9 обережно впустити в систему трохи повітря, щоб тиск підвищився приблизно на 50 мм рт. ст. Записати нове значення ΔP .
5. Знайти температуру кипіння води за нового значення тиску.
6. Продовжувати вимірювання, як описано в пунктах 3-5, аж доки тиск в колбі не буде дорівнювати атмосферному P_0 .
7. За одержаними даними побудувати графік залежності температури кипіння води від тиску.

Контрольні питання та завдання

1. Яку систему називають гомогенною?
2. Що таке фаза? З якої кількості і з яких фаз може складатися система?
3. Які бувають фазові переходи і чим їх характеризують?
4. Записати і пояснити рівняння Клапейрона–Клаузіуса.
5. Чому вуглекислоту називають “сухим льодом”?
6. Що таке потрійна точка?

Лабораторна робота 23

Вивчення статистичних закономірностей у системі багатьох частинок

Мета роботи: експериментальне вивчення закономірностей, властивих системам з великою кількістю частинок. Ознайомлення з розподілом Гауса та максвелівським розподілом частинок за швидкостями

Завдання 1. Вивчення закону нормального розподілу за допомогою дошки Гальтона

Прилади і матеріали: дошка Гальтона, сипкий матеріал: горох, пшоно, свинцевий дріб тощо.

Теоретичні відомості

Як відомо, усі матеріальні тіла складаються з атомів і молекул, тобто є системами великої кількості частинок; закономірності, що спостерігають у таких системах багатьох частинок, описують за допомогою математичної статистики. На відміну від динамічного закону, який описує можливість, що з необхідністю повинна реалізуватися, статистичний закон визначає широкий діапазон можливостей для поведінки окремого елемента з їхньої великої сукупності. Кожен окремих елемент цієї сукупності повинен реалізовувати одну можливість зі згаданого діапазону, однак яку саме з погляду статистичного закону байдуже. Він лише визначає певну ймовірність кожного з можливих видів випадкової поведінки. Отже, статистичні закони описують поведінку всієї сукупності елементів загалом.

Найпоширенішим у природі законом розподілу випадкових величин є закон нормального розподілу Гауса. Він виконує тоді, коли випадкова величина залежить від багатьох чинників, що можуть з однаковою ймовірністю витримувати як додатні, так і від'ємні відхилення. Найпоширенішим прикладом такого розподілу може бути розподіл випадкових похибок у разі вимірювання фізичних величин.

Функція розподілу густини ймовірності за законом Гауса

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}\right], \quad (23.1)$$

де \bar{x} – середнє значення вимірюваної величини; x – значення, одержане внаслідок окремого вимірювання; σ – середнє квадратичне відхилення (дисперсія);

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (23.2)$$

Наочне уявлення про розподіл Гауса дають досліди з дошкою Гальтона. Частинки, зазнаючи випадкових відхилень від вертикалі, розподіляються в комірках так, що відтворюють закон нормального розподілу.

Хід роботи:

1. Знімні секції дошки Гальтона закріпити гладким боком усередину приладу. У цьому випадку розсіяння частинок буде відбуватися на невеликій кількості цвяшків. Через лійку сипати частинки, доки середня комірка не наповниться майже цілковито. Записати висоту шару частинок у кожній комірці і побудувати графік залежності $H_i = f(x_i)$, де x_i – відстань i -тої комірки від середини приладу.
2. Перевернути нижню знімну секцію цвяшками всередину приладу і виконати те саме з тією ж кількістю частинок. Результат відобразити на графіку.
3. Перевернути верхню знімну секцію цвяшками всередину приладу і виконати знову дослід. Пояснити відмінність графіків.
4. Узяти 30–50 зернин і по одній кидати їх у лійку. Розподіл зерен по комірках у цьому випадку визначати за кількістю частинок у комірці. Результати нанести на той самий графік.
5. За наявності частинок іншого розміру виконати описані вище досліди з ними. Пояснити одержаний результат.

Завдання 2. Вивчення розподілу Максвелла

Прилади і матеріали: спеціальна установка, міліметровий папір.

Теоретичні відомості

Якщо в замкнутій посудині міститься газ за сталої температури T , то в такій системі усталюється термодинамічна рівновага, яку характеризує певний розподіл молекул газу за швидкостями. Відносна кількість частинок, швидкості яких є в інтервалі від v до $v+dv$, визначена функцією розподілу Максвелла:

$$\frac{dn}{n} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT} \right) v^2 dv. \quad (23.3)$$

Такому розподілу підлягають електрони, які вириваються з поверхні металу внаслідок термоелектронної емісії. Електронний газ має температуру розжареного катода, яку можна змінювати, змінюючи струм розжарення. Якщо електрони змусити проходити через затримувальне поле, то за деякої різниці потенціалів U_3 вплив поля зможуть подолати тільки ті електрони, кінетична енергія яких задовольняє умову

$$\frac{mv^2}{2} \geq eU_3, \quad (23.4)$$

де e – заряд електрона; m – його маса.

Звідси можна знайти максимальну швидкість електронів, що їх затримує різниця потенціалів U_3

$$v \geq \sqrt{\frac{2eU_3}{m}}. \quad (23.5)$$

Якщо змінювати значення затримувального потенціалу, то можна одержати функцію $\bar{n}_v = f(\sqrt{U_3})$, похідна якої за $\sqrt{U_3}$ є розподілом Максвелла за швидкостями.

Цю роботу виконують на установці, схема якої зображена на рис. 23.1. Джерелом електронів є термокатод за температури розжарення T , а джерелами затримувальної та прискорювальної напруг - відповідні напруги випрямляча ВУП-2м, гальванічно не

пов'язані між собою. Температуру катода може змінювати зміною струму розжарення лампи-пентода 2 Ж27 Л.

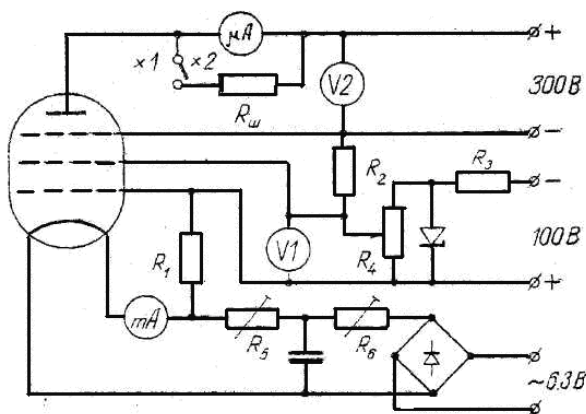


Рис. 23.1. Схема установки для зняття розподілу Максвелла

Хід роботи

1. Увімкнути блок живлення макета ВУП-2м у мережу і встановити струм розжарення катода 180 мА, прогріти протягом 5 - 7 хв.
2. Змінювати затримувальну напругу U_3 від 0 до - 2В через 0,1В, дослідити залежність $I_a = f(U_3)$. Результати записати в таблицю. Залежність $I_a(U_3)$ зняти три рази і визначити середнє, значення.

U_3 , В	$\sqrt{U_3}$	$I_p=190mA$				$I_p=195 mA$				$I_p=200mA$			
		I_{a_1}	I_{a_2}	I_{a_3}	$\bar{I}_a,$ $i\bar{e}\bar{a}$	I_{a_1}	I_{a_2}	I_{a_3}	$\bar{I}_a,$ $i\bar{e}\bar{a}$	I_{a_1}	I_{a_2}	I_{a_3}	$\bar{I}_a,$ $i\bar{e}\bar{a}$
0,1													
0,2													
2,0													

3. За даними таблиці побудувати графік $I_a = f(\sqrt{U_3})$ для трьох струмів розжарення.

4. Продиференціювати функцію $I_a = f(\sqrt{U_3})$ графоаналітичним методом. Для цього графік функції $I_a = f(\sqrt{U_3})$ розбити вертикальними прямими на частини через однакові проміжки $\Delta(\sqrt{U_3})$. Через точки перетину цих прямих з графіком провести горизонтальні відрізки. В одержаних таким способом трикутниках гіпотенуза є криволінійною, а вертикальний катет – приростом ΔI_a на відповідному проміжку $\Delta(\sqrt{U_3})$. Відкласти ці прирости від осі $(\sqrt{U_3})$ на тому ж графіку, одержуємо ступінчасту ламану. Потім провести криву, стежачи за тим, щоб криволінійні трикутники в межах однієї сходинки ламаної мали однакові площі. Ця крива і буде графіком похідної

$$f_1(\sqrt{U_3}) = \frac{\partial I_a}{\partial(\sqrt{U_3})}, \quad (23.6)$$

яка після нормування збіжиться з розподілом Максвелла. Для нормування залежності (23.6) треба найбільше значення функції прийняти за одиницю, а інші значення поділити на найбільше. Скласти таблицю нормованих значень функції (23.6) і побудувати графік, відкладаючи по осі абсцис значення $\sqrt{U_3} / \sqrt{U_{30}}$ де U_{30} – затримувальна напруга, яка відповідає максимуму функції (23.6), а по осі ординат – нормоване значення функції (23.6). Графіки будувати на міліметровому папері.

Контрольні питання та завдання

- 1. Що таке ймовірність випадкової події?*
- 2. Якими законами описують системи багатьох частинок?*
- 3. Дайте означення термодинамічної системи. Що таке мікро- і макростан системи?*

4. *Опишіть експериментальні методи визначення швидкостей молекул.*
5. *За якими законами розподіляються швидкості молекул газу в стані рівноваги? Як змінюється ця залежність з підвищенням температури?*
6. *Що таке найімовірніша швидкість? Від чого вона залежить?*
7. *Чому площі під кривими розподілу Максвелла для різних температур однакові?*

Додатки

Головні фізичні сталі

Гравітаційна стала

$$\gamma = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{кг} \cdot \text{с}^2$$

Універсальна газова стала

$$R = 8,314510 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$$

Стала Больцмана

$$k = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$$

Стала Авогадро

$$N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

Число Лошмідта

$$N_L = 2,686754 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

Маса спокою електрона

$$m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

Маса спокою протона

$$m_p = 1,6726231 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Маса спокою нейтрона

$$m_n = 1,6749286 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Елементарний електричний заряд

$$e = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

Атомна одиниця маси

$$a.o.m. = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

Швидкість поширення світла у вакуумі

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Електрична стала

$$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$$

Магнітна стала

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} \cdot \text{м}$$

Стала Планка

$$h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

Число Фарадея

$$F = 9,648456 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$$

Додаток 1

Густина твердих тіл за температури 20 °С

Речовина	$\rho \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$	Речовина	$\rho \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$
Алюміній	2,71	Мідь	8,9
Вольфрам	19,1	Скло	2,5
Граніт	2,8	Платина	21,5
Залізо	7,8	Свинець	11,3
Золото	19,3	Срібло	10,5
Латунь	8,6	Титан	4,5
Лід	0,9	Цинк	7,1

Додаток 2

Густина рідин ρ за температури 20 °С

Рідина	$\rho \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$	Рідина	$\rho \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$
Ацетон	0,8	Гас	0,8
Бензин	0,7	Ртуть	13,6
Бензол	0,88	Етиловий спирт	0,79
Гліцерин	1,26	Ефір	0,72
Соляр	1,0	Морська вода	1,02

Додаток 3

Густина газів ρ за нормальних умов ($T = 273 \text{ К}$, $P = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$)

Газ	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$	Газ	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{ кг/м}^3$
Азот	1,25	Кисень	1,429
Аміак	0,77	Метан	0,717
Водень	0,089	Неон	0,900
Вуглекислий газ	1,977	Повітря	1,293
Гелій	1,178	Пропан	2,200
Хлор	3,220		

Додаток 4

Теплофізичні коефіцієнти твердих тіл

Матеріал	$c, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\lambda, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	$t_{\text{пл}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$r, 10^5 \text{ Дж}/\text{кг}$
Алюміній	896	200,6	660	3,37
Залізо	465	58,5	1539	2,77
Золото	130	-	1063	0,66
Лід	2090	2,5	0	3,35
Мідь	385	384	1083	1,8
Парафін	3220	0,21	38-56	1,5
Свинець	130	34,7	327	0,25
Срібло	234	422,2	960,8	1,04
Олово	218	65	232	0,60
Платина	134	70	1769	2,05

Примітка: c – питома теплоємність за температури $20 \text{ }^\circ\text{C}$; λ – коефіцієнт теплопровідності; $t_{\text{пл}}$ – температура плавлення; r – питома теплота плавлення.

Пружні властивості твердих тіл

Матеріал	$E, 10^5 \text{ Па}$	$G, 10^{10} \text{ Па}$	$\sigma_{\mu}, 10^8 \text{ Па}$	μ
Алюміній	6,1 – 7,4	2,2 – 2,6	0,98 – 3,90	0,33
Залізо	20 – 22	6,9 – 8,3	3,9 – 5,9	0,28
Сталь	20 – 22	7,8 – 8,1	4,9 – 15,7	0,28
Латунь	7,8 – 9,8	2,6 – 3,6	0,98 – 4,90	0,3 – 0,4
Мідь	10 – 13	3,8 – 4,7	1,56 – 4,41	0,31 – 0,40
Свинець	1,5 – 1,7	0,54	0,0196	0,44

Примітка: E – модуль Юнга; G – модуль зсуву; σ_{μ} – межа міцності; μ – коефіцієнт Пуассона.

Коефіцієнт лінійного теплового розширення
твердих тіл в інтервалі 0–100 °С

Речовина	$\alpha, 10^{-6} \text{ К}^{-1}$	Речовина	$\alpha, 10^{-6} \text{ К}^{-1}$
Алмаз	1,3	Ніхром	18,0
Алюміній	23,8	Олово	26,7
Бронза	17,5	Платина	9,0
Вольфрам	4,5	Полістирол	75,0
Залізо	12,2	Поліетилен	200,0
Золото	14,2	Свинець	29,0
Кварцове скло	0,6	Срібло	19,5
Латунь	18,4	Сталь	11,7
Мідь	16,5	Цинк	29,0
Молибден	5,2	Нікель	13,0

Швидкість поширення звуку в різних середовищах

Середовище	v , м/с	Середовище	v , м/с
Азот (0 °С)	333	Вода (0 °С)	1 407
Водень (0 °С)	1 286	Вода (20 °С)	1 482
Вуглекислий газ (0 °С)	260	Алюміній (20 °С)	6 400
Гелій (0 °С)	970	Залізо (20 °С)	5 930
Кисень (0 °С)	314	Латунь (20 °С)	4 600
Повітря (сухе; 0 °С)	331	Мідь (20 °С)	4 950
		Скло (20 °С)	5 800

Деякі фізичні характеристики рідин

Рідина	$t_{\text{кип}}$, °С	r , 10^5 Дж/кг	c , Дж/(кг·К)
Бензол	80,2	3,94	2 090
Вода	100	22,6	4 190
Гліцерин	290	-	2 390
Ртуть	356,7	2,85	138
Спирт етиловий	78,3	8,57	2 390

Примітка: $t_{\text{кип}}$ – точка кипіння за $p_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па; r – питома теплота пароутворення за температури кипіння; c – питома теплоємність за температури 20 °С.

Коефіцієнт поверхневого натягу на межі рідина–повітря за температури 20 °С

Рідина	$\sigma, 10^3 \text{ Н/м}$	Рідина	$\sigma, 10^3 \text{ Н/м}$
Ацетон	23,3	Гліцерин	65,7
Бензол	28,9	Ефір	17,1
Вода	72,7	Етиловий спирт	22,3
Гас	28,9	Ртуть	465,0

Коефіцієнт внутрішнього тертя деяких рідин і газів

Рідина (за 20 °С)	$\eta \cdot 10^3, \text{ Па}\cdot\text{с}$	Газ (за 0 °С)	$\eta \cdot 10^6, \text{ Па}\cdot\text{с}$
Ацетон	0,322	Азот	17,5
Бензол	0,673	Водень	8,8
Вода	1,005	Гелій	19,6
Етиловий спирт	1,2	Кисень	20,2
Гліцерин	1 480	Метан	10,8
Рицинова олія	970	Повітря (сухе)	18,2
Ртуть	1 590	Вуглекислий газ	14,7

Коефіцієнт об'ємного теплового розширення деяких рідин

Рідина	$\beta, 10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	Рідина	$\beta, 10^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
Азотна кислота	1,24	Етиловий спирт	1,10
Ацетон	1,43	Ефір	1,62
Бензин	1,00	Сірчана кислота	0,55
Бензол	1,06	Толуол	1,08
Вода	0,18	Ртуть	0,181
Гас	0,96		

Список літератури

1. *Авдусь З.И., Архангельский М.М., Кошкин Н.И.* Практикум по общей физике. М., 1971.
2. *Базаров И.П.* Термодинамика. М., 1976.
3. *Берг Л.Г.* Введение в термографию. М., 1969.
4. *Булкин П.С., Попова Н.Н.* Общий физический практикум. Молекулярная физика. М., 1988.
5. *Гапчин Б.М., Дутчак Я.Й., Френчко В.С.* Молекулярна фізика. Лабораторний практикум. Львів, 1990.
6. *Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И.* и др. Температурные измерения: Справ. Киев, 1984.
7. *Геращенко О.А., Федоров В.Г.* Тепловые и температурные измерения. Справ. Руководство. Киев, 1965.
8. *Гордов Л.Н.* Основы пирометрии. М., 1971.
9. *Дутчак Я.Й.* Молекулярна фізика. Львів, 1973.
10. *Евrafoва Н.Н., Казан В.Л.* Руководство к лабораторным работам по физике. М., 1970
11. *Кикоин А.К., Кикоин И.К.* Молекулярная физика. М., 1976.
12. *Клим М.М., Якібчук П.М.* Молекулярна фізика. Львів. 2003.
13. *Кучеренко Е.Т.* Справочник по физическим основам вакуумной техники. Киев, 1981.
14. *Линевег Ф.* Измерения температур в технике: Справ. М., 1980.
15. *Матвеев А.Н.* Молекулярная физика. М., 1987.
16. Международная практическая температурная шкала 1968 р. (МПТШ-68). Редакция 1975. М., 1976.
17. *Прохоренко В.Я., Паздрій І.П.* Фізичні властивості металів: Навч.-метод. посібник. Львів, 1976.
18. *Радченко І.В.* Молекулярна фізика. Х., 1958.
19. *Сірий Є.І., Ченур Д.В., Довгошей М.І.* Загальний фізичний практикум. Львів, 1964. Ч. 2.
20. Физический практикум /Под ред. В.И. Ивероной. М., 1962.
21. Фізичний практикум /За ред. В.П. Душенка К., 1981. Ч.1.
22. *Шульце Г.* Металлофизика. М., 1971.

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

ЯКІБЧУК Петро Миколайович,
КОРОЛИШИН Андрій Володимирович

МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА
Лабораторний практикум

Навчальний посібник

Рекомендовано
Міністерством освіти і науки України

Редактор *М.М. Мартиняк*
Технічний редактор *С.З. Сенік*
Корректор *І.Ю. Василяйко*
Комп'ютерне верстання *Л.М. Семенович*

Формат 60 x 84/16 Умовн. друк. арк. 7,5.
Тираж 500. Зам.

Видавничий центр Львівського національного
університету імені Івана Франка,
79000 Львів, вул. Дорошенка, 41.