

**Міністерство освіти і науки України
Кіровоградський державний педагогічний університет
імені Володимира Винниченка**

Царенко О.М., Сальник І.В., Подопрігора Н.В., Гур'євська О.М., Антонова Н.Г.

**Лабораторний практикум
з курсу загальної фізики**

частина 2

Молекулярна фізика

навчально-методичний посібник

Кіровоград – 2010

ББК 22.31

Л12

УДК 621.016.

Лабораторний практикум з курсу загальної фізики : Навчально-методичний посібник. Частина 2. Молекулярна фізика : [для студ. вищ. навч. закл.] / [Царенко О.М., Сальник І.В., Подопригора Н.В., Гур'євська О.М., Антонова Н.Г.]; под. ред. О.М.Царенка та І.В.Сальник. – Кіровоград : РВВ КДПУ ім. Володимира Винниченка, 2010. – 96 с.

Рецензенти: **Садовий Микола Ілліч** – доктор педагогічних наук, професор кафедри фізики та методики її викладання;

Волчанський Олег Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики та методики її викладання.

У посібнику описано рекомендації щодо виконання лабораторних робіт фізичного практикуму з молекулярної фізики. Тематику і зміст робіт узгоджено з галузевим стандартом вищої освіти за напрямом підготовки 6.040203 Фізика* та навчальної програми курсу загальної фізики. / Укладачі: Шут М.І., Горбачук І.Т., Сергієнко В.П. – К. : НПУ, 2005. – 45 с.

При підготовці посібника використано матеріали: Фізичного практикуму / за ред. В.П.Дущенко – К. : Вища школа, 1981. – 246 с.; Лабораторного практикума по общей физике / под ред. Е.М.Гершензона и М.М.Малова. – М. : Просвещение, 1985. – 351 с.; Методичних вказівок до лабораторних робіт з курсу загальної фізики. Ч.2. Молекулярна фізика і вступ до термодинаміки / Укладачі: Волков Л.О., Каленнікова Т.О, Ткачук І.Ю. – Кіровоград : КДПІ, 1991. – 64 с. та лабораторні роботи з молекулярної фізики віртуальної лабораторії «L-мікро».

Для студентів вищих навчальних закладів, які вивчають курс загальної фізики.

Рекомендовано до друку методичною радою Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка (протокол № 4 від 15 грудня 2010 року)

© Антонова Н.Г., Гур'євська О.М., Подопригора Н.В., Сальник І.В., Царенко О.М.

Похибки вимірювань фізичних величин і обробка одержаних результатів

Вимірюванням називають операцію, яка полягає у порівнянні на досліді даної величини з деяким її значенням, прийнятим за одиницю порівняння, і поданні результату у числовій формі із зазначенням його точності.

Похибка вимірювання – відхилення результату вимірювання від істинного значення вимірюваної величини.

Похибки вимірювань зумовлені різними причинами, їх поділяють на систематичні, випадкові та промахи.

1. Похибки прямих вимірювань

Числове значення вимірюваної величини визначається як середнє арифметичне числових значень великої кількості вимірювань:

$$a_{\text{cp}} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_n}{n}$$

де a_1, a_2, \dots, a_n – числове значення окремих вимірювань; n – їхня кількість.

Значення шуканої величини приблизно дорівнює знайденому середньому значенню всіх її вимірювань: $a \approx a_{\text{cp}}$.

Щоб вказати межі, між якими перебуває справжнє значення шуканої величини, а також щоб визначити якість вимірювання, вводять відповідно поняття про середню абсолютну та середню відносну похибки.

Абсолютними похибками окремих вимірювань називаються абсолютні значення різниць:

$$\begin{aligned} |\Delta a_1| &= |a_0 - a_1|, \\ |\Delta a_2| &= |a_0 - a_2|, \\ &\dots \quad \dots \quad \dots \\ |\Delta a_n| &= |a_0 - a_n|. \end{aligned}$$

Середньою абсолютною похибкою називають середнє арифметичне з абсолютних похибок усіх окремих вимірювань:

$$\Delta a_{\text{cp}} = \frac{|\Delta a_1| + |\Delta a_2| + \dots + |\Delta a_n|}{n}.$$

Середньою відотною похибкою називають відношення середньої абсолютної похибки до середнього значення шуканої величини:

$$E = \frac{\Delta a_{\text{cp}}}{a_{\text{cp}}} \cdot 100\% .$$

Абсолютні та відносні похибки сталих величин дорівнюють нулю.

Результат вимірювань записують за формулою:

$$a = a_{\text{cp}} \pm \Delta a_{\text{cp}} ; E = k\% .$$

Коли потрібно точніше вказати межі, в яких перебуває значення шуканої величини, користуються ймовірною похибкою.

2. Похибки посередніх вимірювань

Похибки посередніх вимірювань визначаються за похибками безпосередньо виміряних величин. Безпосередньо вимірювані величини вважатимемо аргументами, а посередньо вимірювані – функціями:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) .$$

Якщо x_1, x_2, \dots, x_n – безпосередньо вимірювані фізичні величини, а $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ – їхні абсолютні похибки, то для окремих видів функцій $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ шукані похибки визначаються за формулами, наведеними у таблиці 1.

У багатьох випадках доцільніше спочатку визначити межу відносної середньої похибки, а потім з виразу $\Delta y_{\text{cp}} = E \cdot y_{\text{cp}}$ відшукати абсолютну похибку і записати результат:

$$y = y_{\text{cp}} \pm \Delta y_{\text{cp}} ; E = k\% .$$

Виконувати обчислення з точністю, більшою, ніж це дозволяють експериментальні дані, нераціонально.

Під час розрахунків з наближеними числами слід користуватися наступними правилами:

- в остаточному результаті залишати стільки значущих цифр, скільки їх має найкоротше з даних наближених чисел;
- в результатах усіх проміжних дій залишати на одну значущу цифру більше, ніж в остаточному результаті;
- середня абсолютна похибка встановлює межі і визначає число значущих цифр середнього значення шуканої величини. Слід, наприклад, записати $d = (8,4 \pm 0,2) \text{ г/см}^3$, а не $d = (8,375 \pm 0,2) \text{ г/см}^3$.

Таблиця 1.

Математична операція	Похибки	
	Абсолютні Δy	Відносні $\Delta y/y$
$y = x_1 + x_2 + x_3$	$\pm (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3)$	$\pm \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3}{x_1 + x_2 + x_3}$
$y = x_1 - x_2 - x_3$	$\pm (\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3)$	$\pm \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3}{x_1 - x_2 - x_3}$
$y = x_1 \cdot x_2$	$\pm (x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1)$	$\pm \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} \right)$
$y = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	$\pm (x_1 x_2 \Delta x_3 + x_1 x_3 \Delta x_2 + x_2 x_3 \Delta x_1)$	$\pm \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} + \frac{\Delta x_2}{x_2} + \frac{\Delta x_3}{x_3} \right)$
$y = k \cdot x$	$\pm k \Delta x$	$\pm \frac{\Delta x}{x}$
$y = x^n$	$\pm n \cdot x^{n-1} \Delta x$	$\pm n \frac{\Delta x}{x}$
$y = \sqrt[n]{x}$	$\pm \frac{1}{n} x^{\frac{1}{n}-1} \Delta x$	$\pm \frac{\Delta x}{n \cdot x}$
$y = \frac{x_1}{x_2}$	$\pm \frac{x_1 \Delta x_2 + x_2 \Delta x_1}{x_2^2}$	$\pm \left(\frac{\Delta x_1}{x_1} - \frac{\Delta x_2}{x_2} \right)$
$y = \sin x$	$\pm (\cos x) \Delta x$	$\pm (\operatorname{ctg} x) \Delta x$
$y = \cos x$	$\pm (\sin x) \Delta x$	$\pm (\operatorname{tg} x) \Delta x$
$y = \operatorname{tg} x$	$\pm \frac{\Delta x}{\cos^2 x}$	$\pm \frac{2 \Delta x}{\sin 2x}$
$y = \operatorname{ctg} x$	$\pm \frac{\Delta x}{\sin^2 x}$	$\pm \frac{2 \Delta x}{\sin 2x}$
$y = \ln x$	$\pm \frac{\Delta x}{x}$	$\pm \frac{\Delta x}{x \ln x}$

Лабораторна робота №1

Визначення основних точок термометра

Мета роботи: перевірити основні точки термометра. За допомогою досліджуваного термометра виміряти температуру середовища.

Прилади і матеріали: термометр, штатив, прилад для визначення точки кипіння води, посудина для визначення точки плавлення льоду, калориметр, електроплитка, барометр, дрібний товчений чистий лід (або сніг), дистильована вода.

Короткі теоретичні відомості

Спостереження і досліди показали: якщо два тіла, параметри яких є сталими привести у тепловий контакт, то їх стани будуть змінюватись до тих пір, доки між ними не встановиться рівновага. Ця рівновага означає, що система з двох тіл має спільні параметри, які з часом не будуть змінюватись. Будь-який процес, що відбувається самочинно, без зовнішніх впливів, закінчується термодинамічною рівновагою.

У фізиці загальну кількісну міру всіх форм руху при їх перетворенні з однієї форми в іншу називають енергією.

Систему, що не обмінюється з зовнішніми тілами ні енергією ні речовиною називають *ізолюваною*.

В термодинаміці постулюється, *що нерівноважна ізолювана система самочинно за деякий час обов'язково приходить до стану термодинамічної рівноваги і не може самостійно вийти із нього – це основний постулат термодинаміки.*

Якщо привести у взаємодію дві раніше ізолювані рівноважні системи A і B , то між ними почнеться обмін енергією й частинками і через деякий час устанеться новий рівноважний стан об'єднаної системи AB .

Повинен існувати деякий параметр, що характеризує ступінь відмінності рівноважного стану системи A від стану системи B , а отже й інтенсивність процесу переходу системи до рівноважного стану. Цей параметр назвали *температурою*.

Таким чином, *температура* [*лат*] *temperatura* – правильне співвідношення, нормальний стан] – це універсальна характеристика рівноважних систем, що показує відхилення рівноважного стану даної системи від рівноважного стану умовно вибраної еталонної системи.

Вважається, що система, яка віддає енергію при взаємодії має вищу температуру, ніж та система, яка цю енергію поглинає. Після встановлення рівноважного стану, в обох системах, температура стане однаковою.

Вимірювання і контролювання температури (термометрія) – одна з найпоширеніших у науці й техніці вимірювальних операцій. Всі внутрішні параметри системи є функціями температури $b_i = f(T)$. Цей принцип використовується для вимірювання температури, тому термометрія може ґрунтуватися на вимірюванні довільного параметру раціонально обраного термометричного тіла. Звичайно, обраний параметр має бути однозначною, неперервною та монотонною функцією температури. Певною мірою цим вимогам задовольняють тиск і об'єм газів, об'єм рідин $V = V_0(1 + \beta t)$, електричний опір провідників і напівпровідників $R = f(T)$, термо-ЕРС деяких пар провідників.

Вибір шкали вимірювання температури різний, але ми найчастіше користуємось шкалою Цельсія: 0°C – спостерігається при контакті досліджуваної системи (термометра) з танучи льодом, а 100°C – при контакті з кип'ячою водою за нормального атмосферного тиску. Тоді величину температури визначають так, щоб довжина стовпчика термометра $l = l_0(1 + \beta t)$, де $\beta = \frac{l_{100} - l_0}{100 \cdot l_0}$. Для газового термометра: градування таке ж, але за нуль обирають $-1/\alpha^\circ\text{C}$, де $\alpha = 273^{-1}$, тоді $T = 1/\alpha + t$, де t – температура за шкалою Цельсія, а T – за шкалою Кельвіна.

Отже, температура – величина, яка описує стан внутрішнього руху рівноважної системи, яка має одне й теж значення в усіх частинах системи

незалежно від кількості частин в ній, визначається зовнішніми параметрами і енергією, що відноситься до кожної такої частини.

Емпірично температурою тіла називають встановлену дослідним шляхом міру відхилу термодинамічного стану тіла від стану теплової рівноваги з танучим льодом (потрійною системою) при тискові в одну атмосферу.

Рідинні термометри – перші вимірювальні прилади, які набули масового застосування. Серед них розрізняють ртутні та термометри з не ртутним заповненням (спиртові, толуолові тощо). Крім рідинних і газових існують ще термоелектричні термометри, термометри опору та ін..

Рідинні термометри характеризуються чутливістю, ціною поділки, точністю.

Чутливість рідинного термометра показує на скільки змінюється положення стовпчика рідини при нагріванні його на 1 К (1°C). Чутливість визначається об'ємом капіляру та об'ємом посудини з рідиною.

Точність термометра залежить від його ціни поділки. Ціна поділки стандартних термометрів складає від 0,5 до 2°C.

Джерелом похибок, що виникають при вимірюванні температури, наприклад, за допомогою ртутного термометру, є: пружна післядія скла; нециліндричність трубки термометра; опуклість меніска стовпчика ртуті; тертя ртуті об стінки.

Для правильного визначення температури завжди слід користуватись тільки перевіреними термометрами.

При перевірці основних точок термометра (0°C – точка танення льоду, 100°C – точка кипіння води) слід пам'ятати, що вода закипає при 100°C тільки тоді, коли тиск дорівнює 760 *мм.рт.ст.* за іншого тиску – точка кипіння буде іншою. Залежність температури кипіння τ_0 води від атмосферного тиску H виражається емпіричною формулою:

$$\tau_0 = 100^\circ + 0,0375(H - 760)^\circ. \quad (1.1)$$

Формула (1.1) справедлива, коли атмосферний тиск змінюється у межах 715...770 *мм.рт.ст.*

Знаючи атмосферний тиск, можна відшукати точку кипіння води, користуючись спеціальними таблицями (див. додатки табл. 11). Атмосферний тиск визначають за допомогою ртутного барометра або барометра – анероїда.

Хід роботи

1. Роботу розпочинають з перевірки точки танення льоду. Для цього досліджуваний термометр занурюють так, щоб його кулька (з еталонною рідиною) була занурена на 3...6 см у холодну чисту воду (краще дощову або снігову) із дрібно потовченим льодом. При цьому лід має щільно прилягати до термометра.

2. Через деякий час, впевнившись, що покази термометра не змінюються, слід зробити відлік t'_0 .

3. Дослід повторити декілька разів. Після кожного вимірювання визначити поправку на нуль термометра за формулою

$$a = t'_0 - t_0,$$

t'_0 – покази термометра, $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

4. Точку кипіння перевіряють, помістивши термометр в пару киплячої води. Обов'язково треба стежити, щоб краплі сконденсованої води не попадали на кульку термометра, а стінки термометра за можливістю менше охолоджувались з боків.

При цьому вимірюванні користуються колбою, підвісивши термометр на штативі. Колба має бути з довгою шийкою.

5. Коли рівень стовпчика термометра встановиться (температура не змінюється), записують покази термометра τ'_0 . Дослід виконують кілька разів. Для кожного виміру визначають поправку на точку кипіння:

$$b = \tau'_0 - \tau_0,$$

де τ_0 – температура кипіння води за даного тиску, визначена за формулою (1.1) або з таблиці (див. додатки табл. 11).

6. За допомогою досліджуваного термометра визначити температуру повітря у кімнаті.

Дійсну температуру повітря в кімнаті визначають за формулою:

$$t_C = t'_C \left(1 - \frac{b+a}{\tau_0} \right),$$

де t'_C – покази досліджуваного термометра, a, b – поправки цього термометра.

Поправки a, b слід обирати додатними, якщо покази термометра більші за $t_0 = 0^\circ\text{C}$ і за температуру кипіння води за даного тиску $\tau'_0 > \tau_0$. У протилежному випадку поправки будуть від'ємними.

Примітка: Температуру в кімнаті слід вимірювати тільки досліджуваним термометром і до початку досліджень.

Контрольні запитання

1. Пояснити формулу залежності температури кипіння води від атмосферного тиску.
2. Записати і пояснити формулу для визначення дійсної температури середовища. Як визначити знаки поправок?
3. Яку температуру називають нормальною температурою плавлення чи кипіння?
4. Які види термометрів ви знаєте?
5. Що розуміють під термодинамічною, тепловою і термічною рівновагою?

Лабораторна робота № 2

Визначення коефіцієнта об'ємного розширення рідин і коефіцієнта лінійного розширення

Мета роботи: ознайомитися з методиками визначення коефіцієнта лінійного розширення сталевого та латунного стержня і коефіцієнта об'ємного розширення води; набути навички роботи з індикатором малих переміщень.

Прилади і матеріали: спеціальні прилади для визначення об'ємного розширення води і лінійного розширення твердих тіл, лінійка, електроплитка, кип'ятильник, барометр, індикатор малих переміщень, термометр.

Короткі теоретичні відомості

У кристалічних твердих тілах атоми знаходяться в певному положенні рівноваги. Під дією внутрішніх сил вони трохи зміщуються з цих положень, а після зняття навантаження повертаються до них знову, якщо ці величини не перевищують певної характерної для даного тіла величини, яка називається границею пружності. Найбільша границя пружності – у твердих тілах. В аморфних тілах вона менша і практично дорівнює нулю у рідинах, чим і пояснюється пружність форми твердих тіл і текучість рідин.

Атоми рідин і твердих тіл виконують коливальний рух навколо положення рівноваги. При підвищенні температури амплітуда коливань зростає, що є причиною розширення твердих і рідких тіл (при нагріванні). У твердих ізотропних тілах це проявляється у збільшенні лінійних розмірів в усіх напрямках в однаковому відношенні, що спричинює збільшення об'єму.

Лінійні розміри тіл лінійно залежать від температури, що математично виражається так:

$$l_t = l_0(1 + \alpha t), \quad (2.1)$$

де l_t, l_0 – лінійний розмір тіла при температурі відповідно t і 0°C ; α [K^{-1}] – коефіцієнт лінійного розширення, який залежить від природи речовини. Коефіцієнт лінійного розширення

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 t} \quad (2.2)$$

показує, на скільки видовжується кожна одиниця початкової довжини при підвищенні температури на 1 К.

Об'ємні розміри тіла лінійно залежать від температури, що математично виражається формулою

$$V_t = V_0(1 + \beta t), \quad (2.3)$$

де V_t, V_0 – об'єми тіла при температурі відповідно t і 0°C ; β [K^{-1}] – коефіцієнт об'ємного розширення, характерний для кожної речовини. Коефіцієнт об'ємного розширення

$$\beta = \frac{V_t - V_0}{V_0 t} \quad (2.4)$$

показує, на скільки змінюється кожна одиниця початкового об'єму тіла при підвищенні температури на 1 К. Оскільки рідинам не властива пружність форми, але властива пружність об'єму, то їхнє розширення характеризується виразом (2.4).

Хід роботи

Завдання 1: *Визначення коефіцієнта об'ємного розширення води.*

Одним із методів визначення об'ємного розширення є метод Дюлонга і Пті, заснований на нагріванні рідини в одному з колін сполучених посудин. Цей метод дає можливість виключити похибки на розширення посудини.

Якщо температура t_1 , однієї й тієї ж самої рідини в обох сполучених посудинах (трубках) однакова, то рівні її h_1 також однакові. Якщо одну трубку нагріти до температури t_2 , то рівень h_2 рідини в ній стане вищим на величину $\Delta h = h_2 - h_1$. Вимірявши температури t_1 , t_2 , а також h_1 , h_2 , Δh , можна визначити β з таких міркувань. При рівновазі рідини у сполучених посудинах тиск на будь-яку горизонтальну поверхню, що перетинає рідину, в обох трубках однаковий, тобто

$$p_1 = p_2. \quad (2.5)$$

Кожний з тисків буде складатися з суми тисків: атмосферного H , тиску стовпів рідини ρgh , тиску поверхневого шару (якби він був горизонтальним) p_0 і додаткового лапласівського тиску за рахунок викривлення поверхні рідини $\pm \Delta p$. Знак «+» – для випуклого меніска, знак «-» – для увігнутого. Враховуючи це, перепишемо (2.5):

$$H + \rho_1 g h_1 + p_0 \pm \Delta p = H + \rho_2 g h_2 + p_0 \pm \Delta p \quad (2.6)$$

Оскільки рідина за хімічним складом в обох трубках сполучених посудин однакова, то p_0 , Δp будуть однакові. Щодо густини рідини, то вона внаслідок неоднакових температур в обох трубках буде різною. Скоротивши рівняння (2.6), матимемо

$$h_1 \rho_1 = h_2 \rho_2. \quad (2.7)$$

Враховуючи, що $\rho = \frac{m}{V_t}$, а $V_t = V_0(1 + \beta t)$, перетворюємо (2.7) і

одержуємо

$$\frac{h_1}{1 + \beta t_1} = \frac{h_2}{1 + \beta t_2}. \quad (2.8)$$

З рівняння (2.8) знайдемо

$$\beta = \frac{h_2 - h_1}{h_1 t_2 - h_2 t_1} = \frac{\Delta h}{h_1 t_2 - h_2 t_1}, \Delta h = h_2 - h_1. \quad (2.9)$$

Підготовка до роботи включає ознайомлення з приладом, підготування його до роботи, складання плану виконання роботи і таблиці вимірювань.

Примітки:

1. Обидві трубки сполучених посудин, починаючи від основи, вміщено у трубки більшого діаметра. Це необхідно для збереження якнайдовше незмінної їхньої температури.

2. Нагрівання однієї з трубок відбувається в результаті пропускання гарячої пари всередину широкої трубки пароутворювача, з'єднаного з приладом гумовою трубкою (рис 2.1).

3. Нагрівання рідини (води) у трубці до температури кипіння за всією довжиною настає тоді, коли з нижньої частини широкої трубки піде суха водяна пара. Температуру кипіння води знаходять за таблицею залежності температури кипіння води від тиску (див. додатки табл. 11).

4. Абсолютну та відносну похибки визначають розрахунковим методом. При обчисленні похибок враховують: а) температуру, що вимірюється з точністю до $0,1^\circ\text{C}$, тобто $\Delta t = 0,05^\circ\text{C}$; б) довжини h_2 , h_1 , Δh , що вимірюється до 1 мм, тобто $\Delta(\Delta h) = \Delta h_1 = \Delta h_2 = 0,0005$ м.

Завдання 2. *Визначення коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл.*

Поставити прилад так, щоб стойка з патрубком знаходилась з правого боку (див рис 2.1). одну з трубок 1 пропускають довгим кінцем через отвір

у стойках 2 і 3 так, щоб пластинка 4 розмістилася вертикально і не доходила до правої стойки на 2...5 см. Потім закріплюють трубку гвинтом 5 у лівій стойці. Індикатор 6 встановлюють в отвір патрубку 9 у стойці 3 і закріплюють гвинтом 7 так, щоб забезпечити натяг механізму індикатора через його стержень 8, який має торкатися лівого боку пластинки 4. Натяг визначають поворотом стрілки індикатора відносно шкали на 1-2 оберти. Після закріплення індикатора вправо чи вліво встановлюють стрілку на нуль.

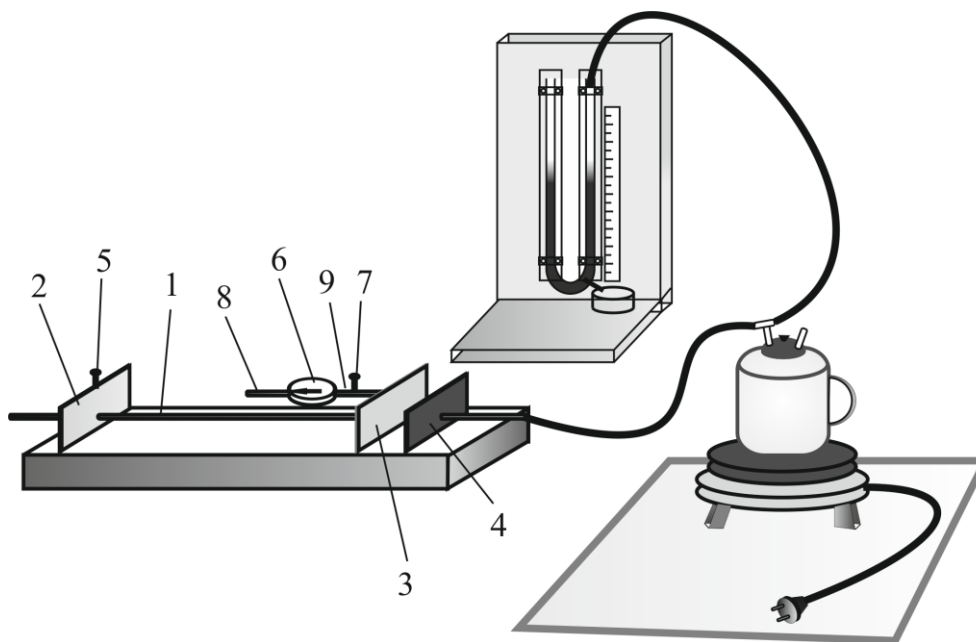


Рис. 2.1

Після цього необхідно ввімкнути електроплитку, на якій знаходиться пароутворювач, і виміряти лінійкою довжину трубки від центра гвинта 5 до лівого боку пластинки 4, записати кімнатну температуру, перевірити нульову установку індикатора і тільки після цього з'єднати установку з пароутворювачем. Пара від пароутворювача пропускається через трубку приладу доти, доки з лівого кінця трубки не піде суха пара. Внаслідок цього трубка нагріється і видовжиться. Температуру нагрівання приймаємо за 100°C . Видовження трубки визначаємо за показом індикатора. Одна поділлка становить 0,01 мм.

Для одержання середнього значення рекомендується провести кілька повторних нагрівань трубки, починаючи від кімнатної температури. Коефіцієнт лінійного розширення

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_1 t_2 - l_2 t_1},$$

або приймаючи, що $l_1 = l_2$ і $l_1 t_1 = l_2 t_2$.

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

де Δl – збільшення довжини трубки; l_1 – початкова довжина; t_1 – початкова температура; t_2 – кінцева температура.

Дослід проробити з двома трубками. Скласти таблицю результатів вимірювань та обчислень.

Вивести формулу для обчислення відносної та абсолютної похибок для α та визначити їх.

Висновки записати для обох трубок у вигляді:

$$\alpha = \alpha_{\text{ср}} \pm \Delta\alpha_{\text{ср}}; E = \dots\%$$

Контрольні запитання

1. Як з точки зору молекулярної фізики пояснити теплове розширення твердих тіл?
2. Який зв'язок існує між коефіцієнтами об'ємного та лінійного розширення ізотропних твердих тіл?
3. Які методи визначення коефіцієнта об'ємного розширення рідин? Як α залежить від температури?
4. Які основні джерела похибок при використанні методу Дюлонга і Пті?
5. Наведіть приклади використання теплового розширення твердих тіл і рідин.

Лабораторна робота №3

Визначення сталої Больцмана

Мета роботи: експериментально визначити сталу Больцмана

Прилади і матеріали: установка для визначення сталої Больцмана, мікроманометр.

Короткі теоретичні відомості

У кінетичній теорії газів рівняння

$$pV = \frac{2}{3} N \frac{m\bar{v}^2}{2} \quad (3.1)$$

дістало назву основного рівняння кінетичної теорії газів. У ньому пов'язані параметри газу p і V з кількістю молекул N та їхніми характеристиками m і \bar{v}^2 .

Це рівняння можна переписати ще й у такому вигляді:

$$p = \frac{2}{3} n_0 \frac{m\bar{v}^2}{2}, \quad (3.2)$$

де n_0 – кількість молекул в одиниці об'єму.

Звідки видно, що тиск ідеального газу залежить від його густини (числа молекул в одиниці об'єму) і середньої кінетичної енергії поступального руху молекули. Обидві ці величини не залежать одна від одної. Якщо привести в дотик два гази з різними значеннями середньої кінетичної енергії молекул, то через деякий час середні кінетичні енергії молекул стануть однаковими. Це відбувається завдяки тому, що молекули, стискаючись одна з одною, обмінюються енергіями. При цьому відбувається передача енергії від газу з більшим значенням енергії до газу з меншим значенням енергії. Передача енергії відбувається до тих пір, поки не настане стан так званої теплової рівноваги, за якого перехід енергії від одного газу до іншого припиняється. Як відомо, так поведуть себе тіла, які мають різну температуру. При дотику таких тіл відбувається передача енергії від одного тіла до іншого до того моменту поки їх температура не зрівняється.

Отже, середня кінетична енергія поступального руху молекул поводить себе, як відома величина – температура.

Щодо ідеального газу, то його температура дорівнює двом третинам середньої кінетичної енергії однієї молекули. Позначивши температуру θ , можна записати:

$$\frac{2}{3} \frac{m\bar{v}^2}{2} = \theta. \quad (3.3)$$

Тоді рівняння (3.2) набуде вигляду $p = n_0\theta$.

При такому значенні температури вона повинна вимірюватись в одиницях енергії (джоулях). Але на практиці такими одиницями температури користуватись незручно, тому що безпосереднє вимірювання кінетичної енергії молекул – справа досить важка. Крім того, така мала одиниця енергії, як джоуль, виявляється надто громіздкою, щоб слугувати одиницею вимірювання температури. Наприклад, температура танення льоду, вимірювана у джоулях, дорівнює $3,6 \cdot 10^{-23}$ Дж. Якщо температуру вимірювати в кельвінах, то необхідно ввести коефіцієнт переведення джоулів у кельвіни.

Позначивши цей перехідний коефіцієнт k , одержимо формулу, що зв'язує середню кінетичну енергію молекули з температурою:

$$\frac{2}{3} \frac{m\bar{v}^2}{2} = kT, \quad \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \quad (3.4)$$

де T – температура, К. Співмножник k , який зв'язує температуру в енергетичних одиницях з температурою в кельвінах, називається сталою Больцмана. Її числове значення може бути встановлене тільки експериментально. Через особливу важливість цієї сталої вона може бути визначена кількома методами. Один з методів полягає в використанні основного рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів. Якщо рівняння (3.4) підставити в (3.2), тоді одержимо:

$$p = n_0 kT. \quad (3.5)$$

З рівняння (3.5) видно, що тиск ідеального газу за даної температури визначається тільки числом молекул в одиниці об'єму і не залежить від

роду молекул. Цим рівнянням можна скористатись для експериментального знаходження сталої Больцмана.

Якщо в балон з газом, об'єм якого V , ввести певну кількість іншого газу, наприклад ефіру, то тиск всередині посудини збільшиться на величину парціального тиску ефіру. Парціальний тиск ефіру може бути знайдений за формулою $\Delta p = n_0 k T$, де n_0 – число молекул ефіру в одиниці об'єму, $n_0 = \frac{M}{m_0 V}$, де M, m_0 – маса відповідно рідкого ефіру та молекули ефіру; V – об'єм посудини.

Парціальний тиск ефіру може бути виміряний мікроманометром ММН, що з'єднаний з балоном.

$$\Delta p = \rho g \alpha H,$$

де ρ – густина спирту, α – стала приладу, за якої проводилися вимірювання, H – відлік за шкалою манометра. Тоді

$$k = \frac{\Delta p}{n_0 T} = \frac{\rho g \alpha H m_0 V}{M T} = \frac{\rho g \alpha H m_0 V}{d_e V_e T}, \quad (3.6)$$

де d_e – густина ефіру, V_e – об'єм ефіру.

Якщо ввести постійний для даної установки коефіцієнт

$$B = \frac{\rho g \alpha m_0 V}{d_e},$$

тоді

$$k = B \frac{H}{V_e T}. \quad (3.7)$$

Опис приладу

Прилад (рис. 3.1) для визначення сталої Больцмана k складається із скляного товстостінного балона 1, що з'єднується через вивідну гумову трубку 3 з мікроманометром 4. У пробці балона закріплено термометр та медичну голку для введення через неї шприцом 2 рідини, що легко випаровується (ефір). Після введення ефіру в балоні створиться надлишок тиску на величину парціального тиску газоподібного ефіру. Величину Δp визначають мікроманометром.

Хід роботи

Для визначення сталої Больцмана треба знайти об'єм ефіру V_e , збільшення тиску Δp , температуру T . У даній роботі об'єм посудини відомий: $V = 24,5 \text{ л}$.

Для вимірювання температури користуються термометром. Об'єм ефіру визначається за поділками медичного шприцу, ціну поділки якого слід визначити самостійно. Ефір в посудину вводиться через голку, що постійно вставлена в пробку. Після введення ефіру шприц залишається в голці. У супротивному випадку через голку повітря буде виходити разом з парами ефіру. Для вимірювання парціального тиску користуються мікроманометром. Для цього потрібно виміряти початковий рівень рідини у мікроманометрі до введення ефіру і кінцевий рівень після введення. Для визначення парціального тиску треба встановити різницю $\Delta p_2 - \Delta p_1 = \rho g \alpha H$, ($H = H_2 - H_1$).

Дані занести до таблиці:

ρ , кг/м ³	g , м/с ²	m_0 , кг	V , м ³	α	H , м	d_e , кг/м ³	V_e , м ³	T , К	k , Дж/К	E , %

$$V = 24,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3,$$

$$d_e = 0,716 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 716 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$\rho = 0,85 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 850 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$m_0 = 12,3 \cdot 10^{-23} \text{ г} = 12,3 \cdot 10^{-26} \text{ кг}.$$

Відносну похибку визначають за формулою:

$$E = \left(\frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta V_e}{V_e} \right) \cdot 100\%.$$

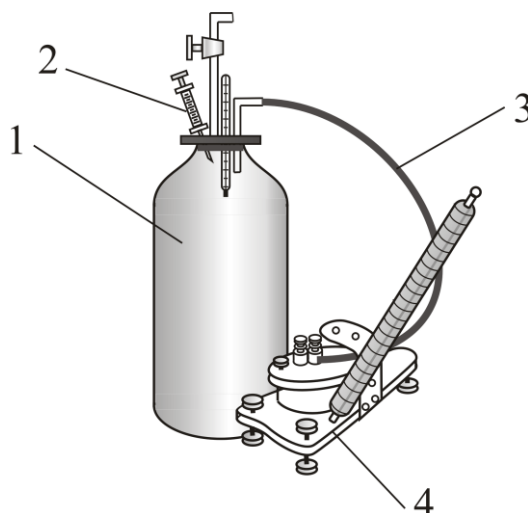


Рис. 3.1

Абсолютна похибка:

$$\Delta k = k \frac{E}{100}.$$

Висновок записати у вигляді:

$$k = k \pm \Delta k; E = \dots\%.$$

Правила користування мікроманометром

Користуватися мікроманометром рекомендується у такій послідовності:

1. Встановити прилад на стійкому столі, плиті тощо;
2. Відрегулювати регулюючими ніжками положення приладу так, щоб у кожному контрольному корпусі мікроманометра бульбашка стояла в центрі;
3. Встановити кронштейн з вимірювальною трубкою в одне з верхніх положень, що відповідає $\alpha = 0,4$. Можна обрати й інше значення α ;
4. Повернути пробку триходового крану проти годинникової стрілки до упору (у лабораторній роботі це вже зроблено);
5. Через пробку кришки резервуару залити етиловий спирт з густиною $\rho = 0,85 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ у такій кількості, щоб рівень його у скляній вимірювальній трубці встановився приблизно проти нульової поділки шкали;
6. Прилад з'єднаний з об'єктом вимірювання, тобто з балоном, через гумову трубку. Якщо спирт у трубці знаходиться не на «нулі», прилад регулюють регулюючими ніжками.

Контрольні запитання

1. Який фізичний зміст температури та сталої Больцмана в молекулярно-кінетичній теорії.
2. Вивести обчислювальну формулу. Розкрити фізичний зміст кожного параметра.
3. Сформулювати закон Дальтона. Застосувати його для обчислення тиску газу в балоні.

4. Вивести основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів. Який фізичний зміст параметрів, що до нього входять?
5. Вивести формулу для обчислення відносної похибки.

Лабораторна робота №4

Визначення питомої теплоємності твердого тіла

Мета роботи: визначити питому теплоємність тіла методом змішування.

Прилади і матеріали: калориметр, два термометри, досліджуване тіло, терези, важки, електроплитка, нагрівник.

Короткі теоретичні відомості

Кількість теплоти Q , Дж, одержана тілом при нагріванні чи віддана при охолодженні, пропорційна його масі й різниці температур у кінці й на початку досліду

$$Q = mc(t_2 - t_1), \quad (4.1)$$

де m – маса тіла, кг; c – питома теплоємність (у формулі коефіцієнт пропорційності); t_1, t_2 – відповідно початкова і кінцева температура.

Для визначення коефіцієнта пропорційності розглянемо наступний випадок: нехай $m = 1$ кг, $t_2 - t_1 = 1$ К, тоді $c = Q$. Отже, питома теплоємність показує, яку кількість теплоти необхідно надати одиниці маси тіла, щоб підвищити його температуру на 1 К. Теплоємність будь-якого тіла може бути подана як добуток питомої теплоємності на його масу в кілограмах.

Для рідини та твердих тіл визначають теплоємність при постійному тиску, а для газів – при постійному об'ємі. Величина теплоємності залежить від температури.

Для визначення питомої теплоємності користуються методом змішування. При змішуванні двох речовин, нагрітих до різних температур, одна віддасть стільки теплоти, скільки друга її одержить.

Нехай маємо тверде тіло маси M з питомою теплоємністю c , нагріте до температури t . Помістимо це тіло в калориметр (масою m_2 ,

теплоємністю c_2) з водою, маса якої m_1 , теплоємність c_1 . Після «змішування» встановиться температура θ . Кількість теплоти віддана нагрітим тілом буде $Q = Mc(t - \theta)$, кількість теплоти одержана водою $Q_1 = m_1c_1(\theta - t_1)$, кількість теплоти одержана калориметром $Q_2 = m_2c_2(\theta - t_1)$. Тоді рівняння теплового балансу матиме такий вигляд:

$$Q = Q_1 + Q_2;$$
$$Mc(t - \theta) = m_1c_1(\theta - t_1) + m_2c_2(\theta - t_1). \quad (4.2)$$

Звідси можна визначити теплоємність твердого тіла

$$c = \frac{(m_1c_1 + m_2c_2)(\theta - t_1)}{M(t - \theta)}. \quad (4.3)$$

Для визначення питомої теплоємності користуються калориметром, який складається з двох алюмінієвих посудин. Менша посудина вставляється в більшу на дерев'яній або пластмасовій підставці.

Нагрівник складається з металевої посудини з подвійними стінками. Внутрішня посудина закривається металевою пробкою з отвором для термометра. Сюди ж вміщують, підвісивши за нитку, досліджуване тіло, теплоємність якого потрібно визначити. У верхній отвір зовнішньої посудини пропускають пару з кип'ятильника. Відпрацьована пара виходить через боковий отвір. У даній роботі тіло буде нагріватись на електричній плитці у внутрішній посудині калориметра.

Хід роботи

1. Зважити досліджуване тіло з точністю до 0,01 г, позначивши його масу M .
2. Помістити це тіло у внутрішню посудину калориметра, підвісивши його на нитці так, щоб воно не торкалося стінок і дна посудини та знаходилося на одному рівні з кулькою термометра.
3. Поставити посудину на електроплитку і включити електроплитку.
4. Зважити внутрішню посудину калориметра, позначивши його масу m_2 .

5. Налити в калориметр дві третини холодної води і визначити її масу m_1 . Температура води, наливої в калориметр, має бути нижче кімнатної на $4-5^\circ\text{C} - t_1$.

6. За показами термометра записати температуру досліджуваного тіла t , яка дорівнює температурі нагрітої води в калориметрі.

7. Вийняти тіло з нагрівника і швидко, але обережно, опустити його в калориметр з водою, тримаючи подалі від нагрівника.

8. Воду в калориметрі весь час помішувати термометром і стежити за підвищенням температури. Коли покази термометра не будуть змінюватись, записати їх з точністю до $0,5^\circ\text{C}$.

9. Нехай температура суміші буде $\theta^\circ\text{C}$. Тоді за формулою (4.3) можна відшукати теплоємність досліджуваного тіла.

10. Результат записати у таблицю:

M , кг	m_1 , кг	m_2 , кг	t , $^\circ\text{C}$	t_1 , $^\circ\text{C}$	θ , $^\circ\text{C}$	c_1 , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	c_2 , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	c , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	E , %

11. Визначити питому теплоємність, абсолютну і відносну похибки:

$$\Delta M = \Delta m_1 = \Delta m_2 = \Delta m = 0,05 \text{ г},$$

$$\Delta t = \Delta \theta = 0,05^\circ\text{C},$$

$$E = \frac{\Delta c}{c} = \frac{\Delta m(c_1 + c_2)}{m_1 c_1 + m_2 c_2} + \frac{2\Delta t}{\theta - t_1} + \frac{\Delta M}{M} + \frac{2\Delta t}{t - \theta},$$

$$\Delta c_{\text{ср}} = E \cdot c_{\text{ср}}.$$

12. Записати кінцевий результат у вигляді:

$$c = c_{\text{ср}} \pm \Delta c_{\text{ср}}; E = \dots \%$$

Контрольні запитання

1. Дати визначення таких понять: кількість теплоти, питома і молярна теплоємності.

2. Назвати одиниці вимірювання кількості теплоти, питомої і молярної теплоємності.

3. Вивести робочу формулу для визначення питомої теплоємності твердого тіла.
4. Що розуміють під рівнянням теплового балансу?
5. Що таке калориметр? Яке його призначення?

Лабораторна робота №5

Визначення питомої теплоємності рідини електричним калориметром

Мета роботи: визначити питому теплоємність гасу за допомогою електричного калориметра методом порівняння.

Прилади і матеріали: два електричні калориметри (з водою і гасом), два термометри, випрямляч, кристалізатор, терези з важками.

Короткі теоретичні відомості

Щоб визначити питому теплоємність рідини за допомогою електричного калориметра методом порівняння, дві рідини, наприклад гас і воду, питомі теплоємності яких потрібно порівняти, наливають у два калориметри і нагрівають одним і тим самим електричним струмом. Прилад складається з двох однакових калориметрів, всередині яких є електричний нагрівник у вигляді дротяних спіралей однакового опору. Обидва нагрівники вмикаються в коло послідовно, внаслідок чого у калориметрах виділяється однакова кількість теплоти, яку можна визначити за законом Джоуля-Ленца:

$$Q = I^2 R t ,$$

де Q – кількість теплоти, що виділяється у провіднику; I – сила струму в провіднику; R – опір спіралі; t – час проходження струму.

Температури в калориметрах в усій масі рідини зрівнюють мішалками (або термометром). Якщо початкові температури рідин (гасу і води) перед дослідом будуть приблизно на стільки градусів нижчі від кімнатної температури, на скільки кінцеві температури рідин після досліду будуть вищими за неї, і якщо ці рідини взяті у таких кількостях, щоб очікувані підвищення температури після нагрівання їх струмом були приблизно

однакові, то в цьому випадку майже не буде втрат теплоти внаслідок випромінювання і виключається вплив зміни опору спіралей при нагрівання рідин на результат досліду.

Щоб точніше визначити питому теплоємність, треба врахувати теплоту, необхідну для нагрівання термометра, а для цього слід знайти його водяний еквівалент.

Водяним еквівалентом називають число, яке показує скільки треба взяти грамів води, щоб теплота необхідна для нагрівання її на 1 К, дорівнювала б теплоті, необхідній для нагрівання даного тіла на 1 К.

Термометр нагрівають до температури t , потім опускають його у воду масою m_1 при температурі t_1 , після чого встановлюється температура t_2 . Відношення

$$\omega = \frac{m_1 c_1 (t_2 - t_1)}{t - t_2}$$

і є водяним еквівалентом.

Умовні позначення:

m_1 – маса рідини у першому калориметрі;

m_2 – маса рідини у другому калориметрі;

c_1, c_2 – питомі теплоємності рідин у першому і другому калориметрах;

ω_1, ω_2 – водяні еквіваленти посудин, мішалок та термометрів першого і другого калориметрів;

t_1 – початкова температура першого калориметра;

t_2 – початкова температура другого калориметра;

τ_1 – кінцева температура першого калориметра;

τ_2 – кінцева температура другого калориметра;

Q_1, Q_2 – кількість теплоти, що виділяється, в першому і другому калориметрах.

Кількість теплоти, що виділяється у першому та другому калориметрах:

$$I^2 R_1 t = Q_1 = (c_1 m_1 + \omega_1)(\tau_1 - t_1), \quad (5.1)$$

$$I^2 R_2 t = Q_2 = (c_2 m_2 + \omega_2)(\tau_2 - t_2). \quad (5.2)$$

Вважаючи, що $Q_1 = Q_2$ (тому що $R_1 = R_2$), можна записати:

$$(c_1 m_1 + \omega_1)(\tau_1 - t_1) = (c_2 m_2 + \omega_2)(\tau_2 - t_2). \quad (5.3)$$

Визначимо з цього рівняння питому теплоємність

$$c_1 = \frac{1}{m_1} \left[(c_2 m_2 + \omega_2) \frac{\tau_2 - t_2}{\tau_1 - t_1} - \omega_1 \right]. \quad (5.4)$$

Якщо у другому калориметрі дистильована вода, тоді $c_2 = 4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$.

Через те що опір дротяних спіралей першого і другого калориметрів може бути не зовсім однаковим, дослід повторити помінявши місцями калориметри.

Хід роботи

1. У перший калориметр наливають гас, у другий – приблизно вдвічі менше дистильованої води. (дротяні спіралі обох калориметрів мають бути повністю занурені в рідину).

2. Зваживши посудини першого і другого калориметрів перед наповненням їх рідинами і після нього, визначають m_1 і m_2 гасу і води з точністю до 0,1 г.

3. Обидві посудини з рідинами ставлять у сніг, лід чи холодну воду, щоб температури знизилися на 3...4°C проти кімнатної.

4. Поставивши посудини на свої місця, опускають в калориметри дротяні спіралі, термометри і мішалки.

5. Після старанного перемішування рідин мішалками (чи термометрами) визначають початкові температури t_1 , t_2 гасу і води з точністю до 0,1°C.

6. Замикають коло і постійно слідкують за показами термометрів.

7. Коли температура гасу підніметься вище кімнатної на стільки градусів, на скільки вона була нижча від неї до початку досліду, вимикають електричний струм.

8. Старанно перемішавши рідини, визначають з такою самою точністю найвищу остаточну температуру τ_1 і τ_2 .

9. У такому самому порядку дослід повторюють, помінявши місцями калориметри.

10. Водяні еквіваленти вказані на калориметрах ω_1 і ω_2 або їх можна обчислити, знаючи питому теплоємність і масу калориметра.

Одержані результати занести до таблиці:

$m_1,$ кг	$m_2,$ кг	$t_1,$ °C	$t_2,$ °C	$\omega_1,$ $\frac{\text{Дж}}{\text{град}}$	$\omega_2,$ $\frac{\text{Дж}}{\text{град}}$	$\tau_1,$ °C	$\tau_2,$ °C	$c_1,$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$c_2,$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$E, \%$
									4180	

Розрахувати абсолютну і відносну похибки вимірювання питомої теплоємності гасу і записати кінцевий результат у вигляді:

$$c_1 = c_{\text{сп1}} \pm \Delta c_{\text{сп1}}; E = \dots\%$$

Контрольні запитання

1. Дати визначення таких понять: кількість теплоти, питома і молярна теплоємності.
2. Назвати одиниці кількості теплоти, питомої і молярної теплоємностей.
3. Вивести робочу формулу для визначення питомої теплоємності рідини, використовуючи метод описаний в роботі.
4. Чи залежить теплоємність рідини від температури?
5. Пояснити термін «водяний еквівалент».

Лабораторна робота №6

Визначення питомої теплоємності металів методом охолодження

Мета роботи: визначити питому теплоємність алюмінію та заліза методом порівняння швидкостей охолодження досліджуваних зразків зі швидкістю охолодження мідного зразка.

Прилади і матеріали: установка для визначення теплоємності металів методом охолодження, термопара з мілівольтметром магнітоелектричної системи типу МПП-254, секундомір, досліджувані зразки металів (мідь – еталонний зразок, залізо, алюміній) циліндричної форми, терези з важками.

Короткі теоретичні відомості

Кількість теплоти, яку віддає метал масою m при охолодженні на Δt °С :

$$\Delta Q = cm\Delta t, \quad (6.1)$$

де c – середня питома теплоємність металу в інтервалі температур Δt .

Якщо охолодження відбувається протягом $\Delta \tau$, то (6.1) можна переписати так:

$$\Delta Q = cm \frac{\Delta t}{\Delta \tau} \Delta \tau, \quad (6.2)$$

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

Величину ΔQ можна обчислити також на основі закону охолодження Ньютона:

$$\Delta Q = \alpha(t_d - t_c)S\Delta \tau, \quad (6.3)$$

де $\alpha \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \right]$ – коефіцієнт теплообміну; S – площа поверхні зразка, t_n, t_c – температура відповідно поверхні зразка, що охолоджується і середовища (повітря).

Прирівнюючи (6.2) і (6.3), матимемо

$$cm \frac{\Delta t}{\Delta \tau} = \alpha(t_n - t_c)S. \quad (6.4)$$

У (6.1) і (6.3) прийнято, що S , $\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$, α , t_n , t_c не залежать від координат точок зразків металів.

Записавши (6.4) для обох зразків однакової форми та розмірів (еталонного і досліджуваного) і вважаючи, що $t_{n1} = t_{n2}$, $\alpha_1 = \alpha_2$ і температура t_c в обох випадках залишається сталою, розділимо потім один з цих виразів на інший:

$$c_1 = c_2 \frac{m_2 \left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_2}{m_1 \left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_1}, \quad (6.5)$$

де $\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_1$ і $\left(\frac{\Delta t}{\Delta \tau} \right)_2$ – швидкості охолодження зразків металу, c_1 можна визначити, порівнюючи швидкість його охолодження зі швидкістю охолодження еталонного зразка, питома теплоємність якого відома за різних температур.

Опис установки та хід роботи

Щоб визначити питому теплоємність металів методом охолодження, використовують установку, схему якої зображено на рис. 6.1.

У спеціальній циліндричній керамічній печі 1 нагрівають зразки 2, всередині яких розмішують спай термопари 3, сполученої з мілівольтметром С. Електропіч встановлена вертикально на штативі, вона може перемішуватись вгору і вниз.

У даній роботі, щоб не пошкодити піч потрібно подавати на неї напругу не більше 80 В.

Зразок 2 являє собою циліндр довжиною 50 мм та діаметром 10 мм з висвердленим каналом для термопари з одного краю. Цим каналом зразок надівається на спай термопари, все разом вводиться в піч так, щоб зразок не торкався стінок і знаходився всередині печі.

Температура зразка відраховується за шкалою мілівольтметра. Додається графік переводу (див. додатки) показів мілівольтметра у значення температури спаю терморпарі (зразка) у градусах Цельсія.

На початку досліду опускаємо піч (або піднімаємо зразок) на стільки, щоб зразок розмістився на середині печі, після чого через автотрансформатор вмикаємо піч в електромережу. Доводимо напругу на вольтметрі автотрансформатора до 80 В. Нагріваємо зразок до 300...350°C (показ на шкалі мілівольтметра близько 10 поділок). Після цього зразок опускається вниз, підводиться під спеціальний ковпак 4, де охолоджується в повітрі. За допомогою секундоміра слід записувати покази мілівольтметра через кожні 20 с. Охолодження проводиться до 75...80°C (дві поділки на шкалі мілівольтметра).

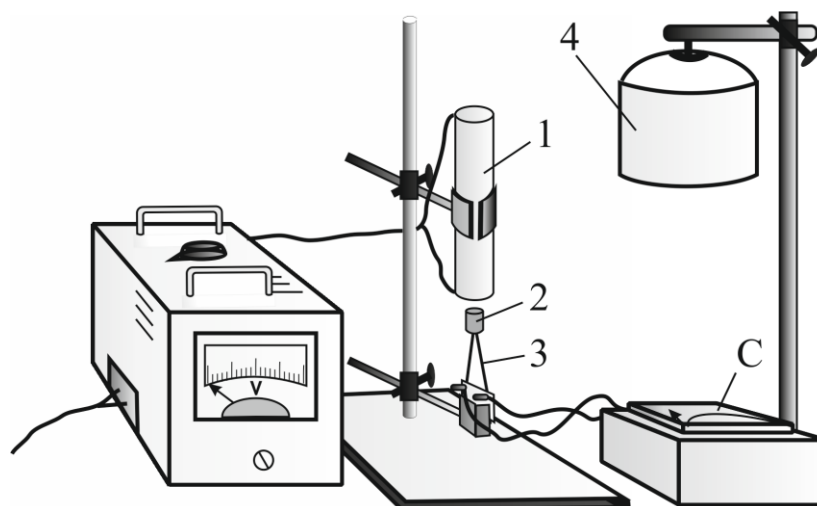


Рис. 6.1

Після цього за графіком (див. додатки) переводимо покази мілівольтметра в температуру і будуємо криву залежності температури від часу. Кожен зразок нагрівається один раз, і за цими даними будуються криві охолодження для мідного, залізного і алюмінієвого зразків. За еталон править зразок міді.

Обробка результатів

До кривих залежності $t = f(\tau)$ проводимо дотичні у точках, що відповідають $\tau_1 = 200$ с, $\tau_2 = 400$ с, $\tau_3 = 600$ с і транспортиром вимірюємо

кут для цих точок між дотичною і віссю Ox . Знаходимо $\operatorname{tg} \alpha$, який дорівнює похідній $\frac{\Delta t}{\Delta \tau}$ у точках 200, 400, 600 с.

Таким чином знаходимо швидкість охолодження у кожній точці для кожного зразка.

Одержані результати підставляємо у розрахункову формулу (6.5) і знаходимо питомі теплоємності для досліджуваних зразків. Визначаємо їх середні значення і порівнюємо з табличними. Знаходимо відносну та абсолютну похибки. Для виконання роботи необхідно мати міліметровий папір.

Контрольні запитання

1. Дати визначення таких понять: кількість теплоти, молярна та питома теплоємності.
2. Вивести робочу формулу для визначення питомої теплоємності методом охолодження.
3. Довести, що атомна теплоємність твердого тіла за постійного об'єму згідно з класичним поняттям дорівнює $3R$.
4. Чи залежить питома теплоємність твердого тіла від температури?
5. Які відхилення від закону Дюлонга і Пті Вам відомі? Чим вони пояснюються?

Лабораторна робота № 7

Визначення питомої теплоти плавлення льоду

Мета роботи: експериментально визначити питому теплоту плавлення льоду

Прилади і матеріали: калориметр, термометр, лід, фільтрувальний папір, важки, терези, кристалізатор.

Короткі теоретичні відомості

Питомою теплотою плавлення льоду називається фізична величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку потрібно затратити, щоб одиницю маси льоду перевести в рідкий стан при температурі плавлення.

Теплота плавлення твердого тіла легко може бути визначена способом змішування.

Якщо температура плавлення досліджуваного твердого тіла, наприклад, льоду нижча від температури калориметра, то тіло вводиться в калориметр з водою у твердому стані, де і плавиться.

За даними досліду можна скласти рівняння теплового балансу, з якого легко визначити питому теплоту плавлення льоду.

Нехай m – маса льоду, m_1 – маса води в калориметрі, m_2 – маса калориметра, t_1 – температура води в калориметрі на момент кидання в нього льоду, θ – остаточна температура в калориметрі, c_1 – питома теплоємність води, c_2 – питома теплоємність речовини калориметра.

Тоді кількість теплоти, одержана льодом в калориметрі при плавленні:

$$Q_1 = \lambda m, \quad (7.1)$$

де λ – питома теплота плавлення льоду, $\left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$.

Кількість теплоти, одержаної водою (що утворюється з льоду) при нагріванні її від 0°C до θ , становитиме

$$Q_2 = c_1 m (\theta - 0). \quad (7.2)$$

Кількість теплоти, яку віддає калориметр при охолодженні від t_1 до θ :

$$Q_3 = c_2 m_2 (t_1 - \theta). \quad (7.3)$$

Кількість теплоти, яку віддає вода в калориметрі при охолодженні від t_1 до θ :

$$Q_4 = c_1 m_1 (t_1 - \theta). \quad (7.4)$$

Очевидно, що теплота, яку одержує лід і вода з нього при нагріванні їх до θ , дорівнюватиме тій кількості теплоти, яку втрачає вода і калориметр разом, тобто

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 \quad (7.5)$$

або

$$m\lambda + c_1 m (\theta - 0) = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (t_1 - \theta). \quad (7.6)$$

Поправку на втрату теплоти внаслідок випромінювання вважаємо незначною. Для цього потрібно, щоб температура води в калориметрі перед тим як кинути туди лід, була на стільки градусів вища від кімнатної, на скільки вона буде нижчою після закінчення процесу.

Прилад для визначення теплоти плавлення являє собою звичайний калориметр, який складається з двох вставлених одна в одну металевих чашок. У деяких випадках зовнішня частина може бути пластмасовою. Дослід проводиться у внутрішній чашці, яка обов'язково вставляється у зовнішню, більшу чашку.

Хід роботи

1. Зважують порожню чашку калориметра (меншу). Нехай маса її буде m_2 .

2. Наливають в неї теплої води не менше половини і зважують. За різницею мас визначають масу наливої води. Нехай маса води буде m_1 .

3. Коли температура води в калориметрі на $5...10^\circ\text{C}$ перевищить кімнатну, вимірюють температуру t_1 , швидко кладуть у воду по одному шматочку сухого льоду (лід просушується фільтрувальним папером або марлею). Суміш води з льодом слід весь час помішувати і слідкувати за

показом термометра. Льоду треба кидати стільки, щоб температура в калориметрі стала нижчою від кімнатної на 5...10°С.

4. Як тільки покази термометра перестануть змінюватись (знижуватись), записують кінцеву температуру θ .

5. Потім знову зважують калориметр з водою і знаходять масу m розплавленого льоду.

6. З рівняння (7.6) знаходять питому теплоту плавлення льоду:

$$\lambda = \frac{(m_1c_1 + m_2c_2)(t_1 - \theta) - mc_1\theta}{m}. \quad (7.7)$$

7. Дослід повторюють кілька разів для різної температури води в калориметрі перед дослідом.

8. Всі маси вимірюють з точністю до 0,1 г, а температури – з точністю до 0,1°С. Знаходять середнє $\lambda_{\text{ср}}$. Результати дослідів записують у таблицю.

№ з/п	$c_1,$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$c_2,$ $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	$m,$ кг	$m_1,$ кг	$m_2,$ кг	$t_1,$ °С	$\theta,$ °С	$\lambda,$ $\frac{\text{Дж}}{\text{град}}$	$E,$ %

9. Для обчислення абсолютної похибки $\Delta\lambda$ використовуємо формулу абсолютної похибки дробу

$$\Delta\lambda = \frac{a\Delta b + b\Delta a}{b^2}, \quad (7.8)$$

де

$$a = (m_1c_1 + m_2c_2)(t_1 - \theta) - mc_1\theta, \quad (7.9)$$

$$b = m, \quad (7.10)$$

Враховуємо, що

$$\Delta m_1 = \Delta m_2 = \Delta m = 0,00005 \text{ кг},$$

$$\Delta t = \Delta \theta = 0,05^{\circ}\text{С}.$$

c_1, c_2 – постійні значення. Із (7.10) маємо

$$\Delta b = \Delta m = 0,00005 \text{ кг}.$$

Із (7.9) знаходимо Δa як абсолютну похибку різниці:

$$\Delta a = \Delta d + \Delta f, \quad (7.11)$$

де

$$\Delta d = \Delta[(m_1 c_1 + m_2 c_2)(t_1 - \theta)] = 2\Delta t(m_1 c_1 + m_2 c_2) + (t_1 - \theta)\Delta m(c_1 + c_2) \quad (7.12)$$

$$\Delta f = \Delta(m c_1 \theta) = c_1 m \Delta \theta + c_1 \theta \Delta m. \quad (7.13)$$

Обчислюємо Δd і Δf за (7.12) і (7.13) та підставляємо в (7.11).

Підставляємо значення в (7.8) з урахуванням (7.10) і (7.9) та знаходимо $\Delta \lambda$.

Обчислюємо відносну похибку вимірювань.

Висновок записати у вигляді: $\lambda = \lambda_{\text{ср}} \pm \Delta \lambda_{\text{ср}}$; $E = \dots\%$.

Контрольні запитання

1. Яка складова внутрішньої енергії, як і чому вона змінюється при плавленні? При кристалізації?
2. До якого роду фазових переходів належить плавлення? Кристалізація? Чому?
3. Як змінюється температури плавлення і кристалізації із збільшенням та зі зменшенням зовнішнього тиску на поверхню тіла?
4. З якою метою рекомендують початкову температуру води в калориметрі брати на $4..5^\circ\text{C}$ вищою від кімнатної, а лід розплавляти у воді доти, доки температура не стане $4..5^\circ\text{C}$ нижчою від кімнатної?
5. З якою метою рекомендують брати для досліду саме танучий лід і сушити його, витираючи фільтрувальним папером, а не сухий лід з холодильника?

Лабораторна робота №8

Визначення питомої теплоти пароутворення рідини

Мета роботи: експериментально визначити питому теплоту пароутворення води

Прилади і матеріали: калориметр, кип'ятильник, сухопарник (колба), терези з важками, барометр, термометр.

Короткі теоретичні відомості

Кипіння – це пароутворення, що відбувається як на вільній поверхні рідини, так і в її об'ємі. Відмітимо, що кипіння є не просте утворення двофазної системи, а перехід двофазної системи від спокійного існування до бурхливого, при якому бульбашки насиченої пари в рідині швидко ростуть, спливають і прориваються на зовні. Необхідною умовою кипіння є наявність в об'ємі рідини під меніском газової фази у вигляді бульбашок, які відіграють таку саме роль, як пилінки або іони в процесі конденсації, тобто роль зародків. Гази можуть бути розчинені в рідині або адсорбовані на стінках посудини. Бульбашки газу в процесі нагрівання рідини наповнюються насиченою паром при випаровуванні рідини всередині бульбашки. Кипіння рідини починається при температурі, коли рівноважний тиск насиченої пари стає таким, що дорівнює зовнішньому тиску. Очевидно, що під зовнішнім тиском слід розуміти атмосферний і гідростатичний тиски та тиск, обумовлений кривизною поверхні бульбашки.

Отже, температура кипіння залежить від зовнішнього тиску. Оскільки питомий об'єм пари значно більший від питомого об'єму рідини, то з рівняння Клайперона-Клаузіуса випливає, що з підвищенням тиску температура кипіння завжди підвищується. В результаті тривалого кипіння утворення бульбашок зменшується, потім припиняється і рідина перестає кипіти, оскільки вона позбавляється центрів кипіння. Отже, можна дістати перегріту рідину, температура якої вища від температури кипіння при даному зовнішньому тиску, але вона не кипить. При високих

температурах внаслідок ймовірності флуктуацій густини можуть утворюватись і рости бульбашки пари навіть за відсутності зародків у вигляді газових бульбашок і перегріта рідина закипає з вибухом. Вибухове кипіння є досить загрозливим для посудини, що містить рідину.

Виходячи з цього та інших причин, слід мати на увазі, що цілком фіксовану температуру має не сама рідина, яка кипить, а її пара. Цей факт є визначальним для методики градуювання термометрів.

Однією з фізичних величин, яка характеризує процес кипіння даної рідини, є *питома теплота пароутворення* – фізична величина, що чисельно дорівнює кількості теплоти, яку потрібно надати одиниці маси рідини, щоб перетворити її на пару тієї самої температури за нормального тиску:

$$r = \frac{Q}{m}.$$

У даній роботі досліджується зворотне явище – конденсація пари.

Питомою теплотою конденсації називається фізична величина, яка чисельно дорівнює кількості теплоти, яка виділяється одиницею маси пари при перетворенні її в рідину тієї самої температури за нормального тиску.

Оскільки питома теплота пароутворення дорівнює питомій теплоті конденсації, то для виконання цієї роботи скористаємось цим положенням.

Якщо пропустити у калориметр з водою суху пару киплячої води, то теплота, що виділяється при конденсації пари і охолодженні утвореної з неї рідини, піде на нагрівання води та калориметра.

За даними, які дістаємо з досліду, можна за допомогою рівняння теплового балансу легко знайти питому теплоту конденсації пари, а потім перейти до питомої теплоти пароутворення.

Позначимо:

r – питома теплота пароутворення, ;

m – маса пари;

τ – точка кипіння (залежить від атмосферного тиску);

c_1 – питома теплоємність води;

θ – остаточна температура суміші;

m_1 – маса води в калориметрі;

m_2 – маса калориметра (внутрішньої посудини з алюмінію);

c_2 – питома теплоємність речовини калориметра;

t – початкова температура води в калориметрі.

Теплота, що виділяється парою масою m при перетворенні її у рідину: $Q_1 = rm$. Кількість теплоти, що виділяється утвореною з пари рідиною при охолодженні її від температури кипіння τ до температури суміші θ : $Q_2 = c_1 m_1 (\tau - \theta)$. Кількість теплоти, яку одержує вода в калориметрі при нагріванні її від температури t до температури суміші θ : $Q_3 = c_1 m_1 (\theta - t)$. Кількість теплоти, яку дістає калориметр (внутрішня посудина з алюмінію) при нагріванні її від температури t до температури суміші θ : $Q_4 = c_2 m_2 (\theta - t)$.

Рівняння теплового балансу матиме такий вигляд:

$$rm + c_1 m_1 (\tau - \theta) = (c_1 m_1 + c_2 m_2) (\theta - t), \quad (8.1)$$

З рівняння теплового балансу (8.1) знаходимо питому теплоту конденсації

$$r = \frac{(c_1 m_1 + c_2 m_2) (\theta - t) - c_1 m_1 (\tau - \theta)}{m}. \quad (8.2)$$

Точка кипіння води (чи будь-якої іншої рідини) залежить від атмосферного тиску і знаходиться з таблиць за формулою:

$$\tau = 100 + 0,0375(H - 760),$$

(H – атмосферний тиск, *мм.рт.ст.*) або з таблиці (див. додатки табл. 11).

Прилад для визначення питомої теплоти пароутворення складається з кип'ятильника, сухопарника, термометра, калориметра з водою. Сухопарник служить для того, щоб рідина, яка утворюється при конденсації пари на підвідних трубках приладу, не потрапляла до калориметра. У калориметр повинна поступати тільки суха пара.

Хід роботи

1. Налити у кип'ятильник води трохи більше половини і поставити на електроплитку (крани на кип'ятильнику не крутити!).
2. Поки вода нагріється визначити за барометром атмосферний тиск з точністю до 1 мм.рт.ст. і за таблицею чи формулою знайти точку кипіння води (за даного тиску) з точністю до 0,5°C.
3. Зважити з точністю до 0,1 г внутрішню посудину калориметра. Нехай маса її буде m_2 . Калориметр має бути зовсім сухим.
4. Безпосередньо перед випусканням сухої пари в калориметр налити холодної води, знову зважити і визначити її масу m_1 .
5. З точністю до 0,1 визначити температуру води у калориметрі, яка має бути на 4...5°C нижчою за кімнатну.
6. Після того, як вода енергійно закипить у кип'ятильнику і добре прогріється сухопарник, випустити з нього воду через окрему трубку із затискачем. Коли із трубки, що виходить із сухопарника піде пара, опустити її у калориметр з водою.
7. Воду в калориметрі весь час помішувати термометром і, коли температура води перевищить кімнатну на 4...5°C, припинити доступ пари. Виміряти з точністю до 0,5°C температуру води в калориметрі θ .
8. Виймаючи термометр, струсити з нього воду в калориметр. Останній зважити з точністю до 0,1 г, визначити масу m сконденсованої пари.
9. Дослід повторити тричі і результати вимірювань записати у звітну таблицю.

m , кг	m_1 , кг	m_2 , кг	c_1 , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	c_2 , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	t , °C	τ , °C	θ , °C	H , <i>мм.рт.ст.</i>	r , $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	E , %

Під час обрахунків похибок вважати, що

$$\Delta t = \Delta \theta = \Delta \tau = 0,05^{\circ}\text{C}; \quad \Delta m_1 = \Delta m_2 = \Delta m = 5 \cdot 10^{-5} \text{ кг}; \quad c_1, c_2 = \text{const}$$

За загальним правилом відшукати абсолютну та відносну похибки (дивись л/р №7).

Висновок записати у вигляді:

$$r = r_{\text{cp}} \pm \Delta r_{\text{cp}}; E = \dots\%$$

Контрольні запитання

1. Що називається пароутворенням? Конденсацією?
2. Яка складова внутрішньої енергії пов'язана з фазовим переходом першого роду? Як і чому змінюється ця складова при пароутворенні та конденсації?
3. До якого роду фазових переходів належать пароутворення та конденсація? Чому?
4. Як змінюється температура кипіння, якщо зменшувати або збільшувати тиск на поверхню рідини? Чому?
5. Записати і пояснити рівняння Клайперона-Клаузіуса залежності тиску насиченої пари від температури.

Лабораторна робота №9

Визначення холодильного коефіцієнту та відношення теплоємностей газу c_p/c_v методом Клемана-Дезорма

Мета роботи: визначити відношення теплоємностей c_p/c_v та холодильний коефіцієнт ε для повітря, що виконує SVT -цикл.

Прилади і матеріали: прилад для виконання досліду Клемана-Дезорма; ручний нагнітальний насос (насос Шінца).

Короткі теоретичні відомості.

Теплоємність – це калорична властивість термодинамічної системи. Вона визначає кількість теплоти, яку потрібно витратити для зміни температури системи на 1°C (або 1K). Тому:

$$C = \frac{\delta Q}{dT}, [C] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{град}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right].$$

Оскільки δQ залежить від способу теплообміну, тому й теплоємність є функцією процесу: одна й та ж система в залежності від того, що в ній відбувається під час нагрівання буде володіти різними теплоємностями. Чисельно величина C змінюється в межах від $-\infty$ до $+\infty$. На практиці часто використовують питомі значення цієї величини, наприклад, *питому теплоємність*:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\delta Q}{m dT}, [c] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right];$$

або молярну теплоємність:

$$C_v = \frac{C}{\nu} = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT} = c\mu, [C_v] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right].$$

Найбільше практичне значення для газів мають його теплоємності C_p і C_v за сталих тиску або об'єму. Питомі теплоємності газу при сталому тиску і об'ємі позначаються маленькими літерами, відповідно як c_p і c_v , і пов'язані з теплоємностями C_p і C_v оскільки є питомими до маси газу, тобто

$$c_p = \frac{C_p}{m}, c_v = \frac{C_v}{m}.$$

Для питомих теплоємностей ідеального газу має місце рівняння Майєра:

$$c_p = c_v + \frac{R}{\mu},$$

де R – універсальна газова стала, μ – молярна маса газу. Це рівняння є наслідком закону Джоуля, в якому йдеться про те, що внутрішня енергія ідеального газу при його ізотермічному розширенні в пустоту не змінюється.

Процес, що відбувається за сталої температури і пов'язаний зі зміною тиску та об'єму даної маси газу, називається *ізотермічним*.

Адіабатним називається такий процес зміни газових параметрів, коли газ не дістає теплоти ззовні і не віддає її у навколишнє середовище.

За швидкого стискання газ нагрівається, а за швидкого розширення – охолоджується. Чим швидше відбувається процес стиску або розширення газу, тим ближче цей процес наближається до адіабатного. За досить малий проміжок часу газ не встигає обмінятися теплотою із зовнішнім середовищем.

В адіабатних процесах ідеального газу використовують поняття показника адіабати γ , який визначається відношенням теплоємностей газу при сталому тискові та об'ємові:

$$\gamma = C_p / C_v,$$

або відношенням їх питомих c_p / c_v , або молярних C_{vp} / C_{vV} величин.

Метод Клемана-Дезорма ґрунтується на адіабатному розширенні газів (у даному випадку – повітря) і дає можливість обчислити їх показник адіабати γ .

Будь-який коловий термодинамічний процес, що виконується газом, в залежності від напрямку його протікання можна розглядати як цикл теплової або холодильної машини (рис.9.1).

Всі теплові машини поділяють на три основні типи: теплові двигуни, теплові насоси (нагрівальні машини) і холодильні машини.

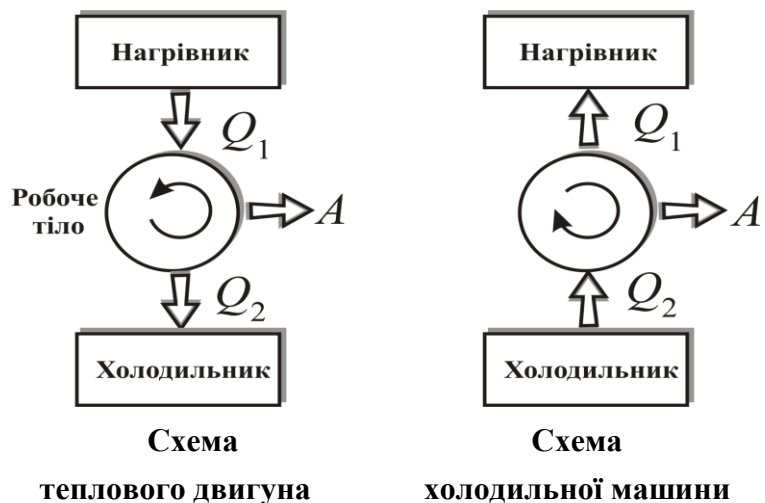


Рис. 9.1

Теплові двигуни перетворюють тепло в роботу. *Теплові насоси* за рахунок затраченої роботи і виділення у середовище (з нижчою температурою) тепла нагрівають тіла до більш високої температури. *Холодильні машини* внаслідок затрат на виконання роботи відбирають тепло від охолоджуваного тіла і віддають це тепло в навколишнє середовище.

Під час безпосередньої дії цих машин, робоче тіло здійснює замкнений цикл:

в двигуні – в прямому напрямі (за годинниковою стрілкою);

в холодильнику і насосі – в зворотному (проти годинникової стрілки).

Для всіх машин $Q_1 = Q_2 + A$, де Q_1 – отримана робочим тілом (чи надана у зворотному циклі) кількість тепла від середовища (робочим тілом) з більш високою температурою; Q_2 – передана (чи отримана) кількість теплоти середовищу (робочим тілом) з більш низькою температурою.

Згідно другого начала термодинаміки для теплового двигуна $Q_1 > A$, а для насоса і холодильника $A \leq Q_1$ ($A = Q_1$, а $Q_2 = 0$ означає, що в тепло перетворюється лише витрачена робота). Роботу цих машин характеризують відповідними коефіцієнтами:

Двигун – коефіцієнтом корисної дії (ККД):

$$\eta = \frac{A}{Q_1} < 1;$$

Насос – коефіцієнтом перетворення:

$$k = \frac{Q_1}{A} \geq 1 \quad (k = 0, Q_2 = 0);$$

Холодильник – холодильним коефіцієнтом:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_1 - A}{A} = \frac{Q_1}{A} - 1 = k - 1,$$

тобто ε може бути довільним ($k = 0 \Rightarrow \varepsilon < 0$; $k > 0 \Rightarrow \varepsilon > 0$; $k > 2 \Rightarrow \varepsilon > 1$).

В досліді Клемана-Дезорма повітря здійснює коловий процес, що складається з ізотерми $3 \rightarrow 1$ ($T = const$), адіабати $1 \rightarrow 2$ ($S = const$) та ізохори $2 \rightarrow 3$ ($V = const$), так званий *SVT*-цикл (рис. 9.2).

Такий цикл частково використовується в охолоджувачах електронних блоків.

Для *SVT*-циклу холодильний коефіцієнт ε дорівнює відношенню кількості тепла, яку забрав газ у охолодженого тіла $Q_2=Q_{31}$, до роботи

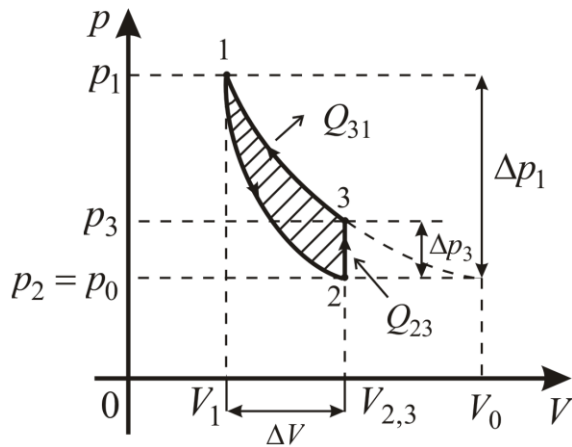


Рис. 9.2

циклу $A = |A_{31}| - A_{12}$.

$$\varepsilon = \frac{|Q_{31}|}{|A_{31}| - A_{12}},$$

де A_{31} – робота ізотермічного стиску повітря; A_{12} – робота адіабатного розширення повітря.

З першого закону термодинаміки для такого колового процесу випливає, що

$$-Q_{31} + Q_{23} = -A_{31} + A_{12} \quad (9.2)$$

Для ізотермічного процесу $\delta Q = \delta A$, тому $Q_{31} = A_{31}$ тоді із (9.2), отримуємо, що $Q_{23} = A_{12}$. Отже, формулу (9.1) можна подати й інакше:

$$\varepsilon = \frac{A_{31}}{A_{31} - A_{12}} = \frac{1}{1 - \frac{A_{12}}{A_{31}}}. \quad (9.3)$$

Показник адіабати γ може бути обрахований як відношення кутових коефіцієнтів адіабати та ізотерми. Із рівнянь *S* та *T*-процесів відповідно випливає, що:

$$pV^\gamma = \text{const} \Rightarrow p = \frac{\text{const}}{V^\gamma} \text{ – для адіабатного процесу, тоді}$$

$$\left(\frac{dp}{dV}\right)_S = -\gamma \frac{\text{const}}{V^{\gamma+1}} = -\gamma \frac{pV^\gamma}{V^{\gamma+1}} = -\gamma \frac{p}{V}; \quad (9.4)$$

$$pV = \text{const} \Rightarrow p = \frac{\text{const}}{V} \text{ – для ізотермічного процесу, тоді}$$

$$\left(\frac{dp}{dV}\right)_{\dot{N}} = -\frac{\text{const}}{V^2} = -\frac{pV}{V^2} = -\frac{p}{V}. \quad (9.5)$$

Враховуючи (9.5), рівняння (9.4) запишемо у вигляді:

$$\left(\frac{dp}{dV}\right)_S = \gamma \left(\frac{dp}{dV}\right)_{\dot{N}}. \quad (9.6)$$

Ця рівність виконується при будь-якому значенні V , отже, вона застосовна і для середніх значень, що вимірюються та які на інтервалі $\Delta V = V_2 - V_1$ відповідно рівні:

$$\left(\frac{\Delta p}{\Delta V}\right)_{\dot{N}} = \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\Delta V}; \quad \left(\frac{\Delta p}{\Delta V}\right)_S = \frac{\Delta p_1}{\Delta V}.$$

Тоді, з урахуванням (9.6), маємо

$$\frac{\Delta p_1}{\Delta V} = \gamma \frac{\Delta p_1 - \Delta p_2}{\Delta V},$$

звідки

$$\gamma = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2}. \quad (9.7)$$

Основою експериментального приладу для визначення показника адиабати γ і холодильного коефіцієнту ϵ є великий скляний товстостінний балон А, сполучений гумовими трубками з манометром В і насосом С (рис. 9.3). Кран K_1 у трубці, з'єднаний з пробкою, що закриває балон та сполучає його з навколишнім повітрям.

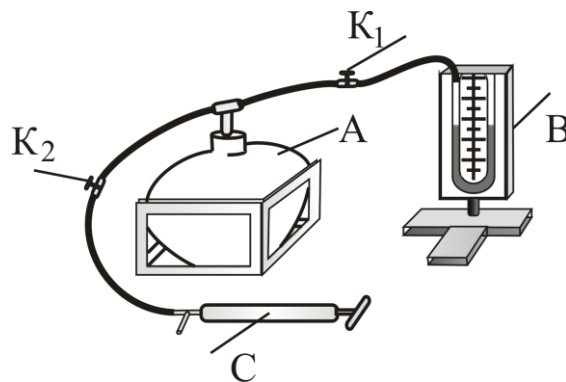


Рис. 9.3

У балон А, наповнений повітрям при атмосферному тиску, нагнітаємо повітря до деякого нового тиску. Маса повітря у балоні, що займала певний об'єм стискається до тиску p_1 і займатиме менший об'єм V_1 . Одночасно при цьому нагрівається стиснена маса повітря. Припинивши накачування, зачекаємо декілька хвилин, поки температура повітря у балоні дорівнюватиме кімнатній $T_1 = T_0$ (перший стан повітря). Остаточну різницю рівнів, що встановилася у манометрі, позначимо h_1 . Тоді тиск у балоні, вимірюваний у сантиметрах водяного стовпчика, дорівнюватиме $p_1 = p_0 + \Delta p_1 = \rho g(H + h_1)$ (H – атмосферний тиск в одиницях довжини).

Виймаємо на короткий час кран K_1 , щоб тиск у балоні зрівнявся з атмосферним: $p_2 = p_0 \sim H$ (при цьому рівні рідин у манометрі зрівняються), після цього вставляємо кран K_1 . Повітря в балоні швидко розширюється до об'єму V_2 (при цьому, зважаючи на малий час розширення, помітного теплообміну між стінками балона і навколишнім повітрям не буде). Температура повітря у балоні зменшується до T_2 (другий стан повітря).

Чекаємо, поки температура повітря у балоні дорівнюватиме $T_1 = T_0$. Об'єм V_2 залишається незмінним, тиск при нагріванні повітря збільшиться до p_3 . Різниця рівнів рідин у манометрі нехай буде h_2 , тоді $p_3 \sim H + h_2$ (H – атмосферний тиск), (третій стан повітря).

Усі розглянуті процеси в балоні віднесено до певної маси повітря, яка залишається під час досліду у балоні незмінною.

Отже, показник адіабати для повітря, визначений нами за формулою (9.7), може бути вимірним за допомогою досліду Клемана-Дезорма за різницею рівнів води h_1 і h_2 у U-подібному манометрі в точці 1 процесу $3 \rightarrow 1$ і точці 3 процесу $2 \rightarrow 3$, тобто

$$\gamma = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 - \Delta p_2} = \frac{h_1}{h_1 - h_2}, \quad (9.8)$$

де $\Delta p_1 = \rho g h_1$, $\Delta p_2 = \rho g h_2$ – різниці тисків повітря *SVT*-циклу і різниці рівнів води h_1 і h_2 у U-подібному манометрі.

Для відшукування холодильного коефіцієнту ε у досліді Клемана-Дезорма потрібно скористатися формулою (9.3) і врахувати, що повітря у балоні виконує *SVT*-цикл за рахунок повітря, що підкачується із навколишнього середовища (стан 1) і видаляється із балона (стан 2) для уможливлення досліджуваного колового процесу.

У нашому випадку робота повітря під час його ізотермічного стиску може бути наближено визначеною як площа криволінійної трапеції, що утворюється ізотермою $3 \rightarrow 1$, основами трапеції (їм відповідають тиски

Δp_1 і Δp_2), а також висотою трапеції, що являє собою у досліджуваному *SVT*-циклі зміну об'єму повітря $\Delta V = V_2 - V_1$:

$$A_{31} \approx \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2}{2} \Delta V. \quad (9.9)$$

Наближення тут полягає у тому, що ізотерма в (p, V) координатах являє собою гіперболу, яку при незначній зміні об'єму повітря ΔV , можна наближено вважати прямою. Тоді формула для обрахунку площі трапеції (рис. 9.4) буде основою для визначення роботи ізотермічного стиску повітря $3 \rightarrow 1$.

Роботу повітря під час його адіабатного розширення $1 \rightarrow 2$ її можна обрахувати як площу криволінійної трапеції, що обмежується адіабатою $1 \rightarrow 2$ (яку ми теж приймаємо за пряму), основам трапеції відповідають тиски Δp_1 і $p_0 = 0$ (атмосферний тиск p_0 ми обираємо рівним нулеві, тому, що в точці 2 досліджуваного *SVT*-циклу повітря, за рахунок якого цей процес розпочався, вже вийшло у навколишнє середовище – кран K_1 ненадовго відривався), а також висотою трапеції ΔV , тобто

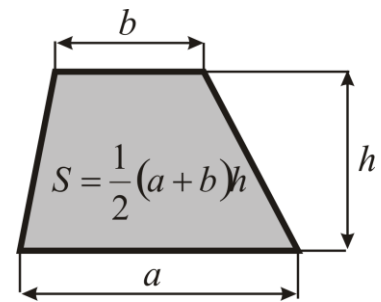


Рис. 9.4

$$A_{12} \approx \frac{\Delta p_1}{2} \Delta V. \quad (9.10)$$

Тоді для A_{12}/A_{31} :

$$\frac{A_{12}}{A_{31}} = \frac{\Delta p_1}{\Delta p_1 + \Delta p_3} \quad \text{або} \quad \frac{A_{12}}{A_{31}} = \frac{h_1}{h_1 + h_2}.$$

де Δp_1 , Δp_2 – різниці тисків повітря *SVT*-циклу і різниці рівнів води h_1 і h_2 у U-подібному манометрі. Отже, холодильний коефіцієнт, згідно (9.3):

$$\varepsilon = \frac{A_{31}}{A_{31} - A_{12}} = \frac{h_1}{h_2} + 1.$$

Врахувавши (9.8), отримаємо

$$\varepsilon = \frac{2\gamma - 1}{\gamma - 1}. \quad (9.11)$$

Хід роботи

1. Відкривши кран K_2 , накачати в балон повітря, щоб різниця рівнів у манометрі була значною. Кран K_1 повинен бути завжди у відкритому положенні. Закрити кран K_2 і зафіксувати різницю рівнів h_1 , що остаточно встановилася в манометрі після охолодження нагрітого при стиску повітря до температури навколишнього середовища.

2. Вийняти кран K_1 і, коли рівні манометрів зрівняються, швидко його вставити. Через 1...2 хв зафіксувати різницю рівнів h_2 .

3. Дослід повторити не менше 10 разів за різних показів манометра. Здобуті результати занести до таблиці (таблицю результатів скласти самостійно). За формулою (9.8) обчислити γ для повітря і порівняти з теоретичним, вважаючи повітря двоатомним газом. Обчислити середнє значення показника адіабати γ і похибки вимірювань.

4. За формулою (9.11) обчислити холодильний коефіцієнт ε і похибки вимірювань.

Контрольні запитання

1. Навести приклади ізобарного, ізотермічного і адіабатного процесів в газах. Як вони реалізуються?

2. Чому $C_p > C_v$? Пояснити фізичний зміст рівняння Майєра.

3. Чому манометр приладу в роботі наповнюють спиртом (водою), а не ртуттю?

4. Як впливає на результат дослідження запізнення з перекриттям крану K_1 ?

5. Чому дорівнюють теплоємності газу при ізотермічному і адіабатному процесах?

6. Що показує холодильний коефіцієнт?

7. Пояснити цикл в досліді Клемана-Дезорма.

Лабораторна робота №10

Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметру молекул повітря

Мета роботи: визначити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр повітря, досліджуючи явище переносу – в'язкість.

Прилади і матеріали: установка для виконання роботи, секундомір, дві хімічні склянки, лінійка.

Короткі теоретичні відомості

Згідно з молекулярно-кінетичною теорією хаотичний молекулярний рух є фізичною причиною спостережуваних у газах явищ переносу: енергії при вирівнюванні температури (теплопровідність), маси – при вимірюванні концентрації (дифузія) і переносу імпульсу (в'язкість). Хоча швидкості молекул досить великі та можуть сягати сотні метрів за секунду, процеси відбуваються порівняно повільно. Причиною цього є те, що у явищах переносу важливу роль відіграють не тільки швидкості молекул, а й співудари між ними, які перешкоджають вільному руху молекул, вимушують їх рухатися не прямолінійно, а зигзагоподібно за ламаною. Сили взаємодії стають помітними лише за малих відстаней між ними. Тому приймається, що на шляху вільного пробігу молекули рухаються рівномірно і прямолінійно. Відхилення від прямолінійних траєкторій відбувається лише за достатнього зближення. Зміна напрямку руху на помітний кут під дією іншої молекули називається зіткненням молекул. Саме з таким поняттям пов'язана величина, якою характеризують геометричні розміри молекул.

Та мінімальна відстань між центрами двох молекул, на яку вони зближаються, і між якими під дією сил відштовхування відбувається явище, подібне до удару, називається ефективним діаметром молекули. Відстань, яку проходить молекула між двома послідовними зіткненнями, називається довжиною вільного пробігу молекули. Нас цікавить середня

довжина вільного пробігу молекули, тому що молекул багато і регулярності у процесі зіткнення немає.

Для визначення довжини вільного пробігу газових молекул та їхнього ефективного діаметра досліджуються явища переносу – дифузія, теплопровідність та в'язкість. Конденсація, температура або імпульс молекул обумовлені їх зіткненнями у процесі теплового руху. Тому вивчення явищ переносу дає можливість з'ясувати наслідки, що характеризують зіткнення – довжину вільного пробігу та поперечний переріз молекул.

Молекулярно-кінетична теорія дозволила одержати формули, в яких макроскопічні параметри газу (p, V, T) пов'язані з його мікропараметрами (розміри, маса молекули, її швидкість).

У даній роботі обчислюється середня довжина вільного пробігу та ефективний діаметр молекули повітря за коефіцієнтом внутрішнього тертя, або коефіцієнтом в'язкості.

З молекулярно-кінетичної теорії відома формула, яка пов'язує в'язкість із середньою довжиною вільного пробігу молекули:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \bar{\lambda} \bar{v}, \quad (10.1)$$

де η – коефіцієнт внутрішнього тертя; ρ – густина газу (повітря); $\bar{\lambda}$ – довжина вільного пробігу молекул повітря (середнє значення); \bar{v} – середня арифметична швидкість молекул повітря.

З формули (10.1) маємо

$$\bar{\lambda} = \frac{\eta}{\frac{1}{3} \rho \bar{v}}. \quad (10.2)$$

В'язкість можна визначити, скориставшись відомою формулою Пуазейля, яка дозволяє для ламінарної течії виразити в'язкість через об'єм газу, що протікає через переріз трубки за певний час при наявності різниці тисків на кінцях трубки Δp :

$$V = \frac{\pi r^4 t}{8 \eta l} \Delta p,$$

звідки

$$\eta = \frac{\pi r^4 t}{8\eta V} \Delta p, \quad (10.3)$$

де r – радіус капіляра; t – час, протягом якого витікає даний об’єм газу; Δp – різниця тисків на кінцях трубки; V – об’єм протікаючого газу, що дорівнює об’єму витікаючої рідини; l – довжина капіляра.

Усі величини, що входять до (10.3) легко піддаються вимірюванню.

Середня швидкість газової молекули може бути знайдена за формулою молекулярно-кінетичної теорії:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (10.4)$$

де R – універсальна газова стала; T – абсолютна температура газу; μ – молярна маса даного газу.

Густина можна знайти з рівняння Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (10.5)$$

звідки

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{\mu p}{RT},$$

де p – тиск газу.

Підставивши рівняння (10.3)-(10.5) в (10.2), одержимо

$$\bar{\lambda} = \frac{3\pi r^4 \Delta p t \sqrt{T}}{8Vlp} \sqrt{\frac{\pi R}{8\mu}} = A \cdot \frac{r^4 \Delta p t \sqrt{T}}{Vlp}, \quad (10.6)$$

де стала $A = \frac{3\sqrt{\pi^3 R}}{16\sqrt{2\mu}}$.

Ефективний діаметр молекули можна розрахувати з формули, що пов’язує його з довжиною вільного пробігу:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2\pi n} D^2}, \quad (10.7)$$

де n – концентрація молекул газу; D – ефективний діаметр молекули.

Число молекул в одиниці об'єму за даних умов виражається формулою

$$n = n_0 \frac{pT_0}{p_0T}, \quad (10.8)$$

де n_0 – число Лошмідта – концентрація молекул газу за нормальних умов, $T_0 = 273 \text{ К}$; $p_0 = 10^5 \text{ Їф}$.

Використовуючи формули (10.7) та (10.8), одержуємо вираз для ефективного діаметра молекул газу:

$$D = \sqrt{\frac{p_0 T_0}{\sqrt{2\pi} n_0 p T_0 \lambda}}. \quad (10.9)$$

Опис установки

Для визначення в'язкості змонтована установка (рис. 10.1). Посудина на $3/4$ заповнюється водою. Зверху на ній встановлюється капіляр. Якщо кран відкритий, то вода спочатку буде вилитися з посудини безперервним струменем, а потім серіями окремих крапель. У той самий час через капіляр посудини буде всмоктуватися повітря. Це означає, що капіляр і буде тією трубкою, в якій встановиться ламінарна течія в результаті того, що різні її кінці будуть знаходитися під різними тисками (верхній кінець під дією атмосферного тиску, нижній під дією тиску меншого ніж атмосферний), тому що капіляр дуже вузький і повітря просочується дуже повільно.

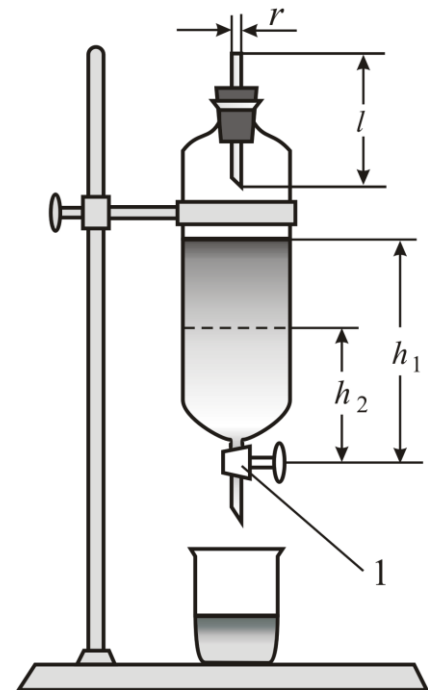


Рис. 10.1

Хід роботи

1. Відкрити кран 1, і дочекатись доки вода почне витікати з посудини краплями, підставити вже зважену хімічну склянку та одночасно включити секундомір. Тут же слід позначити рівень води в посудині h_1 .

2. Коли в склянці буде приблизно 50...70 мл води, перекрити кран і зупинити секундомір. Записати час витікання рідини.

3. Заміряти новий рівень води h_2 .

4. Зважити склянку з водою і знаючи масу води, що витекла визначити її об'єм. Це і буде об'єм повітря, що просочилось у посудину через капіляр.

5. Різницю тисків, яка вимушувала повітря просочуватись у посудину, можемо знайти за формулою

$$\Delta p = \rho g \frac{h_1 + h_2}{2},$$

де ρ – густина води.

6. Температуру вимірюють за кімнатним термометром.

7. Атмосферний тиск визначається за показами барометра та переводять у паскалі.

Всі обчислення проводять у СІ.

$$l = 0,055 \text{ м}, r = 0,0001 \text{ м}, R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}},$$
$$\mu = 28,96 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}, n_0 = 2,69 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{м}^3}.$$

8. Підставивши виміряні та задані величини у (10.6), обчислити довжину вільного пробігу молекули повітря за кімнатних умов.

9. Дослід повторити тричі.

10. За середнім значенням $\bar{\lambda}$ знайти ефективний діаметр D молекули повітря за (10.9).

11. Розрахувати похибку вимірювань для середньої довжини вільного пробігу молекули:

$$E = \frac{\Delta \bar{\lambda}}{\bar{\lambda}} = \frac{4\Delta r}{r} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{2\Delta h}{h_1 + h_2} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta p}{p} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta T}{T}.$$

Контрольні запитання

1. Яке фізичне явище лежить в основі розглянутого методу визначення $\bar{\lambda}$? Яким законом воно описується?

2. За яких умов можна користуватися розглядуваним методом визначення $\bar{\lambda}$? Чому?
3. Вивести обчислювальну формулу для $\bar{\lambda}$.
4. Вивести обчислювальну формулу для відносних похибок $\bar{\lambda}$ та D .
5. Вивести формулу Пуазейля.

Лабораторна робота №11

Визначення в'язкості рідини методом Стокса

Мета роботи: виміряти коефіцієнт в'язкості рідини методом Стокса.

Прилади і матеріали: скляна посудина з рослинною олією, лінійка, секундомір, крапельниця, відливна посудина, терези, важки.

Короткі теоретичні відомості

В'язкістю називається властивість рідини або газу чинити опір при відносному переміщенні їхніх шарів.

У потоках реальних рідин поблизу змочуваних твердих тіл різні шари рідини мають неоднакову швидкість. Швидкість шару, який безпосередньо торкається твердого тіла, дорівнює нулю; у міру віддалення від поверхні твердого тіла відносна швидкість шарів рідини збільшується. Інакше кажучи, у таких потоках спостерігається відносний рух одних шарів відносно інших (в напрямі, перпендикулярному до потоку, існує градієнт швидкості).

Сила в'язкості рідин при ламінарній течії, як і сила в'язкості газів, визначається законом Ньютона:

$$F = \eta \frac{\Delta v}{\Delta z} S,$$

де $\frac{\Delta v}{\Delta z}$ – градієнт швидкості (зміна швидкості на одиницю відстані z між шарами $|\text{grad } v|$); S – площа поверхні внутрішнього шару, на яку розраховується сила внутрішнього тертя.

Якщо напрям осі Oz перпендикулярний до рухомих шарів рідини, тоді градієнт швидкості

$$\text{grad } v = \frac{dv}{dz},$$

і тоді закон Ньютона запишеться так:

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

Коефіцієнт пропорційності η називають *коефіцієнтом динамічної в'язкості*. Його фізичний зміст можна встановити, користуючись законом Ньютона:

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

для $S = 1$, $\frac{dv}{dz} = 1$, $\eta = F$, тобто коефіцієнт динамічної в'язкості чисельно дорівнює силі тертя між двома сусідніми шарами, яка діє на одиницю поверхні шару при градієнтові швидкості, що дорівнює одиниці: $[\eta] = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$.

В'язкість рідини зумовлена рухливістю окремих молекул або атомів на відміну від газів, для яких внутрішнє тертя є результатом перенесення імпульсу хаотичним рухом молекул. Щодо рідин, то поняття імпульсу

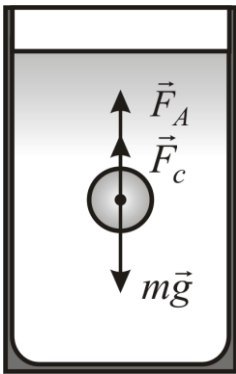


Рис. 11.1

навіть в наближеному розгляді втрачає сенс, бо він дуже змінюється у зв'язку з коливаннями молекул рідини відносно рівноважних положень.

Метод Стокса для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості рідин ґрунтується на вимірюванні швидкості рівномірного руху тіла сферичної форми (кульки або краплі води) у досліджуваній рідині (рис. 11.1). За законом Стокса сила в'язкості рідин

$$F_c = 6\pi\eta rv, \quad (11.1)$$

де r – радіус кульки; v – швидкість її руху.

При падінні кульки в рідині ця сила спочатку зростає, але швидко сила в'язкості, архімедова сила \vec{F}_A та сила тяжіння $m\vec{g}$ врівноважуються, а рух краплі стає рівномірним. Згідно з II законом Ньютона

$$\begin{aligned}
 ma &= mg - F_A - F_c, \quad a = 0, \\
 mg &= F_A + F_c.
 \end{aligned}
 \tag{11.2}$$

Підставивши значення сил, дістанемо:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 dg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g + 6\pi\eta rv,
 \tag{11.3}$$

звідки

$$\eta = \frac{2}{9}\left(\frac{d - \rho}{v}\right)gr^2,
 \tag{11.4}$$

де d – густина води (взяти з таблиці); ρ – густина рідини, рослинної олії (взяти з таблиці); $g = 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}$.

Враховуючи деформацію водяної краплі, одержимо

$$\eta = \frac{1}{K} \cdot \frac{2}{9}\left(\frac{d - \rho}{v}\right)gr^2.
 \tag{11.5}$$

Коефіцієнт K визначається з рівняння

$$K = \left(\frac{2}{3} + \frac{\eta'}{\eta}\right) / \left(1 + \frac{\eta'}{\eta}\right),$$

де η' – в'язкість рідини, що створює краплі (для даного випадку – вода); η – в'язкість середовища (олія).

За дуже великих значень η'/η коефіцієнт K наближається до одиниці, а за дуже малих – до $2/3$. Для даного випадку $K = 2/3$, $K^{-1} = 3/2$.

Коефіцієнт в'язкості різних мастил має велике технічне значення, бо визначає їх якість. В'язкість рідин залежить від температури. Наприклад, для гліцерину при зміні температури на 20°C (від 0 до 20°C) коефіцієнт в'язкості змінюється майже в 5 разів. Звідси видно, що при визначенні в'язкості треба обов'язково вказувати температуру рідини, за якої проводиться дослід.

Опис лабораторної установки

Установка (рис. 11.2) складається зі скляної посудини В з краном *b*. Посудина В наповнюється рослинною олією, коефіцієнт в'язкості якої треба визначити. Бюретку А встановлюють над посудиною і наливають у неї воду. Злегка відкриваючи кран *a*, пускають краплі води в олію. Краплини води повинні падати з малої висоти, щоб при падінні на поверхню олії вони не розбивалися.

Хід роботи

1. Визначити температуру $\tau^{\circ}\text{C}$ досліджуваної рідини з точністю до $0,5^{\circ}\text{C}$.

2. Визначити швидкості падіння краплини води за формулою $v = \frac{l}{t}$ (l – це відстань між мітками на циліндрі). Відкриття крану на бюретці підбирається так, щоб краплини повільно проходили між мітками на циліндрі, відстань між якими однакова і дорівнює 5 см . Для запобігання паралаксу при відліках, слід розміщувати око так, щоб відповідні мітки переднього та заднього боків співпадали. Час вимірюється секундоміром. Коли краплина в олії наближається до першої відмітки, вмикають секундомір. Швидкість падіння краплини води слід вимірювати між кожними сусідніми мітками та між першою та останньою. У межах похибок ці швидкості мають бути однаковими. Швидкість падіння краплини визначають для кількох краплин, але не слід змінювати положення крану, щоб зберегти радіус падаючої краплі. Час вимірюється з точністю до $0,05\text{ с}$, а довжина з точністю до $0,0005\text{ м}$.

3. Визначити радіус краплини. Не змінюючи положення крану бюретки, відвести її від циліндра чи підняти вгору і нарахувати 50 крапель у раніше зважену суху склянку і знову зважити її. Маса краплин буде

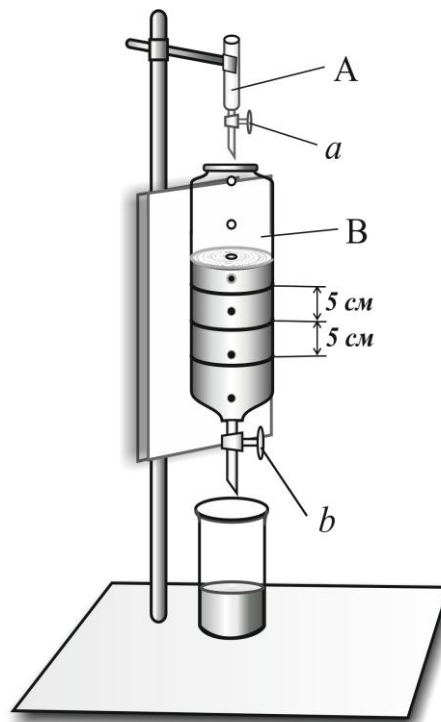


Рис. 11.2

$m = m_2 - m_1$, де m_1 – маса склянки, m_2 – маса склянки з краплинами. Маса однієї краплі дорівнює $m_0 = \frac{m}{50}$. Маса однієї краплі залежно від її об'єму і густини обчислюється за формулою:

$$m_0 = \frac{4}{3} \pi r^3 d,$$

Маса вимірюється з точністю до 0,05 г. З рівняння знаходимо радіус краплі:

$$r = \sqrt[3]{\frac{3 m_0}{4 \pi d}}.$$

4. Дослід повторити тричі, а результати вимірювань та обчислень записати у звітну таблицю:

$\tau, ^\circ\text{C}$	$d, \text{кг/м}^3$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$l, \text{м}$	$\Delta l, \text{м}$	$t, \text{с}$	$\Delta t, \text{с}$	$v, \text{м/с}$	$m_1, \text{кг}$	$m_2, \text{кг}$	$m_0, \text{кг}$	$r, \text{м}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\eta_{\text{ср}}, \text{Па}\cdot\text{с}$	$E, \%$

5. Значення густини (d, ρ) води і масла та прискорення g взяти з таблиць.

6. Після заповнення звітної таблиці і знаходження середнього значення коефіцієнта динамічної в'язкості η даної рідини за формулою (11.5) знайти спочатку середню відносну похибку $E = \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{2\Delta m_0}{3m_0}$, потім середню абсолютну похибку ($\Delta\eta_{\text{ср}} = E \eta_{\text{ср}}$) і записати остаточний результат

$$\eta = \eta_{\text{ср}} \pm \Delta\eta_{\text{ср}}; E = \dots\%$$

Контрольні запитання

1. Що зумовлює в'язкість рідин? Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості? В яких одиницях він вимірюється?
2. Записати формулу Стокса. Що означають символи?
3. Вивести робочу формулу для визначення коефіцієнта в'язкості.
4. Що розуміють під градієнтом швидкості?

Лабораторна робота №12

Визначення коефіцієнта в'язкості методом Пуазейля

Мета роботи: виміряти коефіцієнт в'язкості води методом Пуазейля.

Прилади і матеріали: напірна посудина, капіляр, хімічна склянка, секундомір, лінійка, кристалізатор, вода.

Короткі теоретичні відомості.

Пуазейлем виведена формула для розрахунку об'єму рідини, що витікає через капіляр радіуса r , довжиною l за час t :

$$V = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{\pi r^4 t \Delta p}{8l}, \quad (12.1)$$

де Δp – різниця тисків на кінцях капіляра, V – об'єм рідини, яка витікає за час t с; η – коефіцієнт в'язкості.

Оскільки площа поперечного перерізу капіляра $S = \pi r^2$, а $S^2 = \pi^2 r^4$, тоді

$$V = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{S^2 t \Delta p}{8\pi l};$$
$$\eta = \frac{\pi r^4 t \Delta p}{8lV}. \quad (12.2)$$

З формули (12.1) видно, що об'єм рідини, що витікає, обернено пропорційний в'язкості цієї рідини, довжині капіляра і прямо пропорційний квадрату площі поперечного перерізу капіляра, часу витікання і різниці тисків на кінцях капіляра.

Опис лабораторної установки.

Напірна посудина з краном внизу сполучена з капіляром сталого радіуса (для даної установки радіус капіляра $r = 0,75$ мм). Посудина і капіляр наповнені досліджуваною рідиною (водою чи водним розчином певної концентрації). Кран закритий. Нижній кінець капіляра має торкатися поверхні рідини, яка повністю заповнює об'єм посудини, щоб уникнути впливу поверхневого натягу та гідростатичного тиску біля кінця

капіляра на швидкість витікання рідини. Посудина, куди опущений нижній кінець капіляра, являє собою хімічну склянку. Рідина з хімічної склянки витікає у кристалізатор. Час витікання рідини визначають за допомогою секундоміра, а об'єм – за поділками на напірній посудині.

Довжина капіляра визначається лінійкою від крана до поверхні рідини у нижній посудині (хімічній склянці). Тиск дорівнює середньому гідростатичному тиску рухомого стовпчика рідини від, тобто

$$\Delta p = \rho g H,$$

де ρ – густина рідини, взята з таблиць чи визначена; g – прискорення вільного падіння; $H = \frac{1}{2}(h_1 + h_2)$.

Отже, для даної установки середня різниця тисків

$$\Delta p = \rho g \frac{h_1 + h_2}{2}, \quad (12.3)$$

де h_1 – віддаль між рівнями рідини верхньої напірної посудини (нижній кінець капіляра) до витікання рідини; h_2 – віддаль між тим самими рівнями рідини цих посудин після витікання певної кількості рідини.

Хід роботи

1. Наливаємо $\frac{2}{3}$ верхньої напірної посудини водою.
2. Наливаємо в хімічну склянку доверху води, ставимо її в кристалізатор і розмішуємо так, щоб нижній кінець капілярної трубки продавливав поверхню води у склянці.
3. Закриваємо кран і даємо рідині трохи стекти, щоб встановити рівень води у нижній посудині.
4. Вимірюємо висоту стовпчика рідини h_1 від рівня її у напірній посудині до нижнього кінця капіляра.
5. Відкриваємо кран і одночасно запускаємо секундомір.
6. Через кілька секунд закриваємо кран і зупиняємо секундомір.
7. Вимірюємо висоту h_2 від рівня рідини у капілярній посудині, який вже знизився, до нижнього кінця капіляра.

8. Всі виміри виконати тричі і занести результати до таблиці.

$h_1, \text{ м}$	$h_2, \text{ м}$	$l, \text{ м}$	$V, \text{ м}^3$	$t, \text{ с}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$p, \text{ Па}$	$\eta, \text{ Па}\cdot\text{с}$	$E, \%$

9. Визначивши середнє значення $\eta_{\text{ср}}$, знаходимо середню абсолютну похибку $\Delta\eta_{\text{ср}}$, і відносну похибку з розрахункової формули (12.2) з урахуванням (12.3). Спочатку з (12.3) знаходимо $\Delta(\Delta p)$ та $E_p, \%$, $E_p = \frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p}$, враховуючи, що $\Delta h_1 = \Delta h_2 = 0,0005 \text{ м}$ і приймаючи ρ та g за сталі:

$$\Delta(\Delta p) = \rho g \Delta h; \quad (12.4)$$

$$E_p = \frac{2\Delta h}{h_1 + h_2}. \quad (12.5)$$

Потім із (12.2) з урахуванням (12.5) маємо

$$E = \frac{\Delta\eta_{\text{ср}}}{\eta_{\text{ср}}} = \left(\frac{4\Delta r}{r} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta V}{V} + \frac{2\Delta h}{h_1 + h_2} \right).$$

Знаходимо

$$\Delta\eta_{\text{ср}} = E\eta_{\text{ср}}.$$

Записуємо остаточний результат в'язкості:

$$\eta = \eta_{\text{ср}} \pm \Delta\eta_{\text{ср}}; \quad E = \dots\%.$$

Контрольні запитання

1. Вивести робочу формулу для визначення коефіцієнта в'язкості, пояснити її.
2. Пояснити причину сил внутрішнього тертя.
3. Що розуміють під градієнтом швидкості.
4. Вивести формулу Пуазейля.
5. Вивести формулу для обчислення відносної похибки вимірюваного коефіцієнта в'язкості.

Лабораторна робота №13

Визначення температурної залежності коефіцієнта в'язкості віскозиметром Оствальда-Пінкевича

Мета роботи: ознайомитися з будовою віскозиметра Оствальда-Пінкевича; дослідити залежність коефіцієнта кінематичної в'язкості від температури.

Прилади і матеріали: віскозиметр Оствальда-Пінкевича, секундомір, термометр.

Короткі теоретичні відомості

Віскозиметр Оствальда-Пінкевича (рис. 13.1) являє собою U-подібну скляну трубку. Одне коліно трубки має ряд розширень 1 та 2, а також капіляр 3. Друге коліно являє собою широку трубку з резервуаром 4. Зверху і знизу розширення 2 нанесені мітки *a* і *b*. Об'єм цього розширення між мітками позначимо *V*. Якщо ліве коліно віскозиметра наповнити досліджуваною рідиною і виміряти час τ витікання її з об'єму *V* через капіляр 3, то можна визначити коефіцієнт динамічної в'язкості η . Об'єм *V* пов'язаний з коефіцієнтом в'язкості формулою Пуазейля для ламінарного потоку:

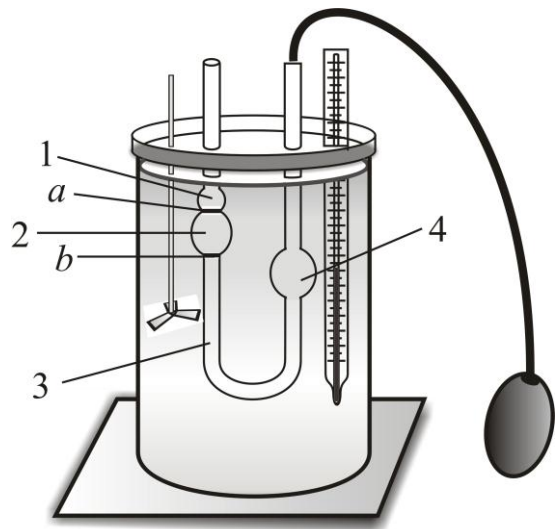


Рис. 13.1

$$V = \frac{\pi \Delta p r^4 \tau}{8 \eta l}, \quad (13.1)$$

де *V* – об'єм рідини, що протікає через капіляр за час τ ; Δp – різниця тисків на кінцях капіляра; *r* – радіус капіляра; *l* – довжина капіляра.

Формула (13.1) справедлива лише для ламінарного потоку. Якщо віскозиметр наповнений водою, коефіцієнт в'язкості якої η_0 , рідина в об'ємі *V* витече за інший час τ_0 . Тоді

$$V = \frac{\pi \Delta p_0 r^4 \tau_0}{8 \eta_0 l}. \quad (13.2)$$

З цих двох співвідношень (13.1) та (13.2) отримуємо:

$$\eta = \eta_0 \frac{\Delta p \tau}{\Delta p_0 \tau_0}. \quad (13.3)$$

Якщо рідина витікає під дією сили тяжіння, тоді $\frac{\Delta p}{\Delta p_0} = \frac{\rho}{\rho_0}$ (ρ – густина рідини). Підставляючи значення $\frac{\Delta p}{\Delta p_0}$ в (13.3), одержимо

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho \tau}{\rho_0 \tau_0} \quad \text{або} \quad \frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta_0}{\rho_0} \cdot \frac{\tau}{\tau_0},$$

або інакше

$$v = v_0 \frac{\tau}{\tau_0}, \quad (13.4)$$

де $v = \frac{\eta}{\rho}$, $v_0 = \frac{\eta_0}{\rho_0}$ – кінематична в'язкість.

Таким чином, за допомогою капілярного віскозиметра безпосередньо вимірюється кінематична в'язкість (відношення в'язкості рідини до її густини).

Опис лабораторної установки

Термостатом в даній установці служить скляна банка, наповнена водою. Вода перемішується механічною мішалкою. Температура води в термостаті вимірюється термометром (рис. 13.1).

Завдання: Визначення кінематичної в'язкості гліцерину.

Кінематична в'язкість гліцерину визначається за формулою (13.4), де v_0 – кінематична в'язкість води; $v_0 = \frac{\eta_0}{\rho_0}$. Значення η_0, ρ_0, τ_0 , беремо з таблиці, наведеної в кінці опису. Тому для визначення v треба виміряти лише час τ витікання гліцерину за різних температур. Час витікання води τ_0 за різних температур також є у таблиці.

Хід роботи

1. Увімкнути термостат в електромережу і встановити температуру води в ньому 20°C .

2. Через широке коліно віскозиметр наповнити гліцерином. На патрубок цього коліна надівають трубку від гумової груші і, затиснувши пальцем широку трубку, з допомогою гумової груші заповнюють гліцерином розширення 1 та 2.

3. Секундомір вмикають, коли рідина опуститься до мітки a і вимикають його, коли вона пройде мітку b .

4. Нагріваючи термостат до 80°C , через кожні 5°C , визначають час.

5. Знаходять кінематичну в'язкість досліджуваної речовини за формулою (13.4) і будують графік залежності $\nu_0 = f(t)$.

Таблиця 13.1

Залежність в'язкості та густини води від температури та час витікання води через капіляр віскозиметра за таких температур

$t, ^{\circ}\text{C}$	$\eta_0, \frac{\text{г}}{\text{см} \cdot \text{с}}$	$\rho_0, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$	$\tau_0, \text{с}$	$\nu_0, \text{см}^2/\text{с}$	$\tau, \text{с}$	$\nu, \text{см}^2/\text{с}$
20	0,0100	0,9982	1,13			
25	0,0089	0,9971	1,07			
30	0,0080	0,9957	1,05			
35	0,0072	0,9941	1,02			
40	0,0066	0,9922	0,98			
45	0,0061	0,9902	0,95			
50	0,0055	0,9881	0,92			
55	0,0051	0,9857	0,89			
60	0,0047	0,9832	0,87			
65	0,0044	0,9806	0,84			
70	0,0041	0,9778	0,8			
75	0,0039	0,9749	0,77			
80	0,0036	0,9718	0,75			

Контрольні запитання

1. Яке фізичне явище належить основі визначення коефіцієнта динамічної в'язкості, яким методом і яким законом воно описується?

2. Що називається кінематичною в'язкістю? В яких одиницях вимірюється її розмірність?
3. Як змінюється і пояснюється залежність в'язкості від температури?
4. Вивести формулу Пуазейля.
5. Що таке ламінарний потік?

Лабораторна робота №14

Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву кільця

Мета роботи: визначити коефіцієнт поверхневого натягу води методом відриву кільця.

Прилади і матеріали: терези, різноваги, штангенциркуль, мікрометр, кільце, дві хімічні склянки, піпетка, напірна посудина з водою на штативі, скляна відливна посудина під кільце.

Короткі теоретичні відомості

Вільна поверхня кожної рідини перебуває в особливому напруженому стані та до деякої міри нагадує собою тонку розтягнуту каучукову плівку, яка намагається скоротитися. Крім того, поверхня рідини з великою силою тисне на рідину, що розташована під нею. Якщо уявно розрізати поверхню рідини деякою довільною лінією довжиною l , тоді сила взаємного зчеплення між обома частинками поверхні, що виникає внаслідок взаємного притягання молекул, які розташовані з обох боків від лінії, буде тим більша чим більша довжина лінії. Таким чином, сила поверхневого натягу буде прямо пропорційна довжині $F = \sigma \cdot l$, де:

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

Коефіцієнт σ називається *коефіцієнтом поверхневого натягу* і чисельно дорівнює силі поверхневого натягу прикладеній до одиниці довжини контуру, який обмежує рідину. Ця сила завжди дотична до поверхні

рідини у даній точці та напрямлена перпендикулярно до контуру, що обмежує плівку.

Коефіцієнт поверхневого натягу можна визначити, вимірявши силу, яку необхідно прикласти перпендикулярно до поверхні рідини для відриву твердих тіл від неї. Якщо тіло змочується рідиною, то при його відриві вільна поверхня рідини буде збільшуватись і виникне сила поверхневого натягу. Тіло відірветься від поверхні рідини, якщо до нього прикласти силу, що дорівнює за величиною силі поверхневого натягу. Якщо тіло матиме форму кільця із зовнішнім діаметром D і товщиною d , то при його відриві від рідини довжина лінії відриву буде складатися із зовнішньої та внутрішньої довжини кільця, тобто

$$l = \pi D + \pi(D - 2d) = 2\pi(D - d).$$

У момент відриву сила поверхневого натягу $F = 2\sigma\pi(D - d)$, звідки

$$\sigma = \frac{F}{2\pi(D - d)}.$$

Діаметр кільця D та його товщина вимірюється штангенциркулем або мікрометром. Тому для визначення коефіцієнта поверхневого натягу необхідно визначити силу F відриву кільця від поверхні води.

Хід роботи

1. Для визначення сили F скористаємося установкою зображеною на рис. 14.1. До однієї шальки терезів прикріплене металеве кільце. Поставивши на протилежну шальку терезів суху хімічну склянку, зрівноважують терези за допомогою різноважків. Відкривають кран А напірної посудини C_2 і підводять воду у відливну посудині C_1 до рівня дотику з кільцем. Обережно

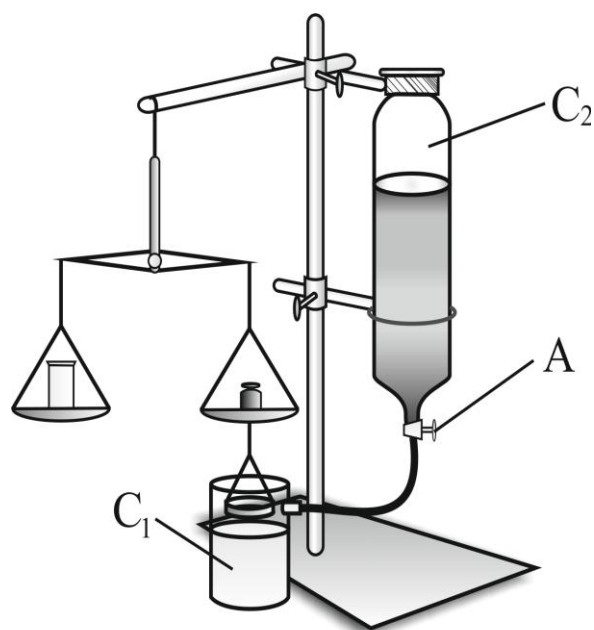


Рис. 14.1

піпеткою наливають у пусту хімічну склянку воду доти, доки кільце не відірветься. Відвівши посудину C_1 в бік, зрівноважують терези за допомогою різноважків. Вага різноважків дає можливість відшукати силу F , ($F = mg$), де m – маса краплин в склянці.

2. Виконати три вимірювання. Результат занести до таблиці.

№ з/п	D , м	d , м	m , кг	g , м/с ²	F , Н	σ , Н/м	E , %

3. Визначити абсолютну та відносну похибки. При визначенні відносної похибки можна скористатися формулою

$$E = \left(\frac{\Delta F}{F} + \frac{2\Delta d}{D-d} \right) \cdot 100\%,$$

де $\Delta F = g\Delta m$; $\Delta m = 5 \cdot 10^{-6}$ ґ; ΔF – визначається як половина ціни поділки приладу для вимірювання сили (важків); $\Delta D = \Delta d$ і дорівнює половині поділки приладу, яким вимірюється D і d .

Контрольні запитання

1. У чому полягає особливість будови поверхневого шару рідини?
2. Що називають силою поверхневого натягу? Від чого вона залежить?
3. Визначити довжину границі, за якою розривається поверхневий шар рідини при відриві кільця.
4. Сформулювати два загально прийнятих визначення коефіцієнта поверхневого натягу. Яка його розмірність?
5. Від чого і як залежить коефіцієнт поверхневого натягу?

Лабораторна робота №15

Вимірювання вологості повітря

Мета роботи: експериментально визначити точку роси, абсолютну та відносну вологості повітря.

Прилади і матеріали: гігрометр Ламбрехта, термометр, гумова груша, етиловий спирт або ефір, психрометр Августа, аспіраційний психрометр, піпетка, вода.

Короткі теоретичні відомості.

У результаті кругообігу в природі у повітрі завжди в тій чи іншій мірі присутні водяні пари. Вони відіграють надзвичайно важливу роль у житті людей, тварин і рослин. Для характеристики наявності в повітрі водяних парів вводиться поняття абсолютної і відносної вологості. Абсолютну вологість визначають двома способами: через масу водяної пари в одиниці об'єму повітря, або через парціальний тиск водяних парів у повітрі.

Під *абсолютною вологістю* розуміють фізичну величину, яка чисельно дорівнює кількості грамів водяної пари в 1 м^3 повітря за даною температури. Під *абсолютною вологістю* розуміють також фізичну величину, яка чисельно дорівнює парціальному тиску водяних парів у повітрі за даної температури.

Під *відотною вологістю* розуміють фізичну величину, яка чисельно дорівнює відношенню числа грамів водяної пари в 1 м^3 за даної температури до числа грамів насиченої пари в 1 м^3 за такої самої температури:

$$\varphi = \frac{m}{m_{\text{н}}} \cdot 100\% . \quad (15.1)$$

Аналогічно під відотною вологістю розуміють фізичну величину, яка чисельно дорівнює відношенню парціального тиску водяних парів за такої самої температури:

$$\varphi = \frac{P}{P_{\text{н}}} \cdot 100\% . \quad (15.2)$$

Вологість повітря можна визначити декількома методами.

Опис лабораторної установки

Метод точки роси. Вологість повітря методом точки роси визначають гігрометром Ламбрехта (рис. 15.1). Він складається з тонкого металевого полірованого диска 1, на зворотному боці якого розташований резервуар 5. У резервуар наливають ефір і вставляють термометр 3 через отвір 4. Через другий отвір за допомогою гумової трубки з грушею продувають повітря. Ефір швидко випаровується і диск при цьому охолоджується. Одночасно охолоджується і повітря, що прилягає до диска, а на поверхні диска виступає роса внаслідок конденсації водяної пари з повітря (поверхня диска стає ніби матовою, що добре помітно на фоні блискучої поверхні кільця 2). Фіксують температуру t_{p1} , що відповідає моменту потемніння поверхні диска 1. Припинивши продування повітря, визначають температуру t_{p2} зникнення роси. Для обчислення вологості повітря беруть за точку роси t_p середнє арифметичне величин t_{p1} і t_{p2} :

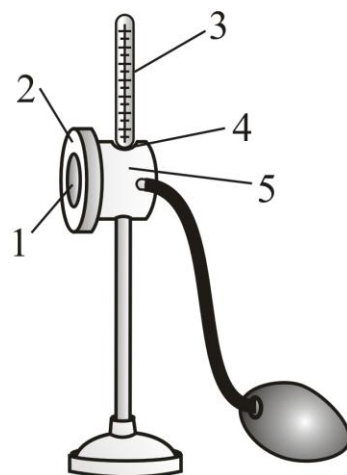


Рис. 15.1

$$t_p = \frac{t_{p1} + t_{p2}}{2}. \quad (15.3)$$

За таблицями визначають густину насиченої водяної пари m за температури t_p , тобто абсолютну вологість. Знаючи кімнатну температуру t_k , за таблицями знаходять густину насиченої пари m_H за цієї температури. Відношення цих двох величин і дає значення відносної вологості повітря згідно (15.1).

Метод психрометра. Якщо взяти два однакових термометри, кулька одного з яких безперервно змочується водою через батист, занурений у склянку з водою, то покази обох («сухого» і «вологого») термометрів відрізняться. Внаслідок випаровування води з батисту «вологий»

термометр показуватиме нижчу температуру, ніж «сухий». Чим менша вологість навколишнього повітря, тим інтенсивніше випаровування і тим менші покази «вологого» термометра. Значення показів «сухого» t_c і «вологого» t_b термометрів дають можливість визначити відносну вологість повітря φ ; ($\Delta t = t_b - t_c$, таблиця розміщена на психрометрі).

Покази «вологого» термометра у психрометрі дещо різняться (в бік завищення) від справжньої температури «вологого» термометра. Пояснюється це тим, що кульці «вологого» термометра передається певна кількість теплоти випромінювання навколишніх тіл і деяка кількість її надходить через виступаючий стовпчик ртуті термометра, що має температуру навколишнього повітря. Щоб зменшити цей вплив, треба захистити кульку екранами, обгорнути батистом виступаючий стовпчик ртуті, підвищити швидкість руху повітря і цим збільшити швидкість випаровування.

Як показують спеціальні дослідження, за швидкості повітря $1,5 - 2 \frac{m}{c}$ та температури «вологого» термометра $t_b \geq 20^\circ C$ похибка становить близько 1% психрометричної різниці, і нею можна знехтувати.

Психрометричну формулу можна вивести з рівняння теплового балансу для кульки «вологого» термометра: кількість теплоти Q_1 , переданої від повітря в стандартному стані (температура «вологого» термометра вже встановилася) і при відсутності тепловитрат, дорівнює кількості теплоти Q_2 , потрібної для випаровування води з поверхні батисту S , тобто

$$\alpha(t_c - t_a)S = q_m \lambda S, \quad (15.4)$$

де α – коефіцієнт теплообміну; q_m – швидкість випаровування $\left(\frac{dm}{d\tau}\right)$ з одиниці поверхні; λ – питома теплота випаровування.

Рівняння (15.4) віднесено до одиниці часу. З (15.4) маємо:

$$t_b = t_c - \frac{q_m \lambda}{\alpha}. \quad (15.5)$$

Швидкість випаровування можна визначити, виходячи із закону Дальтона, як для випаровування води з вільної поверхні:

$$q_m = \alpha_m \Delta p \frac{760}{H}, \quad (15.6)$$

де α_m – коефіцієнт випаровування; Δp – різниця парціальних тисків водяної пари біля поверхні води і в навколишньому середовищі; H – барометричний тиск.

Для даного випадку $\Delta p = p_v - p_{\Pi}$, p_v – тиск насиченої пари при температурі t_v , p_{Π} – тиск пари у навколишньому середовищі (повітрі).

Із (15.4) та (15.6) маємо рівняння психрометра:

$$p_{\Pi} = p_v - A \cdot H(t_c - t_v) \quad (15.7)$$

де $A = \frac{\alpha}{\alpha_m 760 \lambda}$ – психрометричний коефіцієнт.

Відносна вологість:

$$\varphi = \frac{p_{\Pi}}{p_n}, \quad (15.8)$$

де p_n – тиск насиченої пари при температурі повітря, тобто при температурі t_c «сухого» термометра.

Психрометричний коефіцієнт в основному залежить від швидкості руху повітря, яка визначає коефіцієнти теплообміну та випаровування. Експериментальними дослідженнями Зворикіна (1883 р.) встановлено таку формулу для коефіцієнта A :

$$A \cdot 10^6 = 593,1 + \frac{135,1}{\sqrt{v}} + \frac{48}{v}, \quad (15.9)$$

де v – швидкість руху молекул повітря біля психрометра.

Найпростіші типи психрометрів: психрометр Августа та аспіраційний психрометр.

Хід роботи:

1. Визначити точку роси t_p гігрометром. При цьому слід запобігти дихання експериментатора на пластину гігрометра. За таблицею (див. додатки табл. 4) відшукати абсолютну вологість m за температури t_p .

Потім знаючи кімнатну температуру t_k , за таблицею визначити густину насиченої пари (m_H). Тоді за формулою $\varphi = \frac{m}{m_H} \cdot 100\%$ знаходимо відносну вологість повітря.

2. Визначити покази «сухого» та «вологого» термометрів психрометра Августа t_c і t_b . Знаючи різницю температур Δt , за таблицею визначають відносну вологість φ . Знаючи φ та m_H із формули (15.1) знаходимо абсолютну вологість m .

3. Змочити батист «вологого» термометра аспіраційного психрометра, звернувши при цьому увагу на те, щоб вода не попала на «сухий» термометр і внутрішню поверхню трубки. Ключем завести вентилятор (2-3 поворотів ключа) і стежити за показами термометрів. Коли покази термометрів встановляться (через 4-6 хв), записати значення t_c і t_b , а потім визначити m і φ аналогічно до пункту 2. Знімаючи покази термометрів, спочатку відрахувати десяті частини градусів Цельсія і записати їх, а потім – цілі значення.

4. У кожному випадку дослід повторити не менше трьох разів та порівняти результати.

5. Сформулювати висновки відносно методики і результатів вимірювання вологості повітря.

6. Зробити висновки щодо цих трьох методів визначення вологості.

Контрольні запитання

1. Яку пару називають насиченою? Ненасиченою?
2. Що таке точка роси?
3. Як формулюється закон Дальтона для випаровування?
4. Для чого термометри в аспіраційному психрометрі вміщено в нікельовані металеві трубки?
5. Яка розмірність психрометричного коефіцієнта?

Лабораторна робота №16

Вимірювання в'язкості рідини методом Стокса

Мета роботи: вимірювання коефіцієнта внутрішнього тертя методом Стокса.

Прилади і матеріали: трубка з рідиною, підставка з датчиками, сталева кулька, електромагніт, вимірювальний блок L-мікро, блок живлення.

Короткі теоретичні відомості

Теоретичні міркування стосовно цієї роботи повністю співпадають із викладками, наведеними у лабораторній роботі № 11. Отже, коефіцієнт динамічної в'язкості теж розраховується відповідно до формули

$$\eta = \frac{2}{9v}(\rho_k - \rho)gR^2,$$

де v – швидкість руху кульки, ρ_k і R – її густина та радіус, ρ – густина рідини, g – прискорення вільного падіння. Враховуючи, що рух кульки близький до рівномірного: $\eta = \frac{2}{9l}(\rho_k - \rho)gR\Delta t$, де l – відстань, що проходить кулька, Δt – час руху.

Опис лабораторної установки

Для проведення досліджень використовується установка, в якій кулька рухається всередині вертикально встановленої заповненої рідиною трубки. Пуск кульки здійснюється електромагнітом, розміщеним на пробці, якою закрита трубка. Для вимірювання швидкості використовуються оптичні датчики, виготовлені на основі світлодіодів. Світло випромінювача датчика проходить через трубку в поперечному напрямі й у момент проходження кульки перекривається нею, тобто перестає потрапляти на приймач випромінювання. На екрані комп'ютера це відбивається у вигляді зміни – зменшення рівня сигналу, що поступає на датчик.

В установці використовується два оптичні датчики 1 і 2 (рис. 16.1),

встановлених на верхній та нижній платах, що розташовані всередині підставки (всі елементи добре видно через прозору циліндричну стінку підставки). Один з світлодіодів працює як випромінювач світла, а другий в якості приймача випромінювання. Зверніть увагу (після підключення датчиків до вимірювального блоку), що випромінювачі верхнього та нижнього датчиків направлені назустріч один одному. Це дозволяє уникнути випадкового засвічення приймачів світлом від сторонніх джерел світла. Проходячи повз датчик, кулька перекриває промінь, що потрапляє на приймач випромінювання, і це дозволяє виміряти на екрані проміжок часу, протягом якого рухалася кулька від одного датчика до іншого.

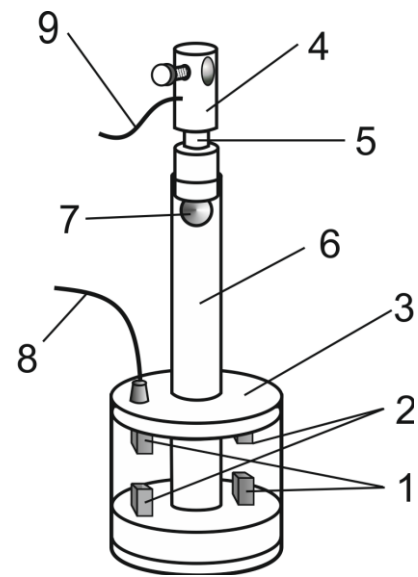


Рис. 16.1

У лабораторній роботі вимірюється час руху кульки між датчиками. Рух кульки рівномірний. На основі отриманих даних розраховується швидкість кульки в рідині. Інші величини сталі та мають значення:

$$\rho = 1,26 \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}; \rho_{\text{к}} = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}; R = 0,005 \text{ м}; l = 0,045 \text{ м}.$$

Хід роботи

1. Зберіть установку для вимірювання в'язкості як показано на рис. 16.2. Вставте трубку з рідиною (6) в отвір корпусу (3). Котушку електромагніту (4) встановіть на металевому стрижні (5), що виходить з пробки, якою закрита трубка (6).

2. Під'єднайте вимірювальний блок L-мікро до роз'ємну послідовного порту комп'ютера і увімкніть його до мережі (220 В, 50 Гц).

3. Відповідно до схеми приведеної на рис. 16.1, дев'ятиштирьковий роз'єм кабелю електромагніту (9) під'єднайте до третього каналу

вимірювального блоку, а на два штекери цього кабелю подайте постійну напругу 7,5 В від блоку живлення.

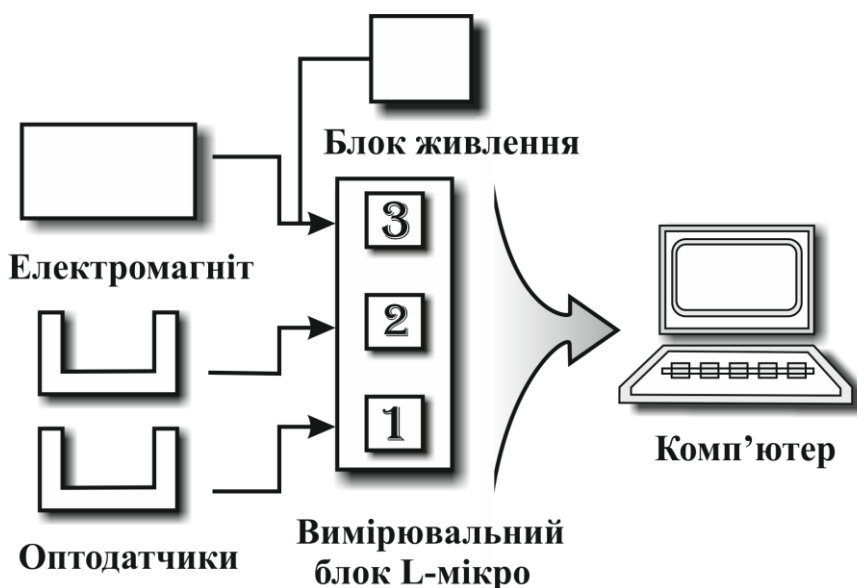


Рис.16.2

4. До першого роз'єму вимірювального блоку під'єднайте кабель оптичних датчиків (8, рис. 16.1). Увімкніть вимірювальний блок L-мікро.

5. Запустіть програму «L-фізика – практикум», виберіть пункт меню «вибір роботи» і в списку, що з'явився на екрані, виберіть лабораторну роботу «Вимірювання в'язкості рідини методом Стокса».

6. Натисніть на екрані кнопку «проведення вимірювань», при цьому буде подана напруга живлення на електромагніт.

7. Підніміть трубку з рідиною і, притримуючи електромагніт пускового пристрою, обережно переверніть її для того, щоб кулька опустилася вниз і притяглася до електромагніту. Вставте трубку назад у підставку.

8. Проведіть пуск, натиснувши кнопку «пуск» на екрані комп'ютера (при цьому живлення електромагніту буде вимкнено, і кулька почне рух в рідині).

9. Користуючись курсором, визначте час руху кульки між датчиками. Для цього підведіть мишкою покажчик до місця, яке приблизно відповідає середині переднього фронту зміни сигналу від першого датчика і натисніть ліву клавішу (рис. 16.3). На екрані виникне

вертикальна жовта лінія, що проходить через вибрану вами точку, а в правому нижньому кутку екрану буде показано час t_1 (в тисячних секунди), що відповідає цій точці. Запишіть це значення часу в таблицю. Аналогічним чином визначте і внесіть до таблиці час, що відповідає середині переднього фронту зміни сигналу на другому датчику t_2 .

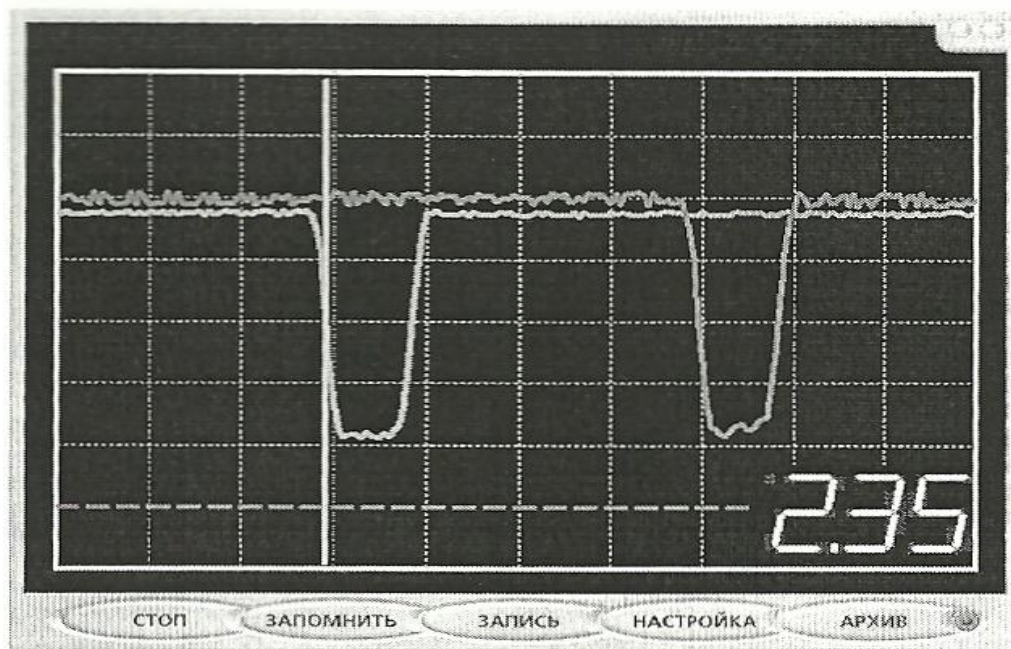


Рис.16.3

10. Проведіть дослід 5 разів. Живлення електромагніту включається автоматично після завершення чергового запису даних.

11. Обчисліть усереднене значення часу руху кульки між оптичними датчиками t_{cp} і внесіть його до таблиці.

12. Розрахуйте середню швидкість кульки і визначте в'язкість рідини на підставі розрахункової формули і приведених параметрів установки. Знайдіть похибки визначенні в'язкості.

13. Розрахуйте середньоквадратичне відхилення часу руху кульки між датчиками за формулою:

$$\Delta t_{cp} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_{cp})^2}{n}},$$

де t_i – час проходження кульки між датчиками в i -му експерименті, n – загальна їх кількість.

14. Відшукайте похибку з визначення в'язкості та занесіть отримане значення в таблицю:

$$\Delta\eta = \frac{2R^2 g(\rho_k - \rho)}{9l} \Delta t$$

15. Заповніть таблицю з виконаних вимірювань та розрахунків:

№ з/п	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t = t_2 - t_1, \text{с}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$\Delta t_{\text{ср}}, \text{с}$	$v_{\text{ср}}, \frac{\text{м}}{\text{с}}$	$\eta, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$\Delta\eta, \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}$	$E, \%$

16. Сформулюйте висновки до роботи.

Вказівки з техніки безпеки

1. Вмикати в мережу вимірювальний блок L-мікро можна лише після перевірки його підключення до роз'єму послідовного порту комп'ютера.

2. Обережно користуватися скляною трубкою. Перевертати її необхідно на мінімальній висоті над столом.

Контрольні запитання

1. Що зумовлює в'язкість рідин?
2. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості? В яких одиницях він вимірюється?
3. Записати формулу Стокса.
4. Записати робочу формулу для визначення коефіцієнта в'язкості, пояснити її.
5. Що розуміють під градієнтом швидкості?

Лабораторна робота № 17

Вимірювання теплопровідності повітря.

Мета роботи: вимірювання коефіцієнта теплопровідності повітря.

Прилади і матеріали: штатив; прилад для вимірювання теплопровідності повітря; вимірювальний блок L-мікро; блок живлення; сталева пластина; резистор 20 Ом.

Короткі теоретичні відомості

Явище теплопровідності полягає у виникненні напрямленого перенесення внутрішньої енергії в газоподібних, рідких та твердих тілах, за наявності в них просторових неоднорідностей температури. В стаціонарному одновимірному випадку явище теплопровідності описується рівнянням Фур'є, яке має вигляд:

$$q_e = -k \frac{dT}{dx} \quad (17.1)$$

де q_e – *питомий тепловий потік* – фізична величина, що дорівнює кількості теплоти, яка переноситься через площу ΔS , перпендикулярну до напрямку руху тепла за час Δt :

$$q_e = \frac{\Delta Q}{\Delta S \cdot \Delta t},$$

k – коефіцієнт теплопровідності, $\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури – зміна температури вздовж напрямку теплового потоку.

У пропонуваній лабораторній роботі відшукання коефіцієнту теплопровідності повітря уможлиблюється за рахунок методу нагрівання нитки. Вимірювання

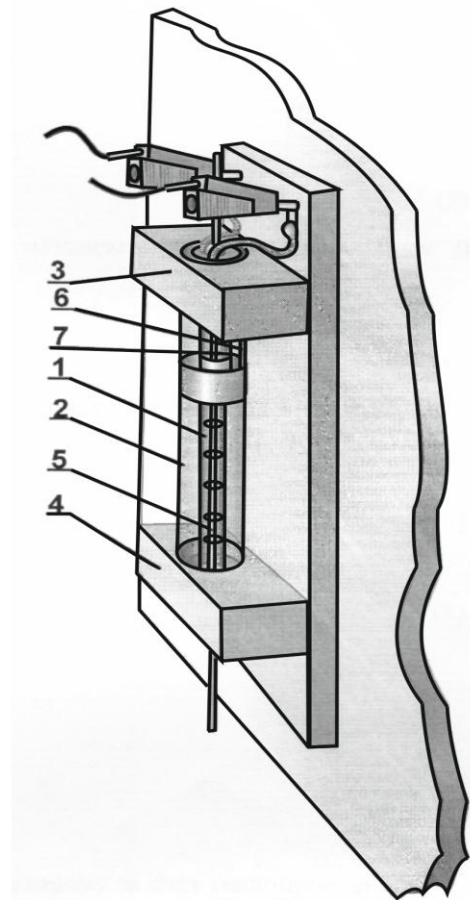


Рис. 17.1

проводяться за допомогою спеціального приладу, схема якого показана на рис. 17.1. Прилад являє собою два коаксіальних скляні циліндри (1) та (2), які закриті з торців теплоізолюючими та електроізолюючими пробками (3) та (4). Через ці пробки у внутрішньому циліндрі протягнута дротяна нитка (5), яка нагрівається електричним струмом та виділяє джоулеві тепло. Внаслідок передачі тепла у зовнішній простір температури циліндрів T_1 та T_2 – різні. При цьому мова йде про зовнішню поверхню внутрішнього та внутрішню поверхню зовнішнього циліндра. Щоб запобігти передачу тепла за рахунок конвекції циліндри розташовують вертикально, для цього призначені корки (3) та (4). Вимірювання різниці температур виконується за допомогою диференціальної термопари хромель-копель (7).

Для отримання розрахункової формули використовуємо рівняння Фур'є (17.1) і врахуємо, що перенесення тепла відбувається не від площини до площини вздовж однієї з просторових декартових координати, а від однієї циліндричної поверхні до іншої, тобто вздовж радіуса циліндрів

$$q_e = -k \frac{dT}{dr} \quad (17.3)$$

У приладі, який використовується в даній лабораторній роботі, перенесення тепла за рахунок теплопровідності здійснюється між двома коаксіальними циліндрами радіусами r_1 і r_2 й висотою h . Температури циліндрів у встановленому температурному діапазоні позначимо як T_1 і T_2 . Перенесення тепла від внутрішнього циліндра до зовнішнього може відбуватися за рахунок трьох процесів – теплопровідності, конвекції та випромінювання. Рівняння Фур'є описує лише процес теплопровідності. Конвекція виключена за рахунок вертикального розташування циліндрів та наявності теплоізолюючих корків на їх торцях. Теплообміном за рахунок випромінювання можна знехтувати оскільки температура внутрішнього циліндра не перевищує 100°C і є заниженою для врахування такого процесу.

Кількість теплоти Q , що виділяється з циліндра r_1 за одиницю часу та потрапляє на циліндр r_2 , повністю перетинатиме довільну циліндричну поверхню радіуса r . Тобто, повний тепловий потік не залежатиме від радіуса циліндричної поверхні. Його можна визначити як добуток питомого теплового потоку при даному значенні радіуса r на площу поверхні відповідного радіуса $S = 2\pi rh$,

$$Q_T = q_e 2\pi rh \quad (17.4)$$

Помножимо праву та ліву частини рівняння (17.3) на $2\pi rh$:

$$2\pi rh \cdot q_e = -2\pi rh \cdot k \frac{dT}{dr}$$

або

$$Q_T = -2\pi rh \cdot k \frac{dT}{dr} \quad (17.5)$$

Це диференціальне рівняння можна розв'язати методом відокремлення змінних. Для цього помножимо праву та ліву частини (17.5) на $\frac{dr}{r}$:

$$Q_T \frac{dr}{r} = -2\pi h \cdot k \cdot dT \quad (17.6)$$

В лівій частині (17.6) – змінна r , а в правій – змінна T , тому можна проінтегрувати ліву та праву частини незалежно одну від одної. Межі інтегрування лівої частини – r_1 та r_2 , а правої – T_1 і T_2 :

$$Q_T \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = -2\pi h \cdot k \cdot \int_{T_1}^{T_2} dT \quad (17.7)$$

Візьмемо інтеграли у виразі (17.7) та отримаємо:

$$Q_T (\ln r_2 - \ln r_1) = -2\pi h \cdot k \cdot (T_2 - T_1) \quad (17.8)$$

Враховуючи, що

$$\ln r_2 - \ln r_1 = \ln \frac{r_2}{r_1},$$

отримуємо:

$$Q_T = 2\pi h \cdot k \cdot (T_2 - T_1) \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (17.9)$$

Це і є шуканий тепловий потік від першого циліндра до другого за рахунок теплопровідності.

Він повинен бути рівний тепловій потужності, яка виділяється у внутрішньому циліндрі за рахунок нагрівання дротяної нитки електричним струмом

$$Q = Q_T \quad (17.10)$$

або, підставляючи значення величин, які входять у (17.10), маємо:

$$IU = 2\pi h \cdot k \cdot (T_2 - T_1) \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (17.11)$$

Це рівняння повного балансу енергії. Із нього відшукаємо коефіцієнт теплопровідності повітря:

$$k = \frac{IU}{2\pi h (T_2 - T_1) \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (17.12)$$

Для вимірювання різниці температур ΔT у пропонованій лабораторній роботі використовується диференціальна термопара, яка вимірює цю різницю як $\Delta T = T_1 - T_2$, тому розрахункову формулу краще подати у вигляді:

$$k = \frac{I \cdot U \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi h \Delta T} \quad (17.13)$$

Значення I та U так само як і ΔT вимірюються комп'ютерною вимірювальною системою, а величини r_1 та r_2 наведені у таблиці.

Опис складання лабораторної установки

1. Зберіть експериментальну установку за структурною схемою (рис. 17.2), загальний вигляд якої зображений на рис. 17.3.

2. Розташуйте прилад для вимірювання коефіцієнта теплопровідності повітря на сталевій пластині, закріпленій в штативі, так, щоб скляні циліндри розміщувалися вертикально (рис. 17.3).

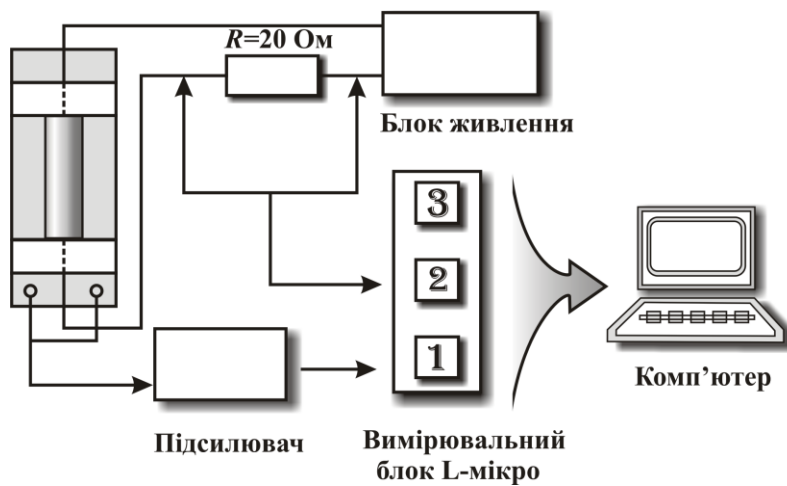


Рис. 17.2

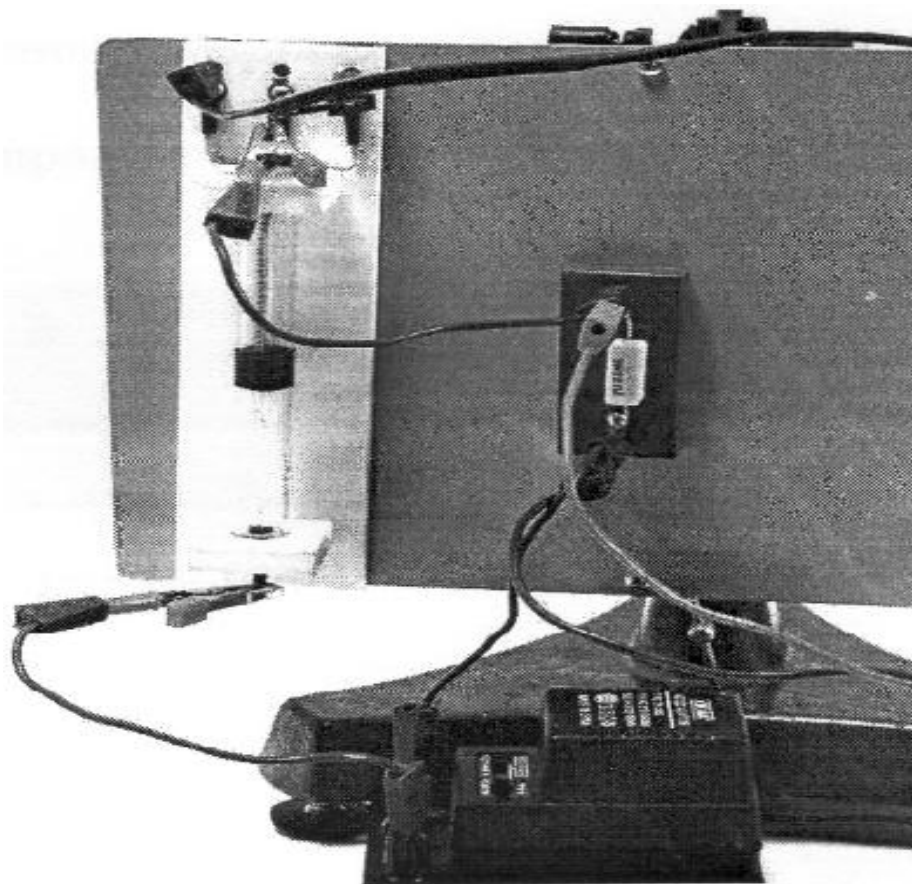


Рис. 17.3

3. Під'єднайте вимірювальний блок L-мікро до відповідного роз'єму послідовного порту комп'ютера та мережі (220 В, 50 Гц).

4. Входи вимірювального блоку приєднайте до відповідних входів: перший вхід – до підсилювача «У» з підсилювачем (з'єднайте через кабель на якому є мітка – літера «У»); другий вхід – до входів термодатчиків (крайні клеми). *Примітка:* термодатчики вмикаються назустріч

один одному, а вимірюване значення температури відповідає різниці температур стінок циліндрів. Якщо під час вимірювання отримуєте від'ємне значення ΔT , то слід поміняти місцями одноштирькові роз'єми, під'єднані до установки.

5. Складіть коло нагрівника (рис.17.2), увімкнувши його до блоку живлення через резистор опором 20 Ом. Блок живлення слід перемкнути на напругу 12 В. Для з'єднання провідників до виходів нагрівника потрібно використати затискач «крокодил».

6. Приєднайте до другого роз'єму вимірювального блоку кабель для вимірювання напруг на елементах схеми. Одноштирькові роз'єми кабелю приєднуються до клем резистора R .

Хід роботи

1. Завантажте програму L-фізика практикум, оберіть пункт меню «Выбор работы» та у списку, який з'явився на екрані, оберіть лабораторну роботу «Измерение теплопроводности воздуха».

2. Натисніть кнопку «проведение измерений» для виконання вимірювань.

3. Натисніть кнопку «пуск» для початку реєстрації даних.

4. Увімкніть блок живлення до мережі та спостерігайте за підвищенням різниці температур поверхонь циліндрів на екрані комп'ютера. Значення різниці температур можна побачити у верхньому правому кутку екрана. Як тільки значення ΔT перестане змінюватися (досягнення стаціонарного режиму теплопередачі), Ви можете занести значення різниці температур до таблиці.

5. Занесіть до таблиці значення напруги, яке вимірюється на резисторі R .

6. Від'єднайте одноштирькові роз'єми вимірювального кабелю від виходів резистора R та приєднайте їх до нагрівального елемента. Виміряйте напругу на нагрівнику. Запишіть в таблицю отримане значення.

7. Розрахуйте силу струму в колі нагрівника згідно закону Ома для ділянки кола $I = \frac{U_R}{R}$.

8. Розрахуйте значення коефіцієнта теплопровідності повітря, використовуючи параметри установки та отримані дані.

$r_1, \text{ м}$	$r_2, \text{ м}$	$h, \text{ м}$	$R, \text{ Ом}$	$\Delta T, ^\circ\text{C}$	$U_R, \text{ В}$	$U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$k, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$
0.002	0.006							

Позначення, прийняті у таблиці:

r_1 – радіус внутрішнього циліндра;

r_2 – радіус зовнішнього циліндра;

h – довжина циліндрів;

R – опір резистора, увімкненого в коло нагрівника для вимірювання струму;

ΔT – стаціонарне значення різниці температур;

U_R – спад напруги на резисторі R ;

U – напруга на нагрівнику;

I – сила струму в колі нагрівника;

k – коефіцієнт теплопровідності.

Вказівки з техніки безпеки

1. Вмикати в мережу вимірювальний блок L-мікро можна лише після перевірки його підключення до роз'єму послідовного порту комп'ютера.

2. Обережно поводитись з приладом, виготовленим з використанням скляних трубок.

Контрольні запитання

1. Який процес у природі називають теплообміном?

2. Які існують види теплопередачі? Дайте означення кожного з них.

3. Що називають теплопровідністю?

4. Записати та пояснити закон Фур'є для процесу теплопровідності.

5. Що називають коефіцієнтом теплопровідності, який його фізичний зміст?

6. Вивести робочу формулу для відшукування коефіцієнту теплопровідності пропонованої лабораторної роботи.

Додатки

ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ СТАЛІ

Швидкість світла в вакуумі	$c=2,998 \cdot 10^8$ м/с
Гравітаційна стала	$G=6,67 \cdot 10^{-11}$ м ³ ·(кг·с ²)
Число Авогадро	$N_A=6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Універсальна газова стала	$R=8,31$ Дж/(К·моль)
Стала Больцмана	$k=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Стала Фарадея	$F=9,65 \cdot 10^4$ Кл/моль
Елементарний заряд	$e=1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл
Питомий заряд електрона	$\frac{e}{m}=1,76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Атомна одиниця маси (1/12 маси атома нукліда ¹² C)	$1a.o.m.=1,66 \cdot 10^{-27}$ кг= $=931\text{MeV}=1,49 \cdot 10^{-10}$ Дж
Електрична стала	$\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнітна стала	$\mu_0=1,26 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Стала Планка	$h=6,62 \cdot 10^{-34}$ Дж·с= $4,14 \cdot 10^{-15}$ еВ·с, $\hbar=1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с= $6,59 \cdot 10^{-16}$ еВ·с
Середній радіус Землі	6370 км
Маса Землі	$5,98 \cdot 10^{24}$ кг
Середня віддаль Землі від Сонця	$1,5 \cdot 10^8$ км
Число Лошмідта	$2,69 \cdot 10^{25}$ м ⁻³
Заряд електрона	$1,6 \cdot 10^{-19}$ К
Маса електрона	$9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Швидкість звуку у повітрі при 0°С	332 м/с

Густина твердих речовин

Речовина	СГС, г/см ³	СІ, кг.м ³	Речовина	СГС, г/см ³	СІ, кг.м ³
Алмаз	3,5	350	Парафін	0,9	900
Алюміній	2,7	2700	Пісок сухий	1,5	1500
Антрацит	1,5	1500	Пісок вологий	2,0	2000
Береза суха	0,7	700	Платина	21,5	21500
Бетон	2,2	2200	Кухонна сіль	2,1	2100
Вісмут	9,8	9800	Плексиглас	1,2	1200
Вольфрам	19,0	19000	Корок	0,2	200
Граніт	2,6	2600	Свинець	11,4	11400
Графіт	2,1	2100	Срібло	10,5	10500
Грунт пухкий	1,5	1500	Сосна	0,5	500
Грунт щільний	3,0	3000	Сніг пухкий	0,25	250
Дуб сухий	0,8	800	Сталь	7,9	7900
Ялина суха	0,6	600	Скло пляшкове	2,7	2700
Залізо	7,8	7800	Скло віконне	2,5	2500
Золото	19,3	19300	Текстоліт	1,4	1400
Цегла	1,8	1800	Уран	18,7	18700
Латунь	8,5	8500	Фарфор	2,3	2300
Лід	0,9	900	Хром	7,0	7000
Крейда	2,4	2400	Цинк	7,1	7100
Мармур	2,7	2700	Чавун	7,0	7000
Нікелін	8,5	8500	Олово	7,3	7300
Нікель	8,9	8900	Ебоніт	1,2	1200

Таблиця 2

Густини рідин

Речовина	СГС, г/см ³	СІ, кг.м ³	Речовина	СГС, г/см ³	СІ, кг.м ³
Бензин	0,70	700	Олія соняшникова	0,92	920
Вода (при 4°C)	1,00	1000	Молоко	1,03	1030
Морська вода	1,03	1030	Нафта	0,76	760
Дизельне пальне	0,9	900	Ртуть	13,6	13600
Гліцерин	1,26	1260	Сірчана кислота міцна	1,86	1860
Гас	0,8	800	Скипидар	0,87	870
Мазут	0,9	900	Спирт	0,8	800
Масло	0,9	900	Смола	1,15	1150
Олія рицинова	0,96	960	Оцет	1,02	1020
Олія льняна	0,93	930	Ефір етиловий	0,71	710

Таблиця 3

Густини газів

Речовина	СГС, г/см ³	СІ, кг.м ³	Речовина	СГС, г/см ³	СІ, кг.м ³
Азот	0,00125	1,25	Гелій	0,00018	0,18
Аміак	0,00077	0,77	Кисень	0,00143	0,43
Аргон	0,00178	1,78	Криптон	0,00374	3,74
Ацетилен	0,00117	1,17	Неон	0,00090	0,90
Водень	0,00009	0,09	Озон	0,00213	2,13
Повітря	0,00129	1,29	Вуглекислий газ	0,00198	1,98
Метан	0,0007168	0,7168	Хлор	0,00321	3,21

Таблиця 4

Густина насиченої водяної пари при різних температурах

t °С	m , гр/м ³	t °С	m , гр/м ³
0	4,84	18	15,40
1	5,22	19	16,30
2	6,60	20	17,30
3	5,98	21	18,30
4	6,40	22	19,40
5	6,84	23	20,60
6	7,30	24	21,80
7	7,80	25	23,00
8	8,30	26	24,40
9	8,80	27	25,80
10	9,40	28	27,20
11	10,10	29	28,70
12	10,70	30	30,0
13	11,40	31	32,1
14	12,10	32	33,9
15	12,80	33	35,7
16	13,60	34	37,6
17	14,50	35	39,6

Таблиця 5

Питомі теплоємності газів

Речовина	СГС,	СІ,	Речовина	СГС,	СІ,
	$\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$		$\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$
Азот	0,248	1,04	Кисень	0,217	0,90
Аргон	0,124	0,502	Метан	0,593	2,48
Ацетилен	0,138	1,6	Неон	0,246	1,00
Водень	3,409	14,23	Пара ефіру	0,43	1,80
Водяна пара, 100°С	0,510	2,2	Пара спирту	0,36	1,51
Повітря	0,240	1,00	Хлор	0,124	0,502

Таблиця 6

Питомі теплоємності рідин і твердих тіл

Речовина	СГС, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	СІ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Речовина	СГС, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	СІ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
Алюміній	0,21	0,88	Гас	0,51	2,14
Бетон	0,22	0,92	Цегла	0,22	0,92
Вода	1,0	4,186	Латунь	0,09	0,38
Вольфрам	0,034	0,143	Лід	0,50	2,10
Гліцерин	0,58	2,24	Мідь	0,09	0,38
Дерево	0,65	2,73	Олія рослинна	0,48	2,00
Залізо	0,11	0,46	Молоко	0,04	3,95
Золото	0,03	0,13	Масло машинне	0,50	2,10
Іридій	0,03	0,13	Нікель	0,11	0,46
Кадмій	0,06	0,26	Спирт	0,58	2,44
Олово	0,06	0,26	Сталь	0,11	0,46
Пісок	0,23	0,97	Скло	0,20	0,84
Платина	0,03	0,13	Цемент	0,19	0,80
Ртуть	0,03	0,13	Цинк	0,09	0,38
Срібло	0,05	0,21	Чавун	0,13	0,55

Таблиця 7

Температури плавлення і тверднення

Речовина	$^\circ\text{C}$	К	Речовина	$^\circ\text{C}$	К
Алюміній	658	931	Припій	135-200	408-473
Вольфрам	3370	3643	Платина	1769	2042
Залізо	1520	1799	Ртуть	-39	234
Золото	1064	1337	Свинець	327	600
Латунь	1000	1273	Срібло	960	1233
Лід	0	273,15	Спирт	-114	159
Мідь	1083	1356	Сталь	1400	1673
Нікель	1453	1726	Хром	1800	2073
Нафталін	80	353	Цинк	419	682
Олово	232	505	Чавун білий	1200	1473
Осмій	5500	5773	Чавун сірий	1150	1423
Парафін	54	327	-	-	-

Таблиця 8

Температури кипіння різних речовин за нормального атмосферного тиску

Речовина	°С	К	Речовина	°С	К
Алюміній	1800	2073	Парафін	450-450	623-723
Вода	100	373,15	Ртуть	357	630
Залізо	2450	2723	Свинець	1600	1873
Льняна олія	360	633	Спирт	78	351
Мідь	2300	2533	Цинк	906	1179
Нафталін	218	491	Ефір	35	308
Олово	2337	2610			

Таблиця 9

Питомі теплоти плавлення і тверднення

Речовина	СГС, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	СІ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Речовина	СГС, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	СІ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Алюміній	96	386,4	Ртуть	3	12,6
Залізо	65	272,0	Свинець	6	25,2
Лід	80	336,0	Сталь	20	83,72
Мідь	42	176,4	Срібло	24	100,8
Нафталін	36	151,2	Цинк	27	113,4
Олово	14	58,8	Чавун білий	33	138,6
Платина	27	113,4	Чавун сірий	23	96,6

Таблиця 10

Питомі теплоти пароутворення

Речовина	СГС, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	СІ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	Речовина	СГС, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$	СІ, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Аміак	327	1370,0	Скипидар	70	294
Бензин	95	339,0	Спирт	204	856,8
Вода	539	2263,8	Сірковуглець	84	352,8
Ртуть	68	285,5	Ефір	84	352,8

Температура (°C) кипіння води при різних тисках (мм.рт.ст)

<i>p</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
720	98,49	98,53	98,57	98,61	98,65	98,69	98,72	98,76	98,80	98,84
730	98,88	98,92	98,95	98,99	99,03	99,07	99,11	99,14	99,18	99,22
740	99,26	99,29	99,33	99,37	99,41	99,41	99,48	99,52	99,56	99,59
750	99,63	99,67	99,70	99,74	99,78	99,78	99,85	99,89	99,93	99,96
760	100,00	100,04	100,07	100,11	100,15	100,18	100,22	100,26	100,29	100,33
770	100,37	100,40	100,44	100,48	100,51	100,55	100,58	100,62	100,66	100,69
780	100,73	100,76	100,80	100,84	100,87	100,91	100,94	100,98	101,02	101,05

Температурні коефіцієнти опору

Речовина	$\frac{1}{\text{град}}$	Речовина	$\frac{1}{\text{град}}$
Алюміній	0,0042	Нікель	0,0062
Вольфрам	0,0046	Ніхром	0,0001
Залізо	0,0060	Платина	0,0038
Іридій	0,0039	Радій	0,0044
Латунь	0,0010	Ртуть	0,0009
Константан	0,000003	Свинець	0,0042
Манганін	0,000030	Срібло	0,0040
Мідь	0,0043	Сталь	0,0050
Нейзильбер	0,0003	Цинк	0,0037
Натрій	0,0044	Вугілля	0,0008
Олово	0,0042	Чавун	0,0010

Таблиця 13

Коефіцієнти розширення

Речовина	K^{-1}	Речовина	K^{-1}
Лінійне розширення			
Алюміній	$2,4 \cdot 10^{-5}$	Мідь	$1,7 \cdot 10^{-5}$
Залізо (сталь)	$1,2 \cdot 10^{-5}$	Скло	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Латунь	$1,9 \cdot 10^{-5}$	Цинк	$2,9 \cdot 10^{-5}$
Об'ємне розширення			
Вода (5 – 10°C)	0,000053	Вода (40 – 60°C)	0,0004589
Вода (10 – 20°C)	0,000150	Вода (60 – 80°C)	0,000587
Вода (20 – 40°C)	0,000302	Ртуть (18°C)	0,00019

Таблиця 14

Діаметри молекул і атомів

Речовина	нм	Речовина	нм
Азот (N_2)	0,31	Кисень (O_2)	0,29
Аргон (Ar)	0,29	Окис вуглецю (CO)	0,32
Водень (H_2)	0,23	Вуглекислий газ (CO_2)	0,33
Водяна пара (H_2O)	0,26	Хлор (Cl_2)	0,37
Гелій (He)	0,19	-	-

Таблиця 15

В'язкість рідин та газів

Речовина	Температура, °С	В'язкість, мкПа·с	Речовина	Температура, °С	В'язкість, мкПа·с
Азот	0	16,7	Кисень	0	19,2
Вода	20	1004	Пара води	0	8,7
Повітря	21,6	18,4	Вуглекислий газ	0	13,7
Гелій	0	18,6	Хлор	0	12,9

Таблиця 16

Поверхневий натяг рідин при температурі 20°С

Речовина	Поверхневий натяг, мН/м	Речовина	Поверхневий натяг, мН/м
Анілін	43	Рицинова олія	33
Бензол	30	Гас	30
Вода	73	Мильний розчин води	45
Вода (70°С)	64	Ртуть	500
Гліцерин	64	Срібло (пл. 960°С)	780
Золото (пл. 1070°С)	610	Спирт	22

Таблиці значень синусів і тангенсів для кутів 0 – 99°

α°	$\sin\alpha$	$\operatorname{tg}\alpha$	α°	$\sin\alpha$	$\operatorname{tg}\alpha$	α°	$\sin\alpha$	$\operatorname{tg}\alpha$
0	0,0000	0,0000	31	0,5150	0,6009	61	0,8746	1,8040
1	0,0175	0,0175	32	0,5299	0,6349	62	0,8829	1,8810
2	0,0349	0,0349	33	0,5446	0,6494	63	0,8910	1,9360
3	0,0523	0,0524	34	0,5592	0,6745	64	0,8988	2,050
4	0,0698	0,0699	35	0,5736	0,7002	65	0,9063	2,1450
5	0,0872	0,0875	36	0,5878	0,7265	66	0,9135	2,2460
6	0,1045	0,1051	37	0,6018	0,7536	67	0,9205	2,3560
7	0,1219	0,1228	38	0,6157	0,7813	68	0,9272	2,4750
8	0,1392	0,1405	39	0,6293	0,8098	69	0,9336	2,6050
9	0,1564	0,1584	40	0,6428	0,8391	70	0,9397	2,7470
10	0,1736	0,1763	41	0,6561	0,8693	71	0,9455	2,9040
11	0,1908	0,1944	42	0,6691	0,9004	72	0,9511	3,0780
12	0,2079	0,2126	43	0,6820	0,9325	73	0,9563	3,2710
13	0,2250	0,2309	44	0,6947	0,9657	74	0,9613	3,4870
14	0,2419	0,2493	45	0,7071	1,0000	75	0,9659	3,7320
15	0,2588	0,2679	46	0,7193	1,0360	76	0,9703	4,0110
16	0,2756	0,2867	47	0,7314	1,0720	77	0,9744	4,3310
17	0,2924	0,3057	48	0,7431	1,1110	78	0,9781	4,7050
18	0,3090	0,3249	49	0,7547	1,1500	79	0,9816	5,1450
19	0,3256	0,3443	50	0,7660	1,1920	80	0,9848	5,6710
20	0,3420	0,3640	51	0,7771	1,2350	81	0,9877	6,3140
21	0,3584	0,3839	52	0,7880	1,2800	82	0,9903	7,1150
22	0,3746	0,4040	53	0,7986	1,3270	83	0,9925	8,1440
23	0,3907	0,4245	54	0,8090	1,3760	84	0,9945	9,5140
24	0,4067	0,4452	55	0,8192	1,4280	85	0,9962	11,430
25	0,4226	0,4663	56	0,8290	1,4830	86	0,9976	14,300
26	0,4384	0,4877	57	0,8387	1,5400	87	0,9986	19,080
27	0,4540	0,5095	58	0,8480	1,6000	88	0,9994	28,640
28	0,4695	0,5317	59	0,8572	1,6640	89	0,9998	57,290
29	0,4848	0,5543	60	0,8660	1,7320	90	1,0000	∞
30	0,5000	0,5774	-	-	-	-	-	-

Список використаної та рекомендованої літератури

1. *Бушок Г.Ф.* Курс фізики / Г.Ф.Бушок, В.В.Левандовський, Г.Ф.Півень. – К. : Либідь, 1997. – Т.1. – 1997. – 447 с.
2. *Бушок Г.Ф.* Курс фізики: підручник: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка / Г.Ф.Бушок, Є.Ф.Венгер. – К. : Вища школа, 2002. – Кн. 1. – 2002. – 376 с.
3. *Гершензон Е.М.* Курс общей физики. Молекулярная физика : [учеб. пособие для физ.-мат. фак. пед. ин-тов] / [Е.М.Гершензон и др.]; под ред. Е.М.Гершензона. – М. : Просвещение, 1982. – 207 с.
4. *Дущенко В.П.* Загальна фізика : Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка: [навч. посібник для студ. фіз.-мат. фак-тів пед. ін-тів] / В.П.Дущенко, І.М.Кучерук. – 2-ге вид., перероб.і допов. – К : Вища школа, 1993. – 431 с.
5. *Кучерук І.М.* Загальний курс фізики : [навч. посібник для студ. техн. і пед. спец. вищ. навч. закл.] : У 3 т. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка / І.М.Кучерук, І.Т.Горбачук, П.П.Луцик. - 2-ге вид., виправ. – К : Техніка, 2006. –Т.1. –2006. – 532 с.
6. Лабораторный практикум по общей физике: [Учеб. пособие для студ. физ.-мат. фак. пед. ин-тов] / Ю.И.Кравцов, А.Н.Мансуров, Н.Г.Птицина и др.; Под ред. Е.М.Гершензона, Н.Н.Малова. – М. : Просвещение, 1985. – 351 с.
7. *Матвеев А.Н.* Молекулярная физика: [учеб. для физ. спец. вузов] / Матвеев А.Н. – М. : Высш. шк., 1987. – 360 с.
8. *Овруцький А.М.* Молекулярна фізика : [Навч. посібник для фізич. спец. ун-тів.]. – Дніпропетровськ : ДДУ, 1999. – 211 с.
9. *Савельев И.В.* Курс физики. Механика. Молекулярная физика / И.В.Савельев. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. –Т.1. – 352 с.
10. Фізичний практикум / В.П.Дущенко, В.М.Барановський [та ін.] ; ред. В.П.Дущенко. – К.: Вища школа, 1981. – Ч.1. –1981. – 246 с.

Зміст

ПОХИБКИ ВИМІРЮВАНЬ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН І ОБРОБКА ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	1
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1	
Визначення основних точок термометра	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	
Визначення коефіцієнта об'ємного розширення рідин і коефіцієнта лінійного розширення.....	8
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3	
Визначення сталої Больцмана.....	14
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4	
Визначення питомої теплоємності твердого тіла	19
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5	
Визначення питомої теплоємності рідини електричним калориметром.....	22
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6	
Визначення питомої теплоємності металів методом охолодження.....	26
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7	
Визначення питомої теплоти плавлення льоду	30
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8	
Визначення питомої теплоти пароутворення рідини	34
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9	
Визначення холодильного коефіцієнту та відношення теплоємностей газу c_p/c_v методом Клемана-Дезорма.....	38
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №10	
Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметру молекул повітря.....	47
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №11	
Визначення в'язкості рідини методом Стокса	52
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №12	
Визначення коефіцієнта в'язкості методом Пуазейля.....	57
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №13	
Визначення температурної залежності коефіцієнта в'язкості віскозиметром Оствальда-Пінкевича	60
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №14	
Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини методом відриву кільця.....	63
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №15	
Вимірювання вологості повітря.....	66

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №16	
Вимірювання в'язкості рідини методом Стокса	71
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 17	
Вимірювання теплопровідності повітря.....	76
ДОДАТКИ	83
ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ СТАЛІ.....	83
Густина твердих речовин.....	84
Густина рідин.....	85
Густина газів	85
Густина насиченої водяної пари при різних температурах	86
Питомі теплоємності газів	86
Питомі теплоємності рідин і твердих тіл	87
Температури плавлення і тверднення	87
Температури кипіння різних речовин за нормального атмосферного тиску.....	88
Питомі теплоти плавлення і тверднення	88
Питомі теплоти пароутворення	88
Температура (°C) кипіння води при різних тисках (<i>мм.рт.ст</i>).....	89
Температурні коефіцієнти опору	90
Коефіцієнти розширення.....	90
Діаметри молекул і атомів	90
В'язкість рідин та газів.....	91
Поверхневий натяг рідин при температурі 20°C	91
Таблиці значень синусів і тангенсів для кутів 0 – 99°	92
Список використаної та рекомендованої літератури	93

Навчально-методичне видання

Антонова Ніна Григорівна – завідувача лабораторією Механіки та молекулярної фізики КДПУ ім. В.Винниченка.

Гур'євська Олександра Миколаївна – аспірант кафедри фізики та методики її викладання КДПУ ім. В.Винниченка.

Подопригора Наталія Володимирівна – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та методики її викладання КДПУ ім. В.Винниченка.

Сальник Ірина Володимирівна – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізики та методики її викладання КДПУ ім. В.Винниченка.

Царенко Олег Миколайович – кандидат технічних наук, професор кафедри фізики та методики її викладання КДПУ ім. В.Винниченка.

Лабораторний практикум з курсу загальної фізики :
Навчально-методичний посібник. Частина 2. Молекулярна
фізика.

За загальною редакцією: О.М.Царенка, І.В.Сальник.

Макетування: Н.В.Подопригора

**СВІДОЦТВО ПРО ВНЕСЕННЯ СУБ'ЄКТА ВИДАВНИЧОЇ СПРАВИ
ДО ДЕРЖАВНОГО РЕЄСТРУ ВИДАВЦІВ,
ВИГОТІВНИКІВ І РОЗПОВСЮДЖУВАЧІВ ВИДАВНИЧОЇ ПРОДУКЦІЇ
Серія ДК № 1537 від 22.10.2003 р.**

Підписано до друку 15.12.2010. Формат 60x90/16. Папір офсет.
Друк різнограф. Ум.др.арк. 4,64. Наклад 100. Зам. № 6177.

РЕДАКЦІЙНО–ВИДАВНИЧИЙ ВІДДІЛ
*Кіровоградського державного педагогічного
університету імені Володимира Винниченка*
25006, Кіровоград, вул. Шевченка, 1.
Тел.: (0522) 28 59 84.
Факс.: (0522) 24 85 44
E-Mail.: mails@kspu.kr.ua

