

Лабораторні роботи

Молекулярна фізика



ПЕРЕДМОВА

Фізика – наука про природу, про найбільш фундаментальні закономірності руху матерії, її будову, властивості та взаємодію. Головна мета фізики – встановити та пояснити закони, за якими відбуваються процеси та явища навколишнього світу.

Фізика необхідна студентам для подальшого успішного засвоєння обраної спеціальності.

В першу чергу фізика для студентів фізичних спеціальностей має на меті формування теоретичної бази для освоєння спецкурсів. Запорукою цьому повинна стати чіткість та глибина розуміння основних понять, законів та принципів фізики.

По-друге, фізика – експериментальна наука з широко розвинутою системою методів наукових досліджень. Тому при вивченні фізики, відбувається знайомство із сучасною науковою апаратурою, з'являються початкові навички проведення експериментальних досліджень, вміння оцінювати похибки вимірювань.

Лабораторні роботи повинні виконуватися у добре обладнаних лабораторіях, оснащених сучасними приладами. Студенти повинні мати можливість використовувати комп'ютери для обробки даних лабораторного експерименту, а також отримати початкові навички проведення сучасного фізичного експерименту, який виконується на лінії зв'язку з комп'ютером.

По-третє, знайомство з розвитком фізики у світі та в Україні зокрема, з методологією розв'язання складних проблем, що виникали в її історії, є невичерпним джерелом творчого підходу до вирішення суто прикладних проблем. Класичні приклади використання аналогій, застосування моделювання фізичних процесів, створення ідеальних моделей та абстракцій навчають умінню виділяти головне в кожній проблемі, що виникатиме у повсякденній роботі.

Насамкінець, фізика несе і значну виховну роль, підкреслюючи значення людського фактора в освоєнні природи та у посяганні на її таємниці. Біографії більшості видатних вчених можуть стати прикладом служіння науці і людству. Важливо донести що фізика, перебуваючи завжди на вістрі технічного прогресу, виступала як джерелом, так і засобом розв'язання більшості проблем, зокрема, екологічних, даючи найбільш системний підхід до оцінки екологічної ситуації, формуючи погляд про формальний взаємозв'язок в Природі, у центрі якої – найбільша цінність – Людина.

Засвоєння дисципліни «Фізика» студентами відбувається під час слухання лекцій, виконання лабораторних робіт, проведення практичних чи семінарських занять. Молекулярна фізика є тим розділом загального курсу фізики, в якому вперше зустрічаємося з головною проблемою фізики – проблемою будови речовини.

Пропонований практикум з лабораторних робіт призначений у першу чергу допомогти студентам як підготуватись до виконання фізичного експерименту, так і правильно його виконати, а також оформити результати експерименту.

Практикум підготовлений на базі лабораторій кафедри фізики і хімії твердого тіла Прикарпатського університету і може бути використаний студентами безпосередньо для виконання лабораторних робіт, як інструкція з теоретичними відомостями.

Дмитро Фреїк

Знаходження похибок вимірювання і обчислення шуканих величин

Метод №1. Нехай шукана величина задається функцією $Z=f(a,b,c,d\dots)$, де a,b,c,d – величини, які в ході роботи вимірюються безпосередньо. Щоб обчислити Z , а також абсолютну і відносну похибки потрібно:

1. Виміряти кожен з величин $a,b,c,d \dots$ декілька разів (n – число вимірювань кожної величини, може бути як однаковим для $a,b,c,d\dots$ так і різним у залежності від умов досліду).

2. Знайти середнє значення кожної величини

$$\langle a \rangle = \frac{a_1+a_2+\dots+a_n}{n}, \quad \langle b \rangle = \frac{b_1+b_2+\dots+b_n}{n};$$

3. Підставити середні значення виміряних величин у формулу і визначити $\langle Z \rangle$;

4. Знайти різниці

$$\Delta a_1 = \langle a \rangle - a_1 \quad \Delta b_1 = \langle b \rangle - b_1$$

$$\Delta a_2 = \langle a \rangle - a_2 \quad \Delta b_2 = \langle b \rangle - b_2$$

.....

$$\Delta a_n = \langle a \rangle - a_n \quad \Delta b_n = \langle b \rangle - b_n;$$

5. Обчислити середню квадратичну похибку для кожної величини (стандартну похибку) за формулою:

$$S_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta a_i^2}{n(n-1)}}; \quad S_b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta b_i^2}{n(n-1)}} \text{ і т. д.}$$

6. Помноживши стандартну похибку на коефіцієнт Стюдента t_α знайти абсолютну похибку для кожної виміряної величини

$$\Delta a = t_\alpha S_a, \quad \Delta b = t_\alpha S_b \text{ і т. д.};$$

t_α – визначити за таблицею

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	∞
T_α	12.7	4.3	3.2	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.0

7. Знайти ΔZ за формулою:

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{df}{da}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{df}{db}\right)^2 \Delta b^2 + \dots};$$

8. Знаючи ΔZ , визначити відносну похибку: $\varepsilon = \frac{\Delta Z}{\langle Z \rangle} \cdot 100\%$;

9. Одержані результати записати у вигляді $Z = \langle Z \rangle \pm \Delta Z$.

Примітка 1.

Якщо функція $f(a,b,c,d...)$ має вигляд, зручний для логарифмування, наприклад, $Z = \frac{a^n \cdot b^m}{c^k \cdot d^l}$, то методика обчислень ΔZ може бути спрощена.

Після того, як виконані пункти 1-6 поступають таким чином:

1. Логарифмують вираз для Z , $\ln Z = n \ln a + m \ln b - k \ln c - l \ln d$
2. Одержаний вираз диференціюють

$$\frac{dZ}{Z} = n \frac{da}{a} + m \frac{db}{b} + k \frac{dc}{c} + l \frac{dq}{q};$$

3. Заміняють $dZ, da, db...$ на $\Delta Z, \Delta a, \Delta b...$, а знаки $(-)$ на $(+)$.
4. Обчислюють

$$\frac{\Delta Z}{\langle Z \rangle} = \sqrt{n^2 \left(\frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \right)^2 + m^2 \left(\frac{\Delta b}{\langle b \rangle} \right)^2 + k^2 \left(\frac{\Delta c}{\langle c \rangle} \right)^2 + l^2 \left(\frac{\Delta d}{\langle d \rangle} \right)^2}$$

5. Одержане значення $\frac{\Delta Z}{\langle Z \rangle}$ множать на 100% і одержують відносну похибку ε .
6. Абсолютну похибку визначають за формулою $\Delta Z = \langle Z \rangle \varepsilon$.
7. Результат записують згідно пункту 9.

Примітка 2.

Якщо для одної або декількох величин, що входять у формулу для визначення $\langle Z \rangle$, похибка Δa виходить меншою від точності приладу, то замість Δa беруть точність приладу для підстановки у відповідну формулу. Якщо ж наперед відомо, що результат багатьох вимірювань якоїсь величини буде один і той же (наприклад, вимірювання відстані між двома точками лінійкою), то роблять тільки одне вимірювання, пункти 2-6 для цієї величини не виконують, а в формулу підставляють замість абсолютної похибки цієї величини точність приладу.

Примітка 3.

Якщо в формулі одна з величин $\frac{\Delta a}{a}$ набагато менша від інших $\frac{\Delta b}{b}, \frac{\Delta c}{c}, \frac{\Delta d}{d}$ і т.д. то нею можна знехтувати.

Метод №2. Знаходження відносної похибки.

1. При прямих вимірюваннях.

1. Вимірюємо декілька разів шукану величину:

$$x_1, x_2, \dots, x_n$$

2. Знаходимо середнє значення величин:

$$x_{cp} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

3. Різниця, взята по модулю, між середнім значенням величини і одним із її вимірюваних називається абсолютною похибкою вимірювання:

$$|x_{cp} - x_1| = \Delta x_1$$

$$|x_{cp} - x_2| = \Delta x_2$$

.....

$$|x_{cp} - x_n| = \Delta x_n$$

4. Знаходимо середню абсолютну похибку результатів вимірювання:

$$\Delta x_{cp} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n}$$

5. Знаходимо відносну похибку результатів вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{cp}}{x_{cp}} \cdot 100\%$$

6. Істинне значення вимірюваної величини рівне:

$$x = x_{cp} \pm \Delta x_{cp}$$

II. При посередніх вимірюваннях.

Нехай шукана величина визначається як функція декількох змінних, які вимірюються окремо:

$$N = f(x, y, z)$$

Середнє значення такої величини рівне:

$$N_{cp} = f(x_{cp}, y_{cp}, z_{cp})$$

Відносна похибка вимірювання

$$\varepsilon = \frac{\Delta N_{cp}}{N_{cp}}$$

З іншого боку, якщо замінити знак абсолютної похибки Δ на диференціал d , то видно, що відношення dN/N є диференціал від натурального логарифму даної величини N :

$$\frac{dN}{N} = d(\ln N)$$

Виходячи з цього, маємо алгоритм знаходження відносної похибки:

1. Прологарифмувати формулу $N = f(x, y, z)$:

$$\ln N$$

2. Взяти диференціал від логарифму:

$$d(\ln N) = \frac{1}{N} dN$$

3. Замість диференціалів незалежних змінних записуємо абсолютні похибки результатів прямих вимірів, і всі знаки “-” замінюємо на “+”.

Одержимо відносну похибку вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta N}{N}$$

4. Знаючи відносну похибку ε , знаходимо абсолютну похибку вимірювання:

$$\Delta N_{cp} = \varepsilon N_{cp}.$$

5. Істинне значення величини записують у формі:

$$N = N_{cp} \pm \Delta N_{cp}$$

III. Приклад знаходження відносної похибки.

Коефіцієнт в'язкості знаходиться за формулою:

$$\eta = \frac{2}{9} \frac{\rho_2 - \rho_1}{l} g t r^2 = \frac{2}{9} (\rho_2 - \rho_1) g \frac{t r^2}{l}$$

Змінними величинами є l , t , r , тому:

$$\ln \eta = \ln(t r^2) - \ln l$$

$$\ln \eta = \ln t + \ln r^2 - \ln l$$

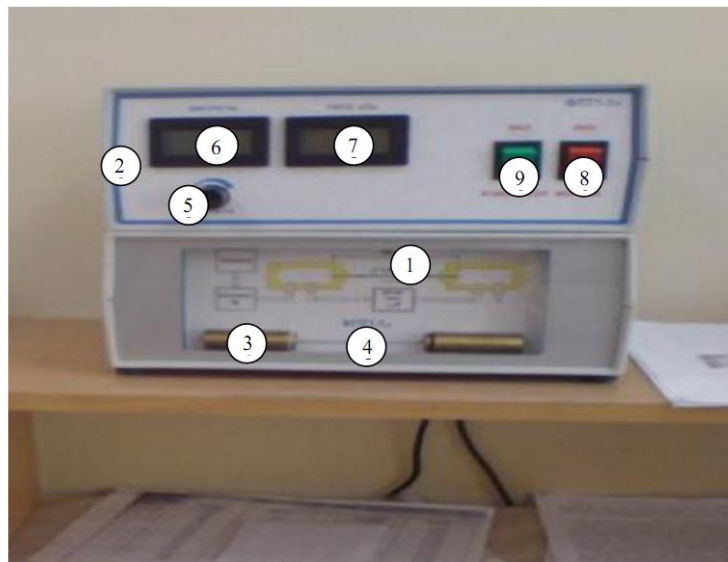
$$d(\ln \eta) = \frac{1}{t} dt + 2 \frac{1}{r} dr - \frac{1}{l} dl$$

Отже

$$\varepsilon = \frac{\Delta t}{t} + 2 \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta l}{l}$$

Лабораторна робота №1

**Тема: «Визначення коефіцієнта в'язкості повітря
капілярним методом»**



Експериментальна установка ФПТ1-1

1 – блок робочого елемента РЕ-1; 2- блок приладів; 3 – пневмо-камера; 4 – капіляр; 5 – регулятор витрат; 6 – вимірювач витрат; 7 – вимірювач перепаду тиску; 8 –вмикач мережі; 9 –вмикач компресора.

Мета роботи - вивчення внутрішнього тертя повітря як одного з явищ переносу в газах.

Теоретичні відомості

Явища переносу - це процеси встановлення рівноваги в системі шляхом переносу маси (дифузія), енергії (теплопровідність) та імпульсу молекул (внутрішнє тертя, або в'язкість). Усі ці явища обумовлені тепловим рухом молекул.

При явищі в'язкості спостерігається перенос імпульсу від молекул із шарів потоку, які рухаються швидше, до повільніших. Наприклад, у випадку протікання рідини або газу прямолінійною циліндричною трубою (капіляром) за малих, швидкостей потоку течія є ламінарною, тобто потік газу рухається окремими шарами, які не перемішуються між собою. У цьому випадку шари являють собою сукупність нескінченно тонких циліндричних поверхонь, вкладених одна в одну, які мають спільну вісь, що збігається з віссю труби.

Внаслідок хаотичного теплового руху молекули безперервно переходять із шару в шар і при зіткненнях з іншими молекулами обмінюються імпульсами, напрямленого руху. При переході із шару з більшою швидкістю напрямленого руху в шар із меншою швидкістю молекули переносять у другий шар свій імпульс напрямленого руху. У "більш швидкий" шар переходять молекули з меншим імпульсом. У результаті перший шар гальмується, а другий - прискорюється. Дослід показує, що імпульс dP , що передається від шару до шару через поверхню S , пропорційний градієнту швидкості $\frac{dv}{dr}$, площі S та часу переносу dt :

$$dP = -\eta \cdot \frac{dv}{dr} \cdot S \cdot dt$$

У результаті між шарами виникає сила внутрішнього тертя.

$$F_T = \left| \frac{dP}{dt} \right| = \eta \cdot \left| \frac{dv}{dr} \right| \cdot S \quad (1)$$

де η - коефіцієнт в'язкості.

Для ідеального газу

$$\eta = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \langle v_T \rangle$$

тут ρ - густина газу; $\langle \lambda \rangle$ - середня довжина вільного пробігу молекул; $\langle v_T \rangle$ - середня швидкість теплового руху молекул, $v_T = \sqrt{\frac{8 \cdot R \cdot T}{\pi \cdot \mu}}$; μ - молекулярна маса газу; R - універсальна газова стала.

Виділимо в капілярі уявний циліндричний об'єм газу радіуса r і довжини l , як показано на рис. 1. Позначимо тиски на його торцях P_1 і P_2 . При установленій течії сила тиску на циліндр $F = (P_1 - P_2) \cdot \pi \cdot r^2$ зрівноважується, силою внутрішнього тертя F_T , що діє на бічну поверхню циліндра з боку зовнішніх шарів газу:

$$F - F_T = 0 \quad (2)$$

Сила внутрішнього тертя визначається за формулою Ньютона (1). Зважаючи на те, що $S = 2\pi r l$ і швидкість $v(r)$ зменшується при віддаленні від осі труби, тобто $\frac{dv}{dr} < 0$ можна записати:

$$F_T = -\eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l \quad (3)$$

У цьому випадку умова стаціонарності (2) запишеться у вигляді:

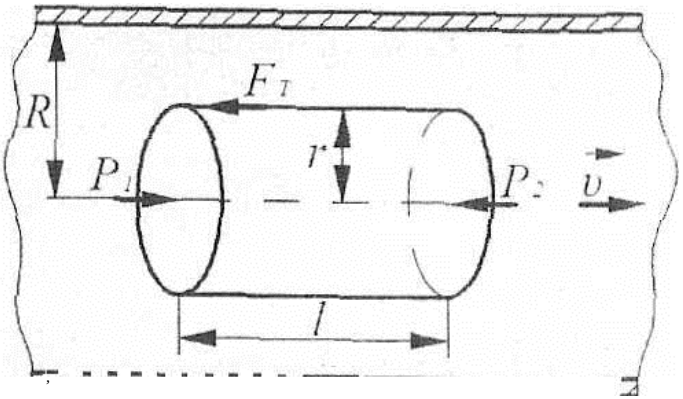


Рисунок 1. До розрахунку об'ємної витрати газу в разі протікання його через капіляр

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 + \eta \frac{dv}{dr} 2\pi r l = 0 \quad (4)$$

Інтегруючи цю рівність, одержимо:

$$v(r) = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} r^2 + C$$

де C - стала інтегрування, яка визначається граничними умовами задачі.

При $r = R$ швидкість газу повинна перетворюватись на нуль, оскільки сила внутрішнього тертя об стінку капіляра гальмує суміжний з нею шар газу.

Тоді

$$v(r) = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} \cdot (R^2 - r^2) \quad (5)$$

Підрахуємо об'ємну витрату газу Q , тобто об'єм, що протікає за одиницю часу через поперечний переріз труби. Через кільцеву площадку з внутрішнім радіусом r і зовнішнім $r + dr$ щосекунди протікає об'єм газу

$$dQ = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \cdot v(r)$$

Тоді

$$Q = \int_0^R 2 \cdot \pi \cdot r \cdot v(r) \cdot dr = \pi \frac{P_1 - P_2}{8 \cdot \eta \cdot l} \int_0^R (R^2 - r^2) \cdot r \cdot dr,$$

Або

$$Q = \pi \frac{P_1 - P_2}{8 \cdot \eta \cdot l} R^4 \quad (6)$$

Формулу (6), яка зветься формулою Пуазейля, можна використовувати для експериментального визначення коефіцієнта в'язкості газу.

Формулу Пуазейля було одержано в припущенні ламінарної течії газу або рідини. Однак із збільшенням швидкості потоку рух стає турбулентним і шари перемішуються. За турбулентного руху швидкість у кожній точці змінює своє значення і напрям, зберігається тільки середнє значення швидкості. Характер руху рідини або газу в трубі визначається числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\langle v \rangle \cdot R \cdot \rho}{\eta} \quad (7)$$

де $\langle v \rangle$ - середня швидкість потоку; ρ - густина рідини або газу.

У гладких циліндричних каналах перехід від ламінарної течії до турбулентної відбувається при $Re \approx 1000$. Тому в разі використання формули Пуазейля необхідно забезпечити виконання умови $Re < 1000$. Крім того, експеримент необхідно ставити таким чином, щоб стисливістю газу можна було б знехтувати. Це можливо тоді, коли перепад тисків вздовж капіляра значно менший від самого тиску. У даній установці тиск газу дещо більший від атмосферного (9,8 кПа), а перепад тисків становить від $\sim 0,098$ кПа, тобто приблизно 1 % атмосферного.

Формула (6) справедлива для ділянки труби, в якій встановилась стала течія з квадратичним законом розподілу швидкостей (5) по перерізу труби. Така течія встановлюється на деякій відстані від входу в капіляр, тому для досягнення достатньої точності експерименту необхідний виконання умови $R \ll L$, де R - радіус; L - довжина капіляра.

Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта в'язкості повітря призначена експериментальна установка ФПТ 1-1, загальний вид якої зображений на титульній сторінці 8.

Повітря в капілярі 4 нагнітається мікрокомпресором, розміщеним в блоці приладів 2. Об'ємна витрата повітря вимірюється спеціальним датчиком витрати AWM3300V($0 \div 1$ л/хв), і результати відображаються цифровим вимірювачем 6, а необхідне його значення встановлюється регулятором "Повітря", яке знаходиться на передній панелі блоку приладів. Для вимірювання різниці тиску повітря на кінцях капіляра використовується диференціальний датчик тиску MPX5010 (до 10 кПа) і результати відображаються цифровим вимірювачем 7.

Типові геометричні розміри капіляра – радіус R , довжина L , вказані на робочому місці. Фактичні значення цих параметрів приводяться в паспорті установки.

Порядок виконання роботи

1. Подати на установку живлення, включивши на приладі перемикач «МЕРЕЖА». При цьому в модулі робочого елемента спалахує постійне підсвічування відсіку (зелене свічення), вказує на подачу живлення.
2. Включити в модулі приладів перемикач «КОМПРЕСОР». При цьому відсік в модулі робочого елемента підсвічує миготливим червоним світлом вказуючи на те, що мікрокомпресор почав прокачування капіляра з мінімально можливою витратою повітря.
3. Плавню обертаючи за годинниковою стрілкою регулятор «ВИТРАТИ» встановимо за показами витратоміру вибране значення об'ємної витрати повітря Q . Витратомір вимірює вихідну напругу датчика витрати у вольтах, а значення витрати в л/хв. визначається по градуовальній таблиці.
4. Зняти відповідні покази з вимірювача різниці тиску ΔP в кПа. Значення Q і ΔP занести в таблицю 1.
5. Повторити вимірювання п. 2-3-4 для 5 значень об'ємної витрати повітря в діапазоні від 0.1-1.0 л/хв.
6. Встановити регулятор витрати повітря на мінімум і вимкнути «КОМПРЕСОР». Після цього вимкнути установку тумблером "МЕРЕЖА".

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного режиму визначити за формулою Пуазейля коефіцієнт в'язкості повітря:

$$\eta = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot Q \cdot l}$$

Знайти середнє значення коефіцієнта в'язкості.

2. За формулою $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ обчислити середню швидкість теплового руху молекул повітря, враховуючи, що молярна маса повітря $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$, а універсальна газова стала $R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{K)}$.
3. За формулою $\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v_T \rangle}$ обчислити середню довжину вільного пробігу молекул. При цьому густину повітря знайти з табл. 1 для відомих значень температури й тиску в лабораторії в процесі виконання експерименту.
4. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Звіт про виконану роботу

1. Робочі формули

Коефіцієнт в'язкості повітря:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 Q l} \quad (1)$$

2. Результати експерименту

Таблиця 1

№ вимірювання	$Q, \text{м}^3/\text{с}$	$\Delta P, \text{Па}$	$\eta, \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$	$\varepsilon \%$

3. Обчислення похибок вимірювання:

Метод № 1

- а) Абсолютна похибка визначення коефіцієнта в'язкості повітря:

$$\Delta \eta = t_\alpha \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N ((\eta) - \eta_n)^2}{N(N-1)}}, \quad (2)$$

де t_α - відповідний коефіцієнт Стюдента.

- б) Відносна похибка визначення діаметра круга:

$$\varepsilon = \frac{\Delta \eta}{\langle \eta \rangle} \cdot 100\% \quad (3)$$

Метод № 2

- а) Визначення відносної похибки визначення коефіцієнта теплопровідності:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 Q L}$$

$$\ln \eta = \ln R^4 + \ln \Delta P - \ln L - \ln Q$$

$$\ln \eta = 4 \ln R + \ln \Delta P - \ln L - \ln Q$$

$$\frac{d\eta}{\eta} = 4 \frac{dR}{R} + \frac{d\Delta P}{\Delta P} - \frac{dL}{L} - \frac{dQ}{Q}$$

$$\frac{\Delta \eta}{\eta} = 4 \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta P}{\Delta P} - \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta Q}{Q}$$

$$\varepsilon = \left(4 \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta P}{\Delta P} - \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta Q}{Q} \right) \cdot 100\%$$

б) Абсолютна похибка:

$$\Delta \eta = \varepsilon \cdot \eta$$

4. Висновки записати в такому вигляді: $\eta = \langle \eta \rangle \pm \Delta \eta$

Контрольні завдання

1. Розкажіть про явища переносу в газах.
2. Поясніть явище внутрішнього тертя в ідеальному газі з точки зору молекулярно-кінетичної теорії.
3. Напишіть і поясните формулу Ньютона для внутрішнього тертя.
4. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості? В яких одиницях СІ вимірюється ця величина?
5. Запишіть формулу для коефіцієнта в'язкості ідеального газу.
6. Яка величина називається середньою швидкістю теплового руху молекул ідеального газу? Від яких фізичних величин вона залежить?
7. Яка величина зветься середньою довжиною вільного пробігу молекули? Від яких фізичних величин вона залежить?
8. У чому полягає капілярний метод визначення коефіцієнта в'язкості газів?
9. Виведіть формулу Пуазейля. За яких умов її можна застосовувати?
10. Як змінюється швидкість руху газу по радіусу каналу за ламінарного режиму течії?
11. Як оцінити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекули газу, використовуючи явище внутрішнього тертя у газах?
12. Чому при будівництві магістральних газопроводів використовують труби великого діаметра, а не збільшують тиск газу, який транспортується.

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
1	Витрата повітря через робочий елемент від $0,33 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ до $1,6 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$	від 0,2 л/хв. до 1,0 л/хв.
2	Перепад тиску на робочому елементі не більше, кПа.	5
3	Розміри капіляра робочого елементу: - довжина, м - діаметр, мм.	0,1 0,95
4	Похибка визначення коефіцієнта в'язкості повітря при витраті через капіляр $0,75 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ не більше, %	15
5	Живлення установки від мережі змінного струму. - Напруга, В - Частота	220_{-3}^{+2} 50 ± 1
6	Споживана потужність, Вт, не більше	15
7	Установка допускає безперервну роботу протягом, год.	12
8	Габаритні розміри, мм, не більше	290x220x220
9	Маса установки, кг, не більше	5

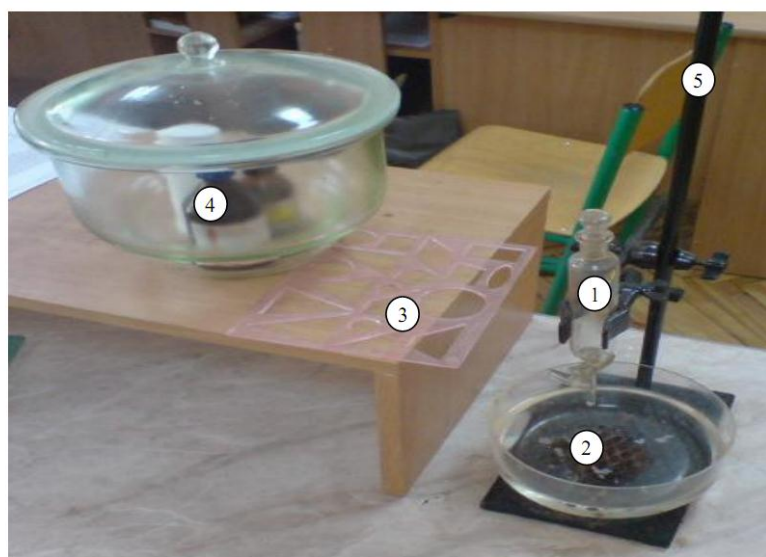
Таблиця перекладу показань приладу «Витрата Q», В витрати в л / хв

Датчик тиску АWM 3300DP

<i>№</i>	<i>Покази приладу «Витрата Q», В</i>	<i>витрата в л/хв.</i>	<i>№</i>	<i>Покази приладу «Витрата Q», В</i>	<i>витрата в л/хв.</i>
1	1.00	0.00	19	4.06	0.450
2	1.39	0.025	20	4.17	0.475
3	1.71	0.050	21	4.25	0.500
4	2.01	0.075	22	4.31	0.525
5	2.29	0.100	23	4.35	0.550
6	2.54	0.125	24	4.39	0.575
7	2.69	0.150	25	4.43	0.600
8	2.85	0.175	26	4.48	0.625
9	2.99	0.200	27	4.53	0.650
10	3.11	0.225	28	4.58	0.675
11	3.21	0.250	29	4.63	0.700
12	3.33	0.275	30	4.70	0.750
13	3.47	0.300	31	4.75	0.800
14	3.56	0.325	32	4.79	0.850
15	3.65	0.350	33	4.86	0.900
16	3.75	0.375	34	4.90	0.950
17	3.89	0.400	35	5.00	1.00
18	3.98	0.425	36	5.05	1.04

Лабораторна робота №2

Тема: «Визначення розмірів молекули рицинової
олії»



Експериментальна установка

1 – бюретка; 2 – кювета з водою; 3 – лінійки; 4 – рицинова олія; 5 – штатив;

Мета роботи: практичне визначення площі поперечного перерізу і висоти молекулярного шару рицинової олії.

Прилади і матеріали: бюретка, рицинова олія, кювета з водою, лінійка, штатив.

Теоретичні відомості

На поверхню води в кюветі падає одна крапля рицинової олії яка розтікається мономолекулярним шаром. Діаметр утвореного круга визначається як середнє арифметичне:

$$D = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n} \quad (1)$$

Величина D дозволяє розрахувати площу поперечного перерізу однієї молекули:

$$S_m = \frac{S}{N} \quad (2)$$

де S - площа утвореного круга, N - кількість молекул в краплині. Число молекул в краплі обчислюють за формулою:

$$n = \frac{m}{\mu} N_A \quad (3)$$

де (μ - молярна маса рицинової олії, m — маса однієї краплі. Врахувавши зв'язок між площею круга та його діаметром $S = \frac{\pi D^2}{4}$, знаходимо площу поперечного перерізу однієї молекули:

$$S_m = \frac{\pi \mu}{4 N_A m} D^2 \quad (4)$$

Висоту h молекули можна обчислити, вважаючи шар олії одномолекулярним. Для цього слід поділити об'єм такого шару ($V = \frac{m}{\rho}$, де ρ – густина олії) на площу S утвореного круга:

$$h = \frac{4m}{\pi \rho D^2} \quad (5)$$

Параметри експерименту:

- густина рицинової олії ρ - 950 кг/м³;
- молярна маса рицинової олії μ = 870 г/моль;
- маса краплини m = 2,3 г.

Контрольні завдання

1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.
2. Поняття про сили поверхневого натягу рідин та причини їх виникнення.
3. Сили, що виникають на межі двох середовищ:
 - а) рідина — тверде тіло;
 - б) рідина - рідина.
4. Поверхнево - активні речовини (ПАР) та їх застосування.
5. Теорія методу.

Порядок виконання роботи

1. Посипати поверхню води у кюветі легким шаром дерев'яного порошку,

- Капнути краплю рицинової олії, щоб вона розтеклася і утворила чітку круглу пляму.
- Лінійкою виміряти в декількох напрямках діаметр утвореного круга, знайти середнє значення діаметра.
- Обчислити площу поперечного перерізу молекули S_μ та її висоту h .
- Розрахувати похибки.
- Результати представити у вигляді $S_\mu = \langle S_\mu \rangle \pm \Delta S_\mu$, $h = \langle h \rangle \pm \Delta h$.
- Сформулювати висновки.

Звіт про виконану роботу

1. Робочі формули

Площа поперечного перерізу молекули: $S_\mu = \frac{\pi\mu}{4N_A m} D^2$

Висота молекули: $h = \frac{4m}{\pi\rho} \frac{1}{D^2}$

2. Результати експерименту

Таблиця 1

№ п/п	D, м	$\langle D \rangle$, м	S_μ , м ²	ΔS_μ , м ²	ε_S , %	h, м	Δh , м	ε_h , %

3. Обчислення похибок вимірювання:

Метод № 1

а) абсолютна похибка визначення діаметра круга:

$$\Delta S = t_\alpha \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N ((S) - S_n)^2}{N(N-1)}}, \quad (6)$$

де t_α - коефіцієнт Стюдента.

б) відносна похибка визначення діаметра круга:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{\langle S \rangle} \cdot 100 \%$$

Метод № 2

Обчислення похибок для визначення площі молекули:

а) робоча формула:

$$S_\mu = \frac{\pi\mu}{4N_A m} D^2$$

$$\ln S_\mu = \ln \frac{\pi\mu}{4N_A m} + 2 \ln D$$

$$\frac{dS_\mu}{S_\mu} = 2 \frac{dD}{D}$$

б) відносна похибка визначення площі:

$$\varepsilon_S = 2 \frac{\Delta D}{\langle D \rangle} \cdot 100 \%. \quad (7)$$

в) абсолютна похибка визначення площі:

$$\Delta S_\mu = S_\mu \cdot \varepsilon_S \quad (8)$$

Обчислення похибок для визначення висоти молекулярного шару.

а) робоча формула:

$$h = \frac{4m}{\pi\rho} \frac{1}{D^2}$$

$$\ln h = \ln \frac{4m}{\pi\rho} - 2 \ln D$$

$$\frac{dh}{h} = 2 \frac{dD}{D}$$

б) відносна похибка визначення висоти молекулярного шару:

$$\varepsilon_h = 2 \frac{\Delta D}{\langle D \rangle} \cdot 100 \%. \quad (9)$$

в) абсолютна похибка визначення висоти молекулярного шару:

$$\Delta h = h \cdot \varepsilon_h \quad (10)$$

3. Висновки представити у вигляді:

$$S_M = \langle S_M \rangle \pm \Delta S_M, h = \langle h \rangle \pm \Delta h, D = \langle D \rangle \pm \Delta D$$

Лабораторна робота №3

**Тема: «Визначення коефіцієнта теплопровідності
методом нагрітої стінки»**



Експериментальна установка ФПТ1-3

1- блок приладів; 2 – цифровий термометр; 3 – блок робочого елемента;
4 – вольфрамова дротина; 5 – стояк; 6 – датчик температури (термопара)

Мета роботи: вивчення теплопровідності повітря як одного з явищ переносу в газах.

Теоретичні відомості

Поширення теплоти у газах відбувається трьома способами: тепловим випромінюванням (перенесення енергії електромагнітними хвилями), конвекцією (перенесення енергії за рахунок переміщення шарів газу в просторі з областей з більш високою температурою в області з нижчою температурою) та теплопровідністю.

Теплопровідність - це процес передачі теплоти від більш нагрітого шару газу до менш нагрітого за рахунок хаотичного теплового руху молекул. При теплопровідності відбувається безпосередня передача енергії від молекул, що мають більшу енергію, до тих, що мають меншу. Для стаціонарного процесу, за якого різниця температур у шарі газу не змінюється з часом, кількість теплоти δQ яка переноситься внаслідок теплопровідності за час $d\tau$ через поверхню площею S , перпендикулярну до напрямку переносу енергії, в напрямі зменшення температури, визначається законом Фур'є:

$$\delta Q = -\chi \cdot \frac{dT}{dr} \cdot S \cdot d\tau \quad (1)$$

де χ – коефіцієнт теплопровідності; dT/dr – градієнт температури.

Для ідеального газу

$$\chi = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \langle \lambda \rangle \cdot \langle v_T \rangle \cdot C_V \quad (2)$$

тут ρ - густина газу; $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу молекули; $\langle v_T \rangle$ – середня швидкість теплового руху молекул, $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$; C_V – питома теплоємність газу за сталого об'єму.

Розглянемо два коаксіальних циліндри, простір між якими заповнено газом. Якщо внутрішній циліндр нагрівати, а температуру зовнішнього циліндра підтримувати сталою, нижчою за температуру нагрівника, то в кільцевому шарі газу виникає радіальний потік теплоти, направлений від внутрішнього циліндра до зовнішнього. При цьому температури шарів газу, прилеглих до стінок циліндрів, дорівнює температурі стінок. Виділимо у газі кільцевий шар радіусом r , товщиною dr і довжиною L . За законом Фур'є (1) тепловий потік $q = \delta Q/d\tau$, тобто кількість теплоти, що проходить через цей шар за одну секунду, можна записати у вигляді:

$$q = -\chi \frac{dT}{dr} S = -\chi \frac{dT}{dr} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \quad (3)$$

Розділивши змінні, одержимо:

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} dT.$$

Тоді

$$\int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r} = -\frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} \int_{T_1}^{T_2} dT$$

або

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \chi \cdot L}{q} (T_1 - T_2) \quad (4)$$

тут T_1, R_1 і T_2, R_2 – відповідно температури поверхонь та радіуси внутрішнього і зовнішнього циліндрів.

З рівняння (4) одержуємо формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності газу:

$$\chi = \frac{q \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_2)} \quad (5)$$

Формулу (5) одержано у припущенні, що теплота переноситься від внутрішнього до зовнішнього циліндра тільки завдяки теплопровідності. Це припущення є достатньо обгрунтованим, оскільки потік променистої енергії при невисоких температурах і малому діаметрі нагрівника становить незначну частину кількості теплоти, що переноситься, а конвекція усувається підбором діаметра зовнішнього циліндра та його вертикальним розміщенням в експериментальній установці.

Внутрішнім циліндром може служити тонка дротина (нитка), звичайно вольфрамова, яка нагрівається електричним струмом. Тоді після встановлення стаціонарного режиму тепловий потік можна прийняти таким, що дорівнює потужності електричного струму у дротині

$$q = J_H U_H$$

де J_H – струм через дротину; U_H – спад напруги на дротині.

Якщо послідовно з дротиною підімкнути еталонний резистор опору R_P , то

$$J_H = \frac{U_P}{R_P}$$

і тоді

$$q = \frac{U_P \cdot U_H}{R_P} \quad (6)$$

де U_P – спад напруги на еталонному резисторі.

Використовуючи рівність (6) у формулі (5), одержимо:

$$\chi = \frac{U_P \cdot U_H \cdot \ln \frac{D}{d}}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot R_P \cdot \Delta T} \quad (7)$$

Тут D і d – діаметри зовнішнього циліндра й дротини; $\Delta T = T_H - T_T$ – різниця температур дротини і зовнішнього циліндра (трубки).

Температуру трубки T_T можна взяти такою, що дорівнює температурі навколишнього повітря. Для обчислення різниці температур ΔT шарі газу запишемо формули, що визначають опір дротини при температурі навколишнього повітря і у нагрітому стані:

$$R_{H.0} = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t_0)$$

$$R_H = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot t)$$

де R_0 – опір дротини при $t=0^\circ\text{C}$; α – температурний коефіцієнт опору матеріалу дротини.

Виключивши з цих рівностей R_0 , знайдемо:

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_H - R_{H.0}}{\alpha \cdot R_{H.0}} (1 + \alpha \cdot t_0)$$

Враховуючи, що $R_H = \frac{U_H}{J_H}$, $J_H = \frac{U_P}{R_P}$ і $R_{H.0} = \frac{U_{H.0}}{J_{H.0}}$, $J_{H.0} = \frac{U_{P.0}}{R_P}$, отримаємо:

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_P} - \frac{U_{H.0}}{U_{P.0}}\right) \cdot (1 + \alpha \cdot t_0)}{\frac{U_{H.0}}{U_{P.0}} \alpha} \quad (8)$$

де U_H , $U_{H.0}$ – спад напруги на дротині відповідно у нагрітому стані і при температурі навколишнього повітря t_0 ; U_P , $U_{P.0}$ – спад напруги на еталонному резисторі відповідно при нагріванні дротини і при температурі навколишнього повітря t_0 .

Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта теплопровідності повітря призначена експериментальна установка ФПТ1-3, загальний вигляд якої зображено на титульній сторінці 20.

Робочий елемент установки являє собою скляну трубку, заповнену повітрям, уздовж осі якої натягнута вольфрамова дротина 4. Температура трубки в ході експерименту підтримується сталою завдяки примусовій циркуляції повітря між трубкою і кожухом блоку робочого елемента 3, яка здійснюється за допомогою вентилятора, що знаходиться в блоці робочого елемента. Температура повітря навколо трубки вимірюється датчиком температури і реєструється цифровим контролером для виміру температури. Значення падінь напруги на еталонному резисторі U_P і на дротині U_H вимірюються цифровим контролером для виміру напруги. Значення напруги на дротині встановлюється регулятором "Нагрів", який знаходиться на передній панелі блоку приладів 1. Геометричні розміри робочого елемента - діаметр трубки D , діаметр дротини d , довжина трубки L , температурний коефіцієнт опору матеріалу дротини α — вказані на робочому місці.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером "Мережа". Уключити тумблер "Нагрівання".
2. Натиснути кнопку " U_P " (режим вимірювання спаду напруги на еталонному резисторі) і за допомогою регулятора "Нагрів" встановити спад напруги $U_{P.0}$ не більш 0,06 В, за якого температура дротини залишається практично незмінною ("ненагріваючий" струм).
3. Натиснути кнопку « U_H » (режим вимірювання спаду напруги на дротині) і зареєструвати значення напруги $U_{H.0}$.
4. Повторити виміри за пп. 2-3 для 3 значень напруги $U_{P.0}$. Обчислити середнє значення $U_{P.0}$ і $U_{H.0}$. Усі результати занести в таблицю 1.

Таблиця 1

№ вим.	$U_{P.0}$, мВ	$U_{H.0}$, мВ.	t_0 , °C	U_P , мВ.	U_H , мВ.	ΔT , К	χ Вт/(м·К)	ε , %

5. Натиснути кнопку « U_P » і за допомогою регулятора «Нагрів», встановити спад напруги на еталонному резисторі U_P у діапазоні 0,3...6,5 В.

6. Зачекавши 2 хвилини, що необхідно для стабілізації теплового режиму робочого елемента, натиснути кнопку « U_H » і визначити спадання напруги на дроті U_H .
7. Повторити вимірювання за пп. 5-6 для 3-5 значень спаду напруги U_P . Результати занести в таблицю 1.
8. Встановити ручку регулятора «Нагрів» на мінімум. Відімкнути тумблер «Нагрів», після чого відімкнути установку тумблером «Мережа».

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного вимірювання за формулою (8) розрахувати різницю температур ΔT , а за формулою (7) – коефіцієнт теплопровідності χ і занести одержані значення до таблиці 1.
2. Знайти середнє значення коефіцієнта теплопровідності повітря $\langle \chi \rangle$.
3. Оцініть похибку результатів вимірювань.

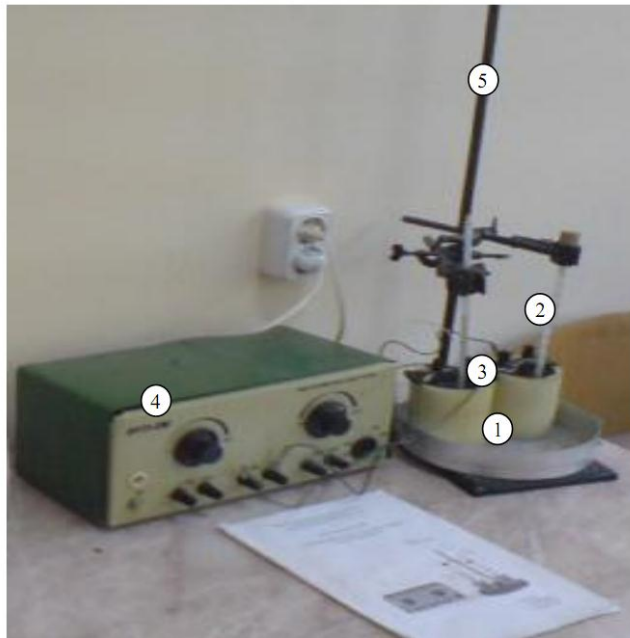
Контрольні завдання

1. Розкажіть про можливі способи передачі теплоти.
2. У чому суть явища теплопровідності? Яка величина переноситься при теплопровідності?
3. Яка величина зветься тепловим потоком? У яких одиницях СІ вона вимірюється?
4. Якою формулою описується потік теплоти, перенесеної при теплопровідності?
5. Який фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності? У яких одиницях СІ вимірюється ця величина?
6. Запишіть формулу для коефіцієнта теплопровідності ідеального газу.
7. Поясніть поняття градієнта температури.
8. У чому полягає метод нагрітої нитки для визначення коефіцієнта теплопровідності газів?
9. Виведіть розрахункову формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності методом нагрітої нитки.
10. Поясніть призначення еталонного резистора у схемі експериментальної установки.
11. Як визначається різниця температур дротини і зовнішньої трубки у даній роботі?
12. Як оцінити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекули газу, використовуючи явище теплопровідності?

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
1	Характеристики металічної нитки: - матеріал - довжина, м - діаметр, м - температурний коефіцієнт опору, κ^{-1} - опір при 20°C	Вольфрам 0,402 64×10^{-5} $4,1 \times 10^{-3}$ $1B \pm 1$
2	Нагрів нитки відносно навколишнього середовища, °C	0...30
3	Внутрішній діаметр трубки робочого елемента, мм	26 ± 1
4	Похибка вимірювання температури повітря, %	5
5	Діапазон регулювання робочого струму, мА	$2 \div 200$
6	Живлення установки від мережі змінного струму: - напруга, В - частота, Гц	220^{+22}_{-33} 50 ± 1
7	Потужність споживання, Вт, не більше	100
8	Габаритні розміри, мм, не більше	430x565x220
	Маса установки, кг, не більше	5

Лабораторна робота №4

**Тема: «Визначення питомої теплоємності рідин
електрокалориметром»**



Експериментальна установка

1 – два калориметри; 2 – два термометри; 3 – дві спіралі; 4 – джерело струму; 5 – штатив; гліцерин, з'єднувальні провідники.

Мета роботи: *практичне ознайомлення з порівняльним способом визначення питомої теплоємності гліцерину калориметричним способом.*

Прилади і матеріали: *два однакових калориметри, гліцерин, два термометри, дві нагрівні спіралі, джерело струму з'єднувальні провідники, штатив.*

Теоретичні відомості

Прилади для вимірювання кількості теплоти називають *калориметрами*. Основною частиною калориметрів є 2 посудини циліндричної форми різного діаметру, вкладені одна в одну (внутрішня - металева, зовнішня - пластмасова) з деяким прошарком повітря що забезпечує мінімальний теплообмін з навколишнім середовищем.

Калориметричною системою називається сукупність тіл, між якими відбувається теплообмін.

Тепловий еквівалент калориметра K - це сукупність теплоти, яка потрібна для зміни температури калориметричної системи на один кельвін:

$$K = m_k c_k \quad (1)$$

Калориметри докомплектуються спіралями, з'єднаними з джерелом струму та калориметричними термометрами. Кількість теплоти, яка утворюється внаслідок проходження струму по спіралях, витрачається на нагрівання двох калориметричних систем.

Для калориметра з водою:

$$Q_1 = (K + c_6 m_6)(t_6^2 - t_6^1) \quad (2)$$

де K - тепловий еквівалент алюмінієвого калориметра

$$K = m_k c_{Al} \quad (3)$$

t_6^2, t_6^1 - кінцева і початкова температури води у калориметрі,

c_6, c_{Al}, m_6, m_k - питомі теплоємності та маси води і калориметра відповідно.

Для калориметра з гліцерином:

$$Q_2 = (K + c_{гл} m_{гл})(t_{гл}^2 - t_{гл}^1) \quad (4)$$

де $t_{гл}^2, t_{гл}^1$ - кінцева і початкова температури гліцерину у калориметрі.

Рівняння теплового балансу:

$$Q_1 = Q_2 \quad (5)$$

$$(K + c_6 m_6)(t_6^2 - t_6^1) = (K + c_{гл} m_{гл})(t_{гл}^2 - t_{гл}^1) \quad (6)$$

Отже питома теплота досліджуваного гліцерину рівна:

$$c_{гл} = \frac{1}{m_{гл}} \left[(K + c_6 m_6) \frac{t_6^2 - t_6^1}{t_{гл}^2 - t_{гл}^1} - K \right] \quad (7)$$

Послідовність виконання роботи

1. Занести в таблицю початкові покази термометрів t_{θ}^1 та $t_{\text{гл}}^1$.
2. а) увімкнути джерело живлення;
б) слідкувати за показами термометрів;
в) після зростання температур на 5-6 °С вимкнути джерело струму;
г) зафіксувати значення температур t_{θ}^2 та $t_{\text{гл}}^2$, і занести їх в таблицю.
3. Обчислити сталу калориметра К за формулою $K = m_k c_{Al}$.
4. Розрахувати за формулою (7) значення $c_{\text{гл}}$.
5. Вивести та обчислити формулу для знаходження відносної похибки ε .

Контрольні завдання

1. Внутрішня енергія рідин. Зміна внутрішньої енергії і кількості теплоти.
2. Молярна і питома теплоємності рідин.
3. Залежність питомої теплоємності рідин від тиску, температури та молекулярної структури.
4. Теорія методу калориметричного визначення теплоємності рідин. Виведення робочої формули.

Звіт за виконану роботу

1. Робочі формули:

$K = m_k c_{Al}$ (3) - стала калориметра;

$$c_{\text{гл}} = \frac{1}{m_{\text{гл}}} \left[(K + c_{\theta} m_{\theta}) \frac{t_{\theta}^2 - t_{\theta}^1}{t_{\text{гл}}^2 - t_{\text{гл}}^1} - K \right] \quad (7) \text{ - питома теплоємність гліцерину.}$$

Табличні величини:

c_{Al} - питома теплоємність алюмінію, $c_{Al} = 8,79 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

c_{θ} - питома теплоємність води, $c_{\theta} = 4,197 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$;

m_k - маса калориметрів, $m_k = 33,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$;

$m_{\text{гл}}$ - маса гліцерину, $m_{\text{гл}} = 0,189 \text{ кг}$.

2. Результати експерименту.

Таблиця 1

№	$t_{\theta}^1, \text{К}$	$t_{\theta}^2, \text{К}$	$t_{\text{гл}}^1, \text{К}$	$t_{\text{гл}}^2, \text{К}$	$c_{\text{гл}}, \text{ Дж/ (кг} \cdot \text{К)}$	$\Delta c_{\text{гл}}$	$\varepsilon, \%$

3. Обчислення похибок вимірювання:

а) середнє значення

$$c_{\text{ГЛ}} = \frac{1}{m_{\text{ЗЛ}}} \left[(K + c_{\text{Б}} m_{\text{Б}}) \frac{t'_{\text{Б}} - t_{\text{Б}}}{t'_{\text{ЗЛ}} - t_{\text{ЗЛ}}} - K \right]; \quad \Delta m = 0.1 \text{ гр.}; \quad \Delta t = 0.5 \text{ гр.}$$

$$\ln c_{\text{ГЛ}} = \ln m_{\text{Б}} + \ln(t'_{\text{Б}} - t_{\text{Б}}) - \ln m_{\text{ЗЛ}} - \ln(t'_{\text{ЗЛ}} - t_{\text{ЗЛ}})$$

$$\frac{dc_{\text{ГЛ}}}{c_{\text{ГЛ}}} = \frac{dm_{\text{Б}}}{m_{\text{Б}}} - \frac{dm_{\text{ЗЛ}}}{m_{\text{ЗЛ}}} + \frac{d(t'_{\text{Б}} - t_{\text{Б}})}{(t'_{\text{Б}} - t_{\text{Б}})} - \frac{d(t'_{\text{ЗЛ}} - t_{\text{ЗЛ}})}{(t'_{\text{ЗЛ}} - t_{\text{ЗЛ}})}$$

б) відносна похибка вимірювання:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta m_{\text{Б}}}{m_{\text{Б}}} + \frac{\Delta m_{\text{ЗЛ}}}{m_{\text{ЗЛ}}} + \frac{\Delta t'_{\text{Б}} + \Delta t_{\text{Б}}}{t'_{\text{Б}} - t_{\text{Б}}} + \frac{\Delta t'_{\text{ЗЛ}} + \Delta t_{\text{ЗЛ}}}{t'_{\text{ЗЛ}} - t_{\text{ЗЛ}}} \right) \cdot 100 \%$$

в) абсолютна похибка вимірювання

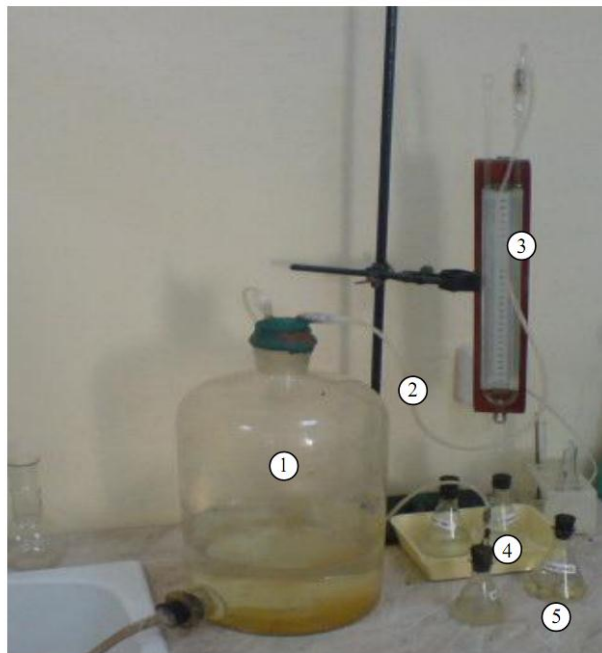
$$\Delta c_{\text{ГЛ}} = \varepsilon c_{\text{ЗЛ сер}}$$

4. Висновки записати у такому вигляді:

$$c_{\text{ЗЛ}} = c_{\text{ЗЛ сер}} \pm \Delta c_{\text{ЗЛ}}.$$

Лабораторна робота №5

Тема: «Визначення коефіцієнта поверхневого
натягу рідин методом Ребіндера»



Експериментальна установка:

1 – аспіратор; 2 – гумові трубки; 3 – манометр; 4 – капіляр; 5 – чотири колби (з водою, гліцерином, 60% та 80% розчином спирту); штатив; затискач для гумової трубки.

Мета роботи: ознайомитись з одним із способів визначення коефіцієнта поверхневого натягу гліцерину та встановити залежність коефіцієнта поверхневого натягу розчину спирту різної концентрації.

Прилади і матеріали: аспіратор, гумові трубки, манометр, капіляр, 4 колби (з водою, гліцерином, 60% та 80% розчином спирту), термометр, лоток, штатив, лінійка, затискач для гумової трубки.

Теоретичні відомості

Коли з аспілятора повільно витікає вода, то тиск у його верхній частині і в правому коліні манометра зменшується. При цьому через капіляр у колбу з рідиною потрапляє бульбашка повітря. Різниця тисків атмосферного повітря і повітря в колбі вимірюється різницею висот рівнів рідини в колінах манометра h , мм.вод.ст. З іншого боку, бульбашка відчуває тиск, створений силами поверхневого натягу рідини, які намагаються її стиснути.

Отже, коефіцієнт поверхневого натягу рідини σ в момент відриву бульбашки рівний:

$$\sigma = A \cdot h \quad (1)$$

де h - різниця висот рідини в колінах манометра, A — стала приладу, яка залежить від розмірів капілярного наконечника.

Для визначення сталої приладу A , проводять дослід з рідиною, коефіцієнт поверхневого натягу якої відомий (із водою). З формули (1):

$$A = \frac{\sigma_в}{h_в} \quad (2)$$

Знаючи сталу приладу A , можна визначити коефіцієнт поверхневого натягу σ будь-якої рідини

$$\sigma = \frac{\sigma_в}{h_в} h = A \cdot h \quad (3)$$

де h - висота досліджуваної рідини.

Послідовність виконання роботи

1. Наповнити аспіратор водою на $2/3$ його об'єму. Трубку з капілярним наконечником затиснути в колбу з водою так, щоб кінчик капіляра ледь дотикався до поверхні води.
2. Послаблюючи затискач гумової трубки з лінійкою, забезпечити повільний витік води з капіляра.
3. Слідкувати за появою бульбашок на кінці капіляра. При їх появі зафіксувати покази манометра h , мм.вод.ст.
4. За спеціальною таблицею (див. додаток) знайти коефіцієнт поверхневого натягу води $\sigma_в$ при кімнатній температурі t_k , °C.
5. Знайти сталу даного приладу за формулою (2). Поміняти колбу з водою на колбу з гліцерином.
6. Повторити пункти 2 і 3. Зафіксувати різницю показів манометра $h_{г\lambda}$ визначити за формулою:

$$\sigma_{г\lambda} = A \cdot h_{г\lambda}$$

7. Аналогічно провести дослід для інших досліджуваних речовин.

8. Обчислити коефіцієнт поверхневого натягу гліцерину:

$$\sigma_{\text{гл}} = A \cdot h_{\text{гл}}$$

9. Обчислити коефіцієнт поверхневого натягу 80-ти % розчину спирту:

$$\sigma_{80\%} = A \cdot h_{80\%}$$

10. Обчислити коефіцієнт поверхневого натягу 60-ти % розчину спирту:

$$\sigma_{60\%} = A \cdot h_{60\%}$$

Контрольні завдання

1. Явища на межі рідини з іншими тілами. Коефіцієнт поверхневого натягу.
2. Сили поверхневого натягу. Досліди з мильними плівками.
3. Залежність сили поверхневого натягу від температури рідини.
4. Теорія методу Ребіндера.

Звіт за виконану роботу

1. Робочі формули:

$A = \frac{\sigma_{\text{г}}}{h_{\text{г}}}$ (5.2) – стала приладу, $[A]$ -Н/м.

$$\sigma_{\text{гл}} = A \cdot h_{\text{гл}} ,$$

$$\sigma_{80\%} = A \cdot h_{80\%}$$

$$\sigma_{60\%} = A \cdot h_{60\%}$$

2. Результати експерименту.

Таблиця 1. Визначення сталої приладу.

№ п/п	$\sigma_{\text{г}} \cdot 10^{-3}, \text{Н/м}$	$h_{\text{г}}, \text{м}$	$A, \text{Н/м}$
1	$72.5 \cdot 10^{-3}$		

Таблиця 2. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу гліцерину.

№ п/п	$h_{\text{гл}}, \text{м}$	$\sigma_{\text{гл}} \cdot 10^{-3}, \text{Н/м}$	$\Delta\sigma_{\text{гл}}$	$\varepsilon, \%$

Таблиця 3. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу 80-ти % розчину спирту.

№ п/п	$h_{80\%}, \text{м}$	$\sigma_{80\%} \cdot 10^{-3}, \text{Н/м}$	$\Delta\sigma_{80\%}$	$\varepsilon, \%$

Таблиця 4. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу 60-ти % розчину спирту

$N^{\circ} n/n$	$h_{60\%}$,м	$\sigma_{60\%} \cdot 10^{-3}, Н/м$	$\Delta\sigma_{60\%}$	ε , %

3. Обчислення похибок

$$1) \quad \sigma_{2л} = A \cdot h_{2л}$$

$$\ln(\sigma_{2л}) = \ln(h_{2л}) - \ln(h_6)$$

$$\frac{d\sigma_{2л}}{\sigma_{2л}} = \frac{dh_{2л}}{h_{2л}} - \frac{dh_6}{h_6}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{2л}}{\sigma_{2л}} = \frac{\Delta h_{2л}}{h_{2л}} - \frac{\Delta h_6}{h_6}$$

$$2) \quad \varepsilon = \left(\frac{\Delta h_{2л}}{h_{2л}} + \frac{\Delta h_6}{h_6} \right) \cdot 100 \%$$

$$\Delta\sigma_{2л} = \Delta h_6 = 1 \text{ мм. рт. ст}$$

$$3) \quad \Delta\sigma_{2л} = \varepsilon \cdot \sigma_{сер.}$$

4. Висновки записати в такому вигляді.

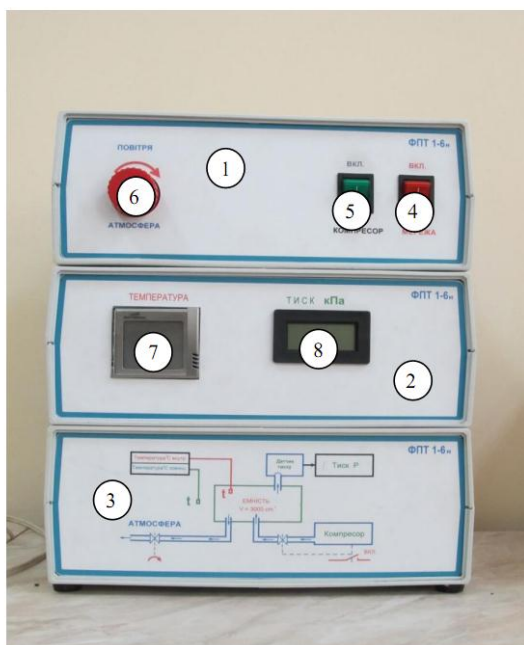
$$\sigma_{2л} = \sigma_{2л.сер.} \pm \Delta\sigma_{2л}$$

$$\sigma_{80\%} = \sigma_{80\%.сер.} \pm \Delta\sigma_{80\%}$$

$$\sigma_{60\%} = \sigma_{60\%.сер.} \pm \Delta\sigma_{60\%}$$

Лабораторна робота №6

**Тема: «Визначення відношення теплоємностей
повітря при сталих тиску і об'єму»**



Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-6

1 – панель управління; 2 – панель приладів; 3 – інформаційна панель;
4 – вмикач мережі; 5 – вмикач компресора; 6 – клапан з'єднання із
атмосферою; 7 – вимірювачі температури; 8 – вимірювачі тиску.

Мета роботи: вивчення процесів в ідеальних газах, визначення відношення теплоємностей $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

Прилади і матеріали: установка ФПТ І-6.

Теоретичні відомості

Питома теплоємністю речовини називається величина, що дорівнює кількості теплоти, яку потрібно надати одиниці маси речовини для підвищення її температури на один Кельвін:

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

Теплоємність одного моля речовини зветься молярною теплоємністю:

$$\mu C = \frac{\delta Q}{\frac{m}{\mu} dT}. \quad (2)$$

де m - маса, μ – молярна маса речовини.

Значення теплоємності газів залежить від умов, за яких відбувається їх нагрівання. Згідно з першим законом термодинаміки кількість теплоти δQ , надана системі, витрачається на збільшення внутрішньої енергії dU і на виконання системою роботи δA проти зовнішніх сил:

$$\delta Q = dU + \delta A \quad (3)$$

Приріст внутрішньої енергії ідеального газу в разі зміни його температури на dT :

$$dU = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{i}{2} \cdot R \cdot dT \quad (4)$$

тут i - число ступенів вільності молекули, під яким розуміється число незалежних координат, що визначають положення молекули у просторі: $i = 3$ -для одноатомної; $i = 5$ - для двоатомної; $i = 6$ - для три- та багатоатомної, R - універсальна газова стала; $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

При розширенні газу система виконує роботу

$$\delta A = P \cdot dV \quad (5)$$

Якщо газ нагрівається при сталому об'ємі $V = \text{const}$, то $\delta A = 0$ і згідно з (3) вся одержана газом кількість теплоти витрачається тільки на збільшення його внутрішньої енергії $\delta Q_V = dU$ і, отже враховуючи (4), молярна теплоємність ідеального газу за сталого об'єму

$$\mu C_V = \frac{dU}{dT} = \frac{i}{2} \cdot R \quad (6)$$

Якщо газ нагрівається за сталого тиску $P = \text{const}$, то одержана газом кількість теплоти витрачається на збільшення внутрішньої енергії dU та виконання роботи δA :

$$\delta Q_P = dU + P \cdot dV$$

Тоді молярна теплоємність ідеального газу за сталого тиску

$$\mu C_p = \frac{dU}{dT} + P \cdot \left(\frac{dV}{dT} \right)_p \quad (7)$$

Використовуючи рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона-Менделєєва)

$$PV = \frac{m}{\mu} \cdot RT$$

можна довести, що для моля газу

$$P \cdot \left(\frac{dV}{dT} \right)_p = R$$

і, отже

$$\mu C_p = \mu C_v + R = \frac{i + 2}{2} \cdot R \quad (8)$$

Відношення теплоємностей:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i + 2}{i} \quad (9)$$

Адіабатичним зветься процес, який відбувається без теплообміну із зовнішнім середовищем, $\delta Q = 0$. Практично він може бути здійснений у системі, оточеній теплоізолюючою оболонкою, але оскільки для теплообміну потрібен деякий час, то адіабатичним можна вважати також процес, який відбувається так швидко, що система не встигає вступити у теплообмін із навколишнім середовищем. Перший закон термодинаміки з урахуванням (4)-(6) для адіабатичного процесу має вигляд

$$\frac{m}{\mu} \cdot \mu \cdot C_v \cdot dT = -PdV \quad (10)$$

Продиференціювавши рівняння Клапейрона-Менделєєва

$$PdV - VdP = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot dT$$

і підставивши dT до формули (10), одержимо

$$(\mu C_v + R)PdV + \mu C_v VdP = 0$$

Враховуючи співвідношення між молярними теплоємностями ідеального газу за сталих тиску та об'ємі, яке описується формулою Майєра (8), а також (9), дістанемо:

$$\gamma \frac{dV}{V} + \frac{dP}{P} = 0$$

Розв'язок записаного диференційного рівняння має вигляд

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

Рівняння (11) називається *рівнянням адіабати (рівнянням Пуассона)*, а введена у (9) величина γ - показником адіабати.

Метод визначення показника адіабати, запропонований Клеманом і Дезормом (1819 р.), ґрунтується на вивченні параметрів деякої маси газу, яка переходить з одного стану в інший двома послідовними процесами - адіабатичним та ізохоричним. Ці процеси на діаграмі P - V (рис. 1) зображені кривими відповідно 1-2 і 2-3. Якщо у балон, з'єднаний з відкритим водяним манометром, накачати повітря і зачекати до встановлення теплової рівноваги з навколишнім середовищем, то в цьому початковому стані 1 газ має параметри P_1 V_1 T_1 , причому температура газу в балоні дорівнює

температурі навколишнього середовища $T_1=T_0$, а тиск $P_1=P_0+P'$ трохи більший від атмосферного. Якщо тепер на короткий час з'єднати балон з атмосферою, то станеться адіабатичне розширення повітря. При цьому повітря в балоні перейде у стан 2, його тиск знизиться до атмосферного $P_2 = P_0$. Маса повітря, що залишилося у балоні, яка в стані 1 займала частину об'єму балона, розширюючись, займе весь об'єм V_2 . При цьому температура повітря, що залишилось у балоні, знизиться до T_2 . Оскільки процес 1-2 є адіабатичний, до нього можна застосувати рівняння Пуассона (11):

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \text{ або } \frac{T_1^\gamma}{P_1^{\gamma-1}} = \frac{T_2^\gamma}{P_2^{\gamma-1}}$$

Звідси

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{T_0}{T_2}\right)^\gamma \quad (12)$$

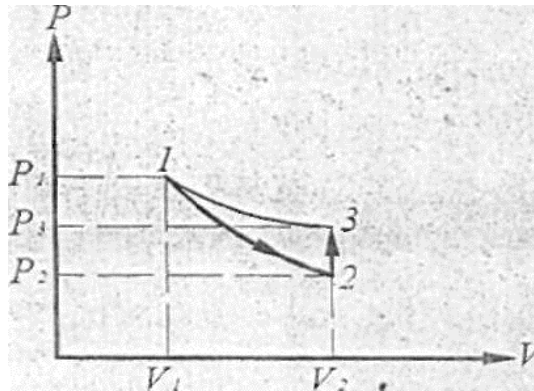


Рисунок 1. Процеси зміни стану газу під час проведення дослідів

Після короткочасного з'єднання балона з атмосферою охолоджене адіабатичним розширенням повітря в балоні буде нагріватись (процес 2-3) до температури навколишнього середовища $T_3=T_0$ за сталого об'єму $V_3=V_2$. При цьому тиск у балоні підвищиться до $P_3=P_2+P$. Оскільки процес 2-3 є ізохоричним, для нього можна застосувати закон Шарля:

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$$

Звідси

$$\frac{P_0 + P''}{P_0} = \frac{T_0}{T_2} \quad (13)$$

З рівнянь (12) та (13) дістанемо:

$$\left(\frac{P_0 + P'}{P_0}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{P_0 + P''}{P_0}\right)^\gamma$$

Прологарифмуємо:

$$(\gamma - 1) \ln \left(1 + \frac{P'}{P_0}\right) = \gamma \ln \left(1 + \frac{P''}{P_0}\right)$$

Оскільки надлишкові тиски P' та P'' дуже малі порівняно з атмосферним тиском P_0 , враховуючи те, що коли $x \ll 1$, то $\ln(1 + x) \approx x$, матимемо:

$$(\gamma - 1)P' = \gamma P'',$$

Звідки

$$\gamma = \frac{P'}{P' - P''} \quad (14)$$

Надлишкові тиски повітря P' і P'' вимірюють за допомогою U - подібного манометра за різницею рівнів рідини з густиною ρ :

$$P' = \rho g H; \quad P'' = \rho g h \quad (15)$$

З (14) і (15) дістанемо розрахункову формулу для визначення γ :

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

Експериментальна установка.

Для визначення відношення теплоємностей повітря $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ призначена експериментальна установка ФПТ1-6. загальний вигляд якої показаний на титульній сторінці 34.

Установка складається зі скляної колби ємністю 3 літри, з'єднаної з мікрокомпресором, розміщеним в блоці приладів 2. Мікрокомпресор включається перемикачем "Мікрокомпресор", встановленим на передній панелі установки 4. Пневмотумблер "Атмосфера" 6, дозволяє при повороті його за годинниковою стрілкою до клацання, швидко з'єднати колбу з атмосферою. Тиск у колбі вимірюється диференціальним датчиком тиску типу MPX5010dp. В установці передбачено також контроль, температури як всередині колби, так і ззовні.

Порядок виконання роботи

1. Включити установку вимикачем "Мережа".
2. Для подачі повітря в колбу включити перемикач "Мікрокомпресор";
3. За допомогою вимірювального приладу «Тиск» контролюють тиск у колбі. Коли тиск у колбі досягне P_1 кПа, відключити подачу повітря.
4. Зачекати 2 ... 3 хв., поки температура повітря в колбі зрівняється з температурою навколишнього повітря T_0 , в колбі при цьому встановиться постійний тиск P_1 . Зняти покази вимірювача тиску усталеного в колбі, а отримане значення занести в таблицю 1.
5. На короткий час з'єднати колбу з атмосферою, повернувши пневмотумблер "Атмосфера" за годинниковою стрілкою до клацання.
6. Через 2-3 хв., коли в колбі встановиться постійний тиск P_2 , зняти покази вимірювача тиску P_2 усталеного в колбі і отримане значення занести в таблицю 1.
7. Повторити вимірювання за п. 2-6 не менше 10 разів при різних значеннях величини.
8. Вимкнути установку вимикачем «Мережа».

Обробка результатів вимірювання

1. Для кожного вимірювання визначити за формулою (16) відношення теплоємностей γ . Знайти середнє значення $\langle \gamma \rangle$.
2. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні завдання

1. Що таке ізопроцеси і яким законам вони підкоряються? Намалюйте графіки цих процесів.
2. Сформулюйте перший закон термодинаміки. Запишіть цей закон для ізобарного, ізохорного, ізотермічного й адіабатичного процесів.
3. Дайте визначення питомої та молярної теплоємностей. В яких одиницях СІ вони вимірюються?
4. У чому особливості теплоємності газу? Виведіть формулу для молярних теплоємностей μC_V і μC_P ідеального газу.
5. Дайте визначення числа ступенів вільності молекули. Чому дорівнює величина і для 1-, 2-, 3- і багатоатомних ідеальних газів?
6. Який процес називається адіабатичним?. Виведіть рівняння Пуасона.
7. Розрахуйте теоретичне значення показника адіабати для 1-,2- і 3-атомного ідеальних газів.
8. У чому полягає метод Клемана та Дезорма для визначення відношення $\frac{C_P}{C_V}$?
9. Опишіть робочий цикл експериментальної установки за P-V діаграмою.
10. Виведіть робочу формулу для визначення γ .

Звіт про виконану роботу

1. Робоча формула

Відношення теплоємностей:

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

2. Результати експерименту

Таблиця 1

№ n/n	H, Па	h, Па	γ	$\langle \gamma \rangle$	$\Delta \gamma$	$\varepsilon, \%$

3. Обчислення похибок

Метод № 1

а) абсолютна похибка визначення діаметра круга:

$$\Delta \gamma = t_{\alpha} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\langle \gamma \rangle - \gamma_n)^2}{N(N-1)}},$$

де t_{α} - відповідний коефіцієнт Стюдента.

б) відносна похибка визначення діаметра круга:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\gamma}{\langle\gamma\rangle} \cdot 100 \%$$

Метод № 2

а) Визначення відносної похибки визначення коефіцієнта теплопровідності:

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

$$\ln \gamma = \ln H - \ln(H - h)$$

$$\frac{d\gamma}{\gamma} = \frac{dH}{H} - \frac{dH}{H - h} + \frac{dh}{H - h}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta H}{H} + 2 \frac{\Delta H}{H - h} \right) \cdot 100 \%$$

б) Абсолютна похибка

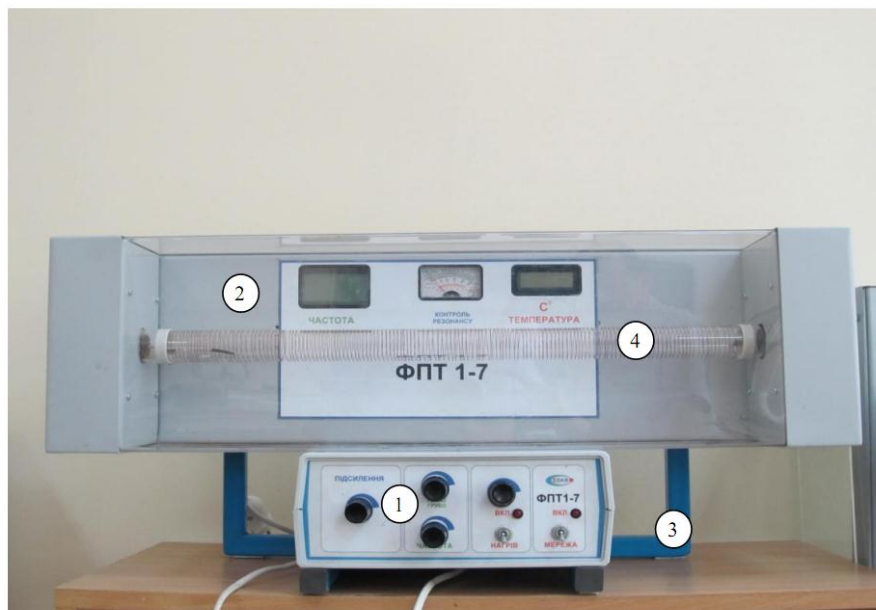
$$\Delta\gamma = \varepsilon \cdot \gamma$$

4. Висновки записати в такому вигляді : $\gamma = \langle\gamma\rangle \pm \Delta\gamma$

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
1	Максимальний тиск в установці ФПТ1-6н. Па. не більше	10000
2	Час набору робочого тиску, с	20
3	Похибка визначення відношення теплоємностей повітря при сталому тиску сталому об'ємі, %, не більше	10
4	живлення установки ФПТ1-6н від мережі змінного струму: - напругою, В - частотою, Гц	220_{-33}^{+22} 50 ± 1
5	Споживана потужність. Вт, не більше	20
6	Установка допускає безперервну роботу протягом, год.	6
7	Габаритні розміри, мм	$290 \times 220 \times 335$
8	Маса установки, кг, не більше	5

Лабораторна робота №7

**Тема: «Визначення відношення теплоємностей
повітря за сталих тиску й об'єму резонансним
методом»**



Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-7

1 – блок приладів; 2 – блок робочого елемента; 3 – стояк; 4 – труба з нагрівником.

Мета роботи: вивчення процесу поширення звукової хвилі, вимірювання швидкості звуку у повітрі за різних температур та визначення відношення теплоємностей $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

Теоретичні відомості

Пружними хвилями звуться механічні збурення, які поширюються у пружному середовищі. Нехай вздовж однорідного циліндричного зразка з площею поперечного перерізу S поширюється пружна поздовжня хвиля. Отже, зразком із швидкістю v поширюється відносна деформація $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ (рис.7.1). Виділивши деяку частину зразка, знайдемо густину недеформованого середовища:

$$\rho = \frac{m}{Sl} \quad (1)$$

де l – довжина виділеної частини зразка.

Стиску відповідає збільшення густини, отже, густина в області стиску

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m}{S \cdot (l - \Delta l)} \quad (2)$$

Тут ми врахували, що площа поперечного перерізу S зразка не змінюється при поширенні поздовжньої хвилі. У формулі (2) домножимо чисельник і знаменник на величину $(l + \Delta l)$;

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m(l + \Delta l)}{S \cdot (l^2 - \Delta l^2)}.$$

Враховуючи, що $\Delta l^2 \ll l^2$, дістанемо

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m(l + \Delta l)}{S \cdot (l^2 - \Delta l^2)}.$$

Звідси враховуючи формулу (1), маємо:

$$\rho + \Delta\rho = \rho + \rho \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

або

$$\Delta\rho = \rho\varepsilon. \quad (3)$$

Поширення збурення являє собою рух області стиску із швидкістю v вздовж зразка. За проміжок часу dt через поперечний переріз пройде ділянка стиску довжиною $dx = vdt$. Маса цієї ділянки $dm = \Delta\rho \cdot S \cdot dx$, або, враховуючи (3) $dm = \rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v \cdot dt$. Маса dm рухається зі швидкістю v і має імпульс $v \cdot dm = \rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt$

Ця зміна імпульсу маси dm (оскільки до проходження збурювання ця маса перебувала у спокої) за другим законом Ньютона дорівнює добуткові діючої на неї сили пружності і часу її дії. Записуючи силу пружності за законом Гука

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \quad (4)$$

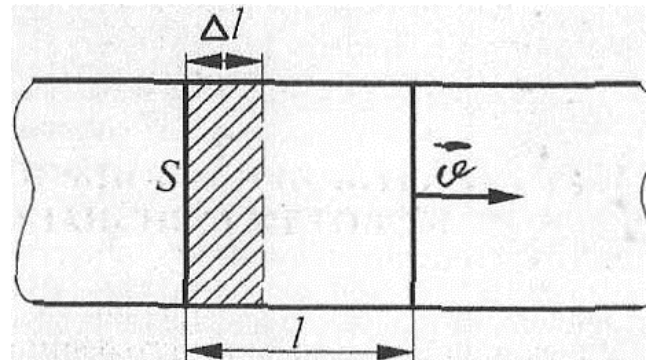


Рисунок 7.1 Схема поширення збурення вздовж однорідного зразка

дістанемо

$$F \cdot dt = E \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dt$$

де E – модуль пружності.

Отже

$$\rho \cdot \varepsilon \cdot S \cdot v^2 \cdot dt = E \cdot \varepsilon \cdot S \cdot dt$$

звідки

$$v^2 = \frac{E}{\rho}$$

і швидкість поширення пружної хвилі

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5)$$

Якщо пружна хвиля поширюється у газі, який міститься у гладенькій прямолінійній трубці зі сталим поперечним перерізом, то, враховуючи, що на відміну від твердих тіл, гази не чинять опору зсуву, в них можуть виникати тільки поздовжні хвилі, і, отже, швидкість поширення пружної хвилі в газі може обчислюватись за формулою (5). Визначимо величину E для газу. Якщо за дії сили F на деякий об'єм газу тиск у ньому одержить приріст ΔP по відношенню до тиску газу P в незбуреному стані, то за аналогією з (4)

$$\Delta P = E \cdot \frac{\Delta V}{V}$$

Вважаючи зміни тиску dP і об'єму dV нескінченно малим, можна записати

$$E = - \frac{dP}{\frac{dV}{V}} \quad (6)$$

де знак мінус означає, що збільшення тиску відповідає зменшенню об'єму.

Нехай у газі поширюється звукова хвиля, яка являє собою пружну хвилю малої інтенсивності, здатну викликати відчуття звуку, з частотою від 16 до 20000 Гц. Коливання густини у звуковій хвилі відбуваються так швидко, що теплообмін між шарами газу, які мають різні температури, не встигає відбутися. Тому процес поширення звукової хвилі в газі можна вважати адіабатичним і до нього можна застосувати рівняння Пуасона. Диференціюючи це рівняння, одержуємо:

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

Звідси

$$\frac{dP}{\frac{dV}{V}} = - \gamma \cdot P. \quad (7)$$

З (6) і (7) знайдемо

$$E = \gamma \cdot P. \quad (8)$$

Визначивши P з рівняння Клапейрона-Менделєєва і враховуючи, що густина газу $\rho = \frac{m}{V}$, дістанемо

$$P = \frac{\rho \cdot R \cdot T}{\mu}$$

Підставимо значення P у (8), і тоді

$$E = \gamma \cdot \rho \cdot \frac{R \cdot T}{\mu} \quad (9)$$

Підставивши співвідношення (9) у формулу (5), матимемо формулу Лапласа для розрахунку швидкості звуку в газі:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{\mu}} \quad (10)$$

з якої випливає

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V} = \frac{v^2 \cdot \mu}{R \cdot T} \quad (11)$$

Таким чином, для визначення відношення теплоємностей газу γ достатньо виміряти його температуру T та швидкість поширення звуку v у цьому газі.

Швидкість звуку за даної температури може бути визначена резонансним методом. Під час поширення хвилі вздовж закритого каналу, вона багаторазово відбивається від торців, і звукові коливання в каналі є результатом накладення цих відбитих хвиль. Якщо довжина каналу L дорівнює цілому числу півхвиль $L = \frac{n \cdot \lambda}{2}$ (n - будь-яке ціле число, λ - довжина хвилі), то хвиля, відбита від торця каналу, повернувшись до його початку і знову відбиваючись, збігається по фазі з прямою хвилею. Такі хвилі підсилюють одна одну, амплітуда коливань при цьому різко зростає – настає резонанс. Під час звукових коливань шари газу, прилеглі до торців каналу, не зазнають зміщення. У цих місцях утворюються вузли зміщення, які повторюються через $\lambda/2$ по всій довжині каналу. Між вузлами знаходяться максимуми зміщення (пучності). Швидкість звуку v зв'язана з частотою коливань ν і довжиною хвилі λ співвідношенням $v = \lambda \nu$, з урахуванням якого умову резонансу можна записати у вигляді

$$2 \cdot L \cdot \nu_0 = n \cdot v \quad (12)$$

де ν_0 – резонансна частота.

Залежність (12) резонансної частоти від номера резонансу n може бути перевірена експериментально. Змінюючи частоту коливань за сталої довжини каналу, необхідно побудувати графік залежності $\nu_0 = f(n)$, за кутовим коефіцієнтом якого $K_\alpha = \frac{v}{2 \cdot L}$ визначається швидкість звуку.

Експериментальна установка

Для визначення відношення теплоємностей повітря $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ резонансним методом існує експериментальна установка ФПТ1-7, загальний вигляд якої показано на титульній сторінці 41.

Робочий елемент установки являє собою скляну трубу довжиною L , на торцях якої розміщені телефон та мікрофон. Температуру повітря у трубі можна змінювати за допомогою нагрівальної спіралі, навитої на трубу. Потужність нагрівника установлюється регулятором "Нагрів", який знаходиться на передній панелі блоку приладів 1. Температура повітря у трубі вимірюється напівпровідниковим термометром і реєструється на цифровому індикаторі "Температура". У блоці приладів розташований генератор звукових коливань, підімкнений до телефона, який збуджує звукові коливання в трубі. Частота коливань, які задаються звуковим генератором, регулюється ручками "Грубо" і "Точно" і реєструється на цифровому індикаторі "Частота". Сигнал від мікрофона вимірюється міліамперметром - "індикатором резонансу", чутливість

якого регулюється ручкою "Посилення". Максимальні значення струму, зареєстровані міліамперметром під час плавної зміни частоти коливань, відповідають появі резонансу на каналі. Довжину труби L вказано на робочому місці.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером "Мережа".
2. Ручки "Грубо" і "Точно" встановити у крайнє ліве положення. Ручкою "Посилення" відрегулювати чутливість "індикатора резонансу" (стрілка повинна бути приблизно на третині шкали).
3. Плавнo збільшуючи за допомогою ручок "Грубо" і "Точно" частоту коливань, які задаються звуковим генератором визначити частоту 1-го резонансу по найбільшому відхиленню стрілки на шкалі "індикатора резонансу". Результат вимірювання занести до таблиці 1.
4. Плавнo збільшуючи частоту коливань за допомогою ручок "Грубо" і "Точно" і вибираючи потрібну чутливість системи індикації резонансу рукояткою "Посилення", визначити частоту 2...6 резонансів. Роблячи виміри при зменшенні частоти, переконатися у повторюваності результатів. Результати вимірювань занести до таблиці 1.

Таблиця 1

№ резонансу	$t_1 = ^\circ\text{C}$			$t_2 = ^\circ\text{C}$			$t_3 = ^\circ\text{C}$			$\varepsilon\%$
	$\nu, \Gamma\text{ц}$	$\nu, \text{м/с}$	γ	$\nu, \Gamma\text{ц}$	$\nu, \text{м/с}$	γ	$\nu, \Gamma\text{ц}$	$\nu, \text{м/с}$	γ	

5. Температура t_1 рівна кімнатній.
6. Увімкнути тумблер "Нагрів" і регулятором температури нагріву досягти температури повітря в трубі $t_2 = 40 \dots 45 ^\circ\text{C}$. Після стабілізації температури повторити виміри за пп. 2-4.
7. Збільшуючи нагрів, досягти температури повітря в трубі $t_3 = 55 \dots 60 ^\circ\text{C}$. Після стабілізації температури повторити виміри по пп. 2-4.
8. Регулятор температури нагріву вивести в крайнє ліве положення, вимкнути тумблер "Нагрів", ручки "Посилення", "Грубо" і "Точно" установити в крайнє ліве положення, після чого вимкнути установку тумблером "Мережа".

Обробка результатів вимірювань

1. Побудувати графіки залежності резонансної частоти від номера резонансу $\nu_0=f(n)$, для кожної з температур та визначити кутові коефіцієнти K_α для кожного графіка.
2. Для кожного значення температури повітря в трубі, використовуючи знайдені кутові коефіцієнти K_α , визначити швидкість звуку ν за формулою $\nu = 2 \cdot L \cdot K_\alpha$ та відношення теплоємностей за формулою (11), враховуючи, що молярна маса повітря $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.
3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні завдання

1. Що таке пружна хвиля? Охарактеризуйте процес поширення пружної хвилі в газі.
2. Виведіть формулу швидкості поширення пружної хвилі.
3. Сформулюйте І закон термодинаміки. Запишіть цей закон для ізобаричного, ізохоричного, ізотермічного та адіабатичного процесів.
4. Виведіть формулу Майера.
5. Виведіть рівняння Пуасона.
6. Що таке адіабатичний процес? Чому процес поширення звукової хвилі в газі є адіабатичний?
7. Що таке звукова хвиля? Виведіть формулу швидкості звуку в газі.
8. У чому полягає резонансний метод визначення швидкості звуку в газі?
9. Чому при поширенні звуку в закритому каналі можуть утворюватись вузли та скупченості? За якої умови вони утворюються?
10. Як змінюється швидкість звуку в повітрі зі зміною його температури?

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
1	Відстань між відбиваючими торцями, м	0,51
2	Діапазон заданих частот, Гц	від 360 до 2800
3	Похибка вимірювання частот, % не більше	2
4	живлення установки від мережі змінного струму: - напругою, В - частотою, Гц	220^{+22}_{-33} 50 ± 1
5	Споживана потужність, Вт, не більше	100
6	Діапазон вимірювання температури повітря в робочому елементі, °C	від 20 до 70
7	Габаритні розміри, мм	640 × 310 × 290
8	Маса установки, кг,	7
9	Похибка вимірювання температури, %	5

Лабораторна робота №8

Тема: «Визначення теплоємності твердих тіл»



Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-8

1 – блок приладів; 2 – блок робочого елемента; 3 – стояк; 4 – нагрівник;
5 – досліджувані зразки.

Мета роботи: визначення теплоємності зразків металів калориметричним методом з використанням електричного нагрівання.

Теоретичні відомості

З теорії ідеального газу відомо, що середня кінетична енергія одноатомних молекул (ізолюваних часток)

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T$$

де k – стала Больцмана.

Тоді середнє значення повної енергії частинки за коливального руху у кристалічній ґратці

$$\langle U_0 \rangle = 3 \cdot k \cdot T$$

Повну внутрішню енергію U одного моля твердого тіла одержимо домноживши середню енергію однієї частинки на число частинок, що незалежно коливаються, які містяться в одному молі, тобто на сталу Авогадро N_A :

$$U = \langle U_0 \rangle \cdot N_A = 3 \cdot N_A \cdot k \cdot T = 3 \cdot R \cdot T \quad (1)$$

де R - універсальна газова стала, $R = 8,31$ Дж/(моль·К).

Для твердих тіл, внаслідок малої величини коефіцієнта теплового розширення, теплоємності за сталих тиску та об'єму практично не відрізняються одна від одної. Тому, враховуючи (1), молярна теплоємність твердого тіла:

$$\mu \cdot C = \mu \cdot C_V = \frac{dU}{dT} = 3R \quad (2)$$

Підставивши чисельне значення універсальної газової сталої, одержимо:

$$\mu \cdot C = 25 \text{ Дж/(моль·К)}.$$

Ця рівність, що зветься законом Дюлонга і Пті, виконується досить точно для багатьох речовин за кімнатної температури. Однак із зниженням температури теплоємності всіх твердих тіл зменшуються, наближаючись до нуля за $T \rightarrow 0$. Біля абсолютного нуля молярна теплоємність усіх тіл пропорційна T^3 і тільки за досить високої, характерної для кожної речовини температурі починає виконуватися рівність (2). Ці особливості теплоємностей твердих тіл за низьких температур можна пояснити за допомогою квантової теорії теплоємності, створеної Ейнштейном та Дебаєм.

Для експериментального визначення теплоємності досліджуване тіло вміщується в калориметр, який нагрівається електричним струмом. Якщо температуру калориметра з досліджуваним зразком дуже повільно збільшувати від початкової T_0 на ΔT то енергія електричного струму піде на нагрівання зразка і калориметра:

$$J \cdot U \cdot \tau = m_0 \cdot c_0 \cdot \Delta T + m \cdot c \cdot \Delta T + \Delta Q \quad (3)$$

де J і U - струм і напруга нагрівача; τ - час нагрівання; m_0 і m – маси калориметра і досліджуваного зразка, c_0 і c – питомі теплоємності калориметра і досліджуваного зразка, ΔQ – витрати теплоти в теплоізоляцію калориметра та в навколишній простір.

Для виключення з рівняння (3) кількості теплоти, витраченої на нагрівання калориметра, і витрат теплоти в навколишній простір, необхідно за тієї самої потужності нагрівника нагріти порожній калориметр (без зразка) від початкової температури T_0 на таку саму різницю температур ΔT . Витрати теплоти в обох

випадках будуть практично однаковими і досить малими, якщо температура захисного кожуха калориметра в обох випадках стала і дорівнює кімнатній:

$$J \cdot U \cdot \tau_0 = m_0 \cdot c_0 \cdot \Delta T + \Delta Q_0 \quad (4)$$

З рівнянь (3) і (4) випливає

$$J \cdot U \cdot (\tau - \tau_0) = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (5)$$

Рівняння (5) може бути використане для експериментального визначення питомої теплоємності матеріалу досліджуваного зразка. Змінюючи температуру калориметра, необхідно побудувати графік залежності різниці часу нагрівання від зміни температури досліджуваного зразка: $(\tau - \tau_0) = f(\Delta T)$, за кутовим коефіцієнтом якого K_α можна визначити питому теплоємність зразка.

Експериментальна установка

Для визначення теплоємності твердих тіл призначена експериментальна установка ФПТ1-8, загальний вигляд якої зображено на титульній сторінці.

Зразки нагріваються в калориметрі, схема якого наведено на рис. 1. Калориметр складається з латунного корпусу з конічним отвором, куди вміщується досліджуваний зразок. На зовнішній поверхні корпусу в спеціальних пазах розміщена нагрівальна спіраль. Ззовні корпус калориметра теплоізолюовано шарами азбесту і скловолокна та закрито алюмінієвим кожухом. Калориметр закривається теплоізолюованою кришкою. Досліджувані зразки розташовані в гніздах у блоці робочого елемента 2. Після закінчення експерименту зразок можна виштовхнути з конічної порожнини корпусу калориметра за допомогою гвинта. Для видалення нагрітого зразка з калориметра та установки зразка в нагрівник використовується рукоятка, розміщена у спеціальному

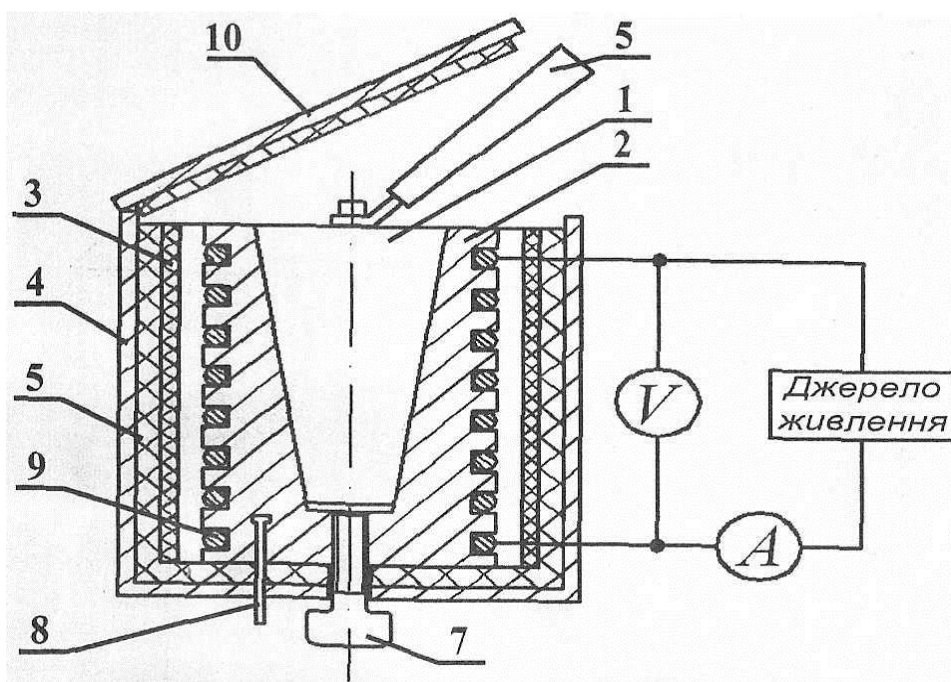


Рисунок 1. Схема калориметра: 1 — зразок; 2 - корпус; 3 — азбест; 4— кожух; 5 - рукоятка; 6—скловолокно; 7—гвинт; 8 — датчик температури; 9 - нагрівник; 10 — кришка.

гнізді поруч з досліджуваними зразками. Температура калориметра вимірюється цифровим термометром, датчик якого знаходиться в корпусі калориметра. У блоці приладів 1 розташоване також джерело живлення нагрівника, потужність якого установлюється регулятором «Нагрів». Напруга й струм у колі нагрівника вимірюються вольтметром і амперметром, які знаходяться на передній панелі блоку приладів. Час нагрівання калориметра вимірюється секундоміром, розташованим у блоці приладів. Атомні маси зразків приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

№ п/п	Матеріал зразка	Атомна маса, $кг/моль$
1	Дюраль	26,98 10 ⁻³
2	Латунь	63,57 10 ⁻³ (ГЗ
3	Сталь	55,85 10 ⁻³

Порядок виконання роботи

1. Зняти кожух з блоку робочого елемента установки і підвісити його на гвинтах задньої панелі. Ввімкнути установку тумблером «Мережа».
2. Порожній калориметр щільно закрити кришкою. Ввімкнути тумблер «Нагрів». За допомогою регулятора «Нагрів» встановити необхідну напругу в колі.
3. За температури калориметра $t = 25^{\circ}C$ увімкнути відлік часу. Зробити 7-10 вимірів часу нагрівання порожнього калориметра через інтервал $1^{\circ}C$. Результати занести до таблиці 2.

Таблиця 2

№ вим.	U , В	I , А	ΔT , К	τ_0 , с	τ , с	$\tau - \tau_0$, с	c , Дж/(кг·К)	μc , Дж/(моль·К)	ε %

4. Вимкнути тумблер «Нагрів», відкрити кришку і охолодити калориметр до початкової температури t_0 .
5. Обертаючи гвинт уліво, помістити в калориметр один з досліджуваних зразків, взятий за вказівкою викладача. Щільно закрити кришку калориметра і зачекати 3 хв. до вирівнювання температур калориметра і зразка.
6. Ввімкнути нагрівник калориметра, встановивши те саме значення напруги в колі, що й при нагріванні порожнього калориметра.
7. Ввімкнути відлік часу за тієї самої початкової температурі t_0 . Зробити 7-10 вимірів часу нагрівання калориметра із зразком τ через інтервал температури $1^{\circ}C$. Результати занести до таблиці 2.
8. Регулятор «Нагрів» установити в крайнє ліве положення, вимкнути тумблер «Нагрів», відкрити кришку калориметра. Для видалення зразка з калориметра гвинт обернути вправо, після чого за допомогою рукоятки виийняти нагрітий зразок.
9. Вимкнути установку тумблером «Мережа».

Обробка результатів вимірювань

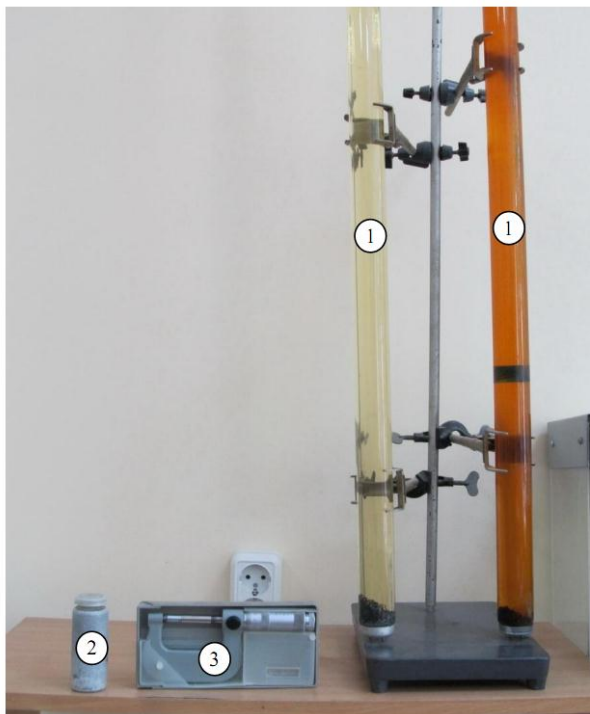
1. Побудувати графік залежності різниці часу нагрівання калориметра із зразком і порожнього калориметра від зміни температури калориметра $(\tau - \tau_0) = f(\Delta T)$ та визначити кутовий коефіцієнт K_α .
2. Використовуючи знайдений кутовий коефіцієнт K_α визначити питому теплоємність зразка за формулою $C = \frac{I \cdot U}{m} \cdot K_\alpha$.
3. Використовуючи дані таблиці 1, визначити молярну теплоємність зразка.
4. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні завдання

1. Яка величина зветься теплоємністю речовини, питомою і молярною теплоємністю? У яких одиницях СІ вони вимірюються?
2. Виведіть формулу для повної внутрішньої енергії 1 моля твердого тіла.
3. У чому особливості теплоємностей твердих тіл? Виведіть формулу для молярної теплоємності твердого тіла.
4. Запишіть і поясніть закон Дюлонга і Пті.
5. Розрахуйте, виходячи із закону Дюлонга і Пті, питомі теплоємності алюмінію Al_{27}^{27} та заліза Fe_{26}^{56} .
6. У чому полягає метод електричного нагрівання для визначення теплоємності твердих тіл?
7. Виведіть формулу для експериментального визначення теплоємності.
8. Чому під час виконання експерименту нагрівання порожнього калориметра та калориметра із зразком необхідно проводити при одній і тій самій потужності нагрівника?
9. Чим обмежена максимально допустима температура нагрівання калориметра?
10. Основні джерела похибок даного методу вимірювання.

Лабораторна робота №9

Тема: «Визначення в'язкості рідин методом Стокса»



Експериментальна установка

1 – скляні циліндри; 2 – дріб свинцевий; 3 – мікрометр; секундомір; в'язкі рідини.

Мета роботи: ознайомитись з одним із способів визначення в'язкості гліцерину та мастила. Ознайомитись з принципом будови і дії віскозиметра.

Прилади і матеріали: скляні циліндри, в'язкі рідини, дріб свинцевий, мікрометр, секундомір.

Теоретичні відомості

На кульку, яка вільно падає в рідині, діють такі сили:

1. Сила тяжіння:

$$P = m_k g \quad (1)$$

де m_k - маса кульки. Врахувавши, що

$$m_k = \rho_k V = \rho_k \frac{4}{3} \pi r^3 \quad (2)$$

де r - радіус кульки, матимемо:

$$P = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_k g \quad (3)$$

2. Виштовхувальна сила (сила Архімеда):

$$F_A = m_{\text{рід}} g \quad (4)$$

Де $m_{\text{рід}} = \rho_{\text{рід}} \frac{4}{3} \pi r^3$ - маса рідини.

Отже,

$$F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{рід}} g \quad (5)$$

3. Сила внутрішнього тертя (сила Стокса, в'язкість):

$$F = 6\pi\eta r V \quad (6)$$

де η - коефіцієнт динамічної в'язкості: V - швидкість падіння кульки, яку визначають через шлях l пройдений кулькою за час t між двома зафіксованими мітками циліндра $V = l/t$.

Спочатку рух кульки прискорений, потім (при зрівноваженні архімедової сили F_A , сили в'язкості F та сили тяжіння P), рух кулі стає рівномірним. Запишемо рівнодійну всіх сил, що діють на кульку:

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_k g - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{\text{рід}} g - 6\pi\eta r V = 0 \quad (7)$$

Звідки,

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{(\rho_k - \rho_{\text{рід}})}{V} \quad (8)$$

Врахувавши, що $V = l/t$, маємо:

$$\eta = \frac{2(\rho_k - \rho_{\text{рід}})}{9l} gr^2 t \quad (9)$$

$$\eta = \frac{2}{9}(\rho_k - \rho_{\text{рід}})g \frac{r^2 t}{l} \quad (10)$$

Порядок виконання роботи

1. Виміряти мікрометром радіуси r шести кульок.
2. Зорієнтувати по осі циліндра кульку і опустити її в рідину. Секундоміром визначити проміжок часу t протягом якого кулька проходить відстань l між двома мітками на циліндрі.
3. Дослід провести три рази для циліндра, заповненого гліцерином і три рази для циліндра, заповненого мастилом.
4. Дані r , t , l занести у таблиці для гліцерину і для мастила.
5. За формулою (10) обчислити η для гліцерину і мастила.

Контрольні завдання

1. Природа внутрішнього тертя в рідинах.
2. Коефіцієнт в'язкості рідин та його фізичний зміст.
3. Теорія методу Стокса для визначення коефіцієнта в'язкості рідин.

Звіт за виконану роботу

1. Робоча формула:

$\eta = \frac{2}{9}(\rho_k - \rho_{\text{рід}})g \frac{r^2 t}{l}$. (10) – коефіцієнт динамічної в'язкості, $[\eta]$ – Па · с .

Табличні величини:

$\rho_{\text{Г}}$ - густина гліцерину, $\rho_{\text{Г}}= 1,26 \cdot 10^3$ кг/м³;

$\rho_{\text{М}}$ - густина мастила, $\rho_{\text{М}}=0,9 \cdot 10^3$ кг/м³;

$\rho_{\text{к}}$ - густина кульки, $\rho_{\text{к}}=11,35 \cdot 10^3$ кг/м³.

2. Результати експерименту

Табл. 1. Визначення коефіцієнта динамічної в'язкості гліцерину.

№ п/п	r , м	l , м	t , с	η , Па · с	ε , %	$\Delta \eta$

Табл. 2. Визначення коефіцієнта динамічної в'язкості мастила.

№ п/п	$r, м$	$l, м$	$t, с$	$\eta, Па \cdot с$	$\varepsilon, \%$	$\Delta\eta$

3.Обчислення похибок вимірювання:**Метод № 1**

а) Абсолютна похибка:

$$\Delta\eta = t_{\alpha} \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (\langle\eta\rangle - \eta_n)^2}{N(N-1)}} \quad (6)$$

де t_{α} - коефіцієнт Стюдента.

б) Відносна похибка:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\eta}{\langle\eta\rangle} \cdot 100 \%$$

Метод № 2

1) Визначення середньої величини коефіцієнта динамічної в'язкості мастила і гліцерину.

$$\eta_{\text{сер}} = \frac{2}{9} (\rho_k - \rho_{\text{рід}}) g r^2 \frac{r_{\text{сер}}^2 t_{\text{сер}}}{l_{\text{сер}}}.$$

2) Визначення відносної похибки

$$\ln \eta = \ln(r^2 t) - \ln l$$

$$\ln \eta = \ln t + 2 \ln r - \ln l$$

$$\frac{d\eta}{\eta} = \frac{dt}{t} + 2 \frac{dr}{r} + \frac{dl}{l}$$

$$\frac{\Delta\eta}{\eta} = \frac{\Delta t}{t} + 2 \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta l}{l}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta t}{t} + 2 \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta l}{l} \right) \cdot 100 \%$$

$$\Delta t = 0.5 \text{ сек}, \quad \Delta r = 0,05 \text{ м. м}, \quad \Delta l = 1 \text{ мм}$$

3) Абсолютна похибка

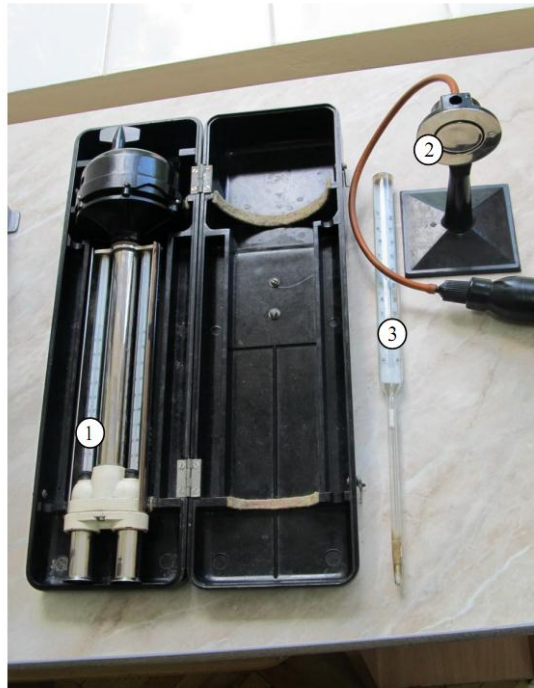
$$\Delta\eta = \varepsilon \cdot \eta_{\text{сер.}}$$

4. **Висновки записати в такому вигляді:**

$$\eta = \eta_{\text{сер.}} \pm \Delta\eta$$

Лабораторна робота №10

Тема: «**Визначення вологості повітря. Гігрометри та психрометри**»



Експериментальна установка

1 – психрометр; 2 – гігрометр; 3 – термометр; барометр, піпетка, ефір, скляний екран.

Мета роботи: ознайомлення з деякими фізичними основами метеорології.

Прилади і матеріали: психрометр, гігрометр, ефір, барометр, піпетка, термометр, скляний екран.

Теоретичні відомості

1. Робота з гігрометром.

Температура, при якій водяна пара стає насиченою називається «*точкою роси*». Для визначення "точки роси" достатньо охолодити металевий предмет з блискучою поверхнею. Температура в момент появи на поверхні легкого серпанку водяної пари у вигляді роси і буде температурою точки роси. В гігрометрі поверхню металевого дзеркала камери охолоджують швидким випаровуванням налитого в камеру ефіру, крізь який продувають повітря. Знаючи температуру «точки роси» (t_p) за гігрометричною таблицею знаходять кількість водяної пари (в грамах), яка є в 1 м³ повітря в момент спостереження, тобто абсолютну вологість (m) та пружність (P) цієї пари (в мм. рт. ст.). Для визначення відносної вологості повітря необхідно ще знайти кількість водяної пари (m_n), необхідної для насичення повітря при температурі в кімнаті. Значення (m_n) та пружності насиченої пари ($P_{нк}$) при кімнатній температурі беруть з гігрометричної таблиці.

Відношення кількості водяної пари, що є в повітрі в момент спостереження (в точці роси), до тієї кількості, яка необхідна для повного насичення називають *відотною вологістю повітря*:

$$\varphi = \frac{m}{m_k} \cdot 100\% \quad (1)$$

На практиці частіше визначають абсолютну вологість не за кількістю водяної пари в грамах, що міститься в м³ повітря, а за її пружністю, вираженою в мм.рт.ст.:

$$\varphi = \frac{P}{P_{нк}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$P_{нк}$ -пружність насиченої водяної пари при кімнатній температурі .

2. Робота з психрометром.

Внаслідок продування повітря, що прискорює випаровування ефіру з батисту, мокрий термометр показуватиме температуру нижчу ніж сухий. Чим менша вологість навколишнього повітря, тим інтенсивніше випаровування і тим менші покази мокрого термометра. За різницею показів сухого (t_c) та мокрого (t_m) термометрів з психрометричної таблиці можна знайти відносну вологість повітря (φ). Температура вологого термометра буде знижуватися до тих пір, доки кількість теплоти Q_1 , яка надходить до термометра з навколишнього середовища за одиницю часу стане рівна кількості теплоти Q_2 , яка необхідна для випаровування:

$$Q_1 = Q_2 \quad (3)$$

Кількість теплоти Q_1 , знаходимо за законом Ньютона:

$$Q = aS(t_c - t_m) \quad (4)$$

де α - коефіцієнт теплообміну, S - площа поверхні батисту. Перепишемо рівняння теплового балансу (3) у вигляді:

$$\alpha S(t_c - t_m) = q_m \lambda S \quad (5)$$

де q_m – швидкість випаровування $\frac{dm}{dt}$ з одиниці поверхні, λ - питома теплота випаровування. З рівності (5) для різниці показів термометрів маємо:

$$t_c - t_m = \frac{q_m \lambda}{\alpha} \quad (6)$$

Швидкість випаровування знаходять за законом Дальтона:

$$q_m = \alpha_m (P_m - P_{hk}) \frac{760}{P_{atm}} \quad (7)$$

де α_m - коефіцієнт випаровування, P_m - тиск насиченої пари при температурі мокрого термометра, P_{hk} - тиск пари в навколишньому повітрі (абсолютна вологість), P_{atm} - атмосферний тиск. Підставивши (7) в (6) , маємо:

$$t_c - t_m = \frac{760 \alpha_m \lambda}{P_{atm} \alpha} (P_m - P_{hk}) \quad (8)$$

Ввівши позначення $A = \frac{\alpha}{760 \alpha_m \lambda}$, можемо переписати (8) у вигляді:

$$P_{hk} = P_m - P_{atm} (t_c - t_m) A \quad (9)$$

В даній роботі з формули (9) визначають не абсолютну вологість P , а сталу приладу A за значенням абсолютної вологості, знайденої при роботі з гігрометром:

$$A = \frac{P_m - P_{hk}}{P_{atm} (t_c - t_m)} \quad (10)$$

Контрольні завдання

1. Поняття абсолютної та відносної вологості повітря.
2. Принцип будови та дії гігрометрів. Точка роси та її визначення.
3. Психметри, принцип будови та дії:
 - а) визначення вологості повітря психрометром Ассмана;
 - б) визначення сталої приладу.

Порядок виконання роботи

1.Робота з гігрометром.

1. У камеру гігрометра налити декілька крапель ефіру і вкласти туди термометр, щоб його кулька розмістилася в ефірі.
2. Відокремити гігрометр від себе скляним екраном.
3. За допомогою гумової груші нагнітати повітря в гігрометр. В момент появи легкого серпанку - роси на нікельованій поверхні припинити накачування повітря і зафіксувати покази термометра t_1 .
4. Зафіксувати температуру t_2 в момент зникнення серпанку.

5. За значеннями t_1 і t_2 знайти температуру точки роси: $t_p = \frac{t_1 + t_2}{2}$.
6. Дослід повторити тричі в різних місцях кімнати.
7. За допомогою гігromетричної таблиці (див. додаток) знайти пружність пари P (абсолютну вологість) і пружність насиченої пари $P_{\text{нк}}$ при кімнатній температурі.
8. Визначити відносну вологість повітря φ за формулою (2)

2. Робота з психрометром

1. За допомогою піпетки змочити батист вологого термометра.
2. Завести вентилятор трьома - чотирма обертами завідного ключа.
3. Після припинення роботи вентилятора зафіксувати покази сухого t_c та мокрого t_m термометрів.
4. За різницею показів термометрів і психрометричною таблицею визначити відносну вологість повітря φ .

3. Визначення сталої приладу.

1. З таблиці 2 взяти середні значення температур t_c і t_m .
2. За допомогою гігromетричної таблиці знайти пружність насиченої пари при температурі мокрого термометра P_m .
3. З таблиці 1 взяти значення абсолютної вологості повітря.
4. За показами барометра визначити атмосферний тиск $P_{\text{атм}}$.
5. Знайти сталу психрометра A за формулою (10).

Звіт про виконану роботу

1. Робочі формули

Відносна вологість повітря :

$$\varphi = \frac{P}{P_{\text{нк}}} \cdot 100\%$$

Стала приладу:

$$A = \frac{P_m - P_{\text{нк}}}{P_{\text{атм}}(t_c - t_m)}$$

3. Результати експерименту

Таблиця 1

№	t_1 °C	t_2 °C	t_p °C	P , мм.рт.ст.	$P_{\text{нк}}$ мм.рт.ст.	φ %	ε %

Таблиця 2

№	t_c °C	t_m °C	$(t_c - t_m)$ °C	φ %	ε %

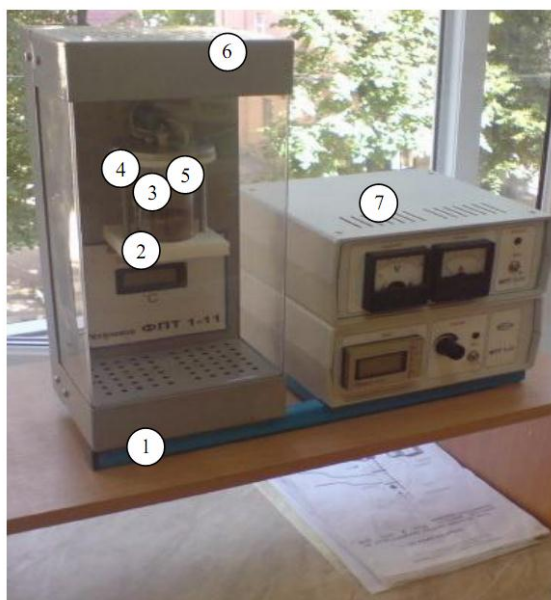
Таблиця 3

№	$t_e, ^\circ\text{C}$	$t_m, ^\circ\text{C}$	P_m мм.рт.ст.	$P_{\text{нк}},$ мм.рт.ст.	$P_{\text{атм}}$ мм.рт.ст.	$A, \frac{1}{^\circ\text{C}}$

3. Висновки

Лабораторна робота №11

Тема: «Визначення зміни ентропії при плавленні
олова»



Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-11

1 – стояк; 2 – кронштейн; 3 – нагрівник; 4 – датчик температури; 5 – тигель з досліджуваним матеріалом; 6 – блок робочого елемента; 7 – блок приладів

Мета роботи: визначення зміни ентропії за фазового переходу першого роду на прикладі плавлення олова.

Теоретичні відомості

Фазовий перехід першого роду - це фазове перетворення, яке супроводжується поглинанням або виділенням деякої кількості прихованої теплоти та зміною питомого об'єму речовини; температура переходу залишається сталою і залежить від тиску. Отже, для розплавлення деякої маси m речовини, що знаходиться при температурі плавлення T_{Π} , необхідно витратити кількість теплоти

$$Q_{\Pi} = \lambda \cdot m \quad (1)$$

де λ - питома теплота плавлення даної речовини.

Ентропією називається така функція стану термодинамічної системи, диференціал якої dS в оборотному процесі дорівнює відношенню нескінченно малої кількості теплоти δQ , наданої системі, до термодинамічної температури T системи:

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

Ентропія завжди визначається з точністю до сталої величини, тому зміст має лише її зміна при переході системи зі стану 1 до стану 2:

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

Процес плавлення олова проходить за сталої температури $T = T_{\Pi}$ і, отже, є ізотермічним. Зміну ентропії у такому процесі можна знайти за формулою (2):

$$\Delta S_{\Pi} = \frac{1}{T_{\Pi}} \cdot \int_2^1 \delta Q_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{T_{\Pi}}.$$

З виразу (2) випливає, що зміну ентропії при нагріванні і плавленні олова можна визначити як суму зміни ентропії при нагріванні його від початкової температури T_K до температури плавлення T_{Π} та при плавленні олова:

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_{\Pi} = \int_{T_K}^{T_{\Pi}} \frac{\delta Q_H}{T} + \frac{\delta Q_{\Pi}}{T}.$$

Враховуючи, що $\delta Q_H = c \cdot m \cdot dT$, і беручи до уваги формулу (1), дістаємо:

$$\Delta S = c \cdot m \cdot \int_{T_K}^{T_{\Pi}} \frac{dT}{T} + \frac{\lambda \cdot m}{T_{\Pi}}$$

або

$$\Delta S = c \cdot m \cdot \ln \frac{T_{\Pi}}{T_K} + \frac{\lambda \cdot m}{T_{\Pi}} \quad (3)$$

де c і λ - питома теплоємність та питома теплота плавлення олова. Формула (3) може бути використана для експериментального визначення зміни ентропії при нагріванні та плавленні олова після вимірювання значень температур T_K і T_{Π} .

Експериментальна установка

Для визначення зміни ентропії при нагріванні і плавленні олова призначена експериментальна установка ФПТ1-11, загальний вигляд якої показано на титульній сторінці 61.

Нагрівання олова відбувається в тиглі за допомогою електричного нагрівника 3, джерело живлення якого розміщене в блоці приладів 7. Температура олова вимірюється цифровим термометром, розташованим у блоці робочого елемента 6. Час нагрівання вимірюється цифровим секундоміром, розташованим у блоці приладів. Секундомір приводиться в дію вмиканням живлення блоку приладів.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути установку тумблером «Мережа» та виміряти початкову температуру олова (T_K).
2. Одночасно увімкнути нагрівник та секундомір і через кожну хвилину вимірювати температуру олова. Вимірювання проводити доти, доки температура після досягнення сталої величини (T_{II}) не почне підвищуватись. Результати вимірювань позначити на графіку $T=f(t)$.
3. Вимкнути нагрівник і провести аналогічні виміри при охолодженні олова, позначаючи температуру на тому самому графіку, що і в п.2.
4. Вимкнути установку тумблером «Мережа».

Обробка результатів вимірювань

1. За двома одержаними графіками визначити температури, які відповідають ділянкам, паралельним осі часу і за їх середнім значенням знайти температуру плавлення олова.
2. За формулою (3) визначити зміну ентропії під час нагрівання та плавлення олова. Питому теплоту плавлення та питому теплоємність олова знайти у довідниках.
3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

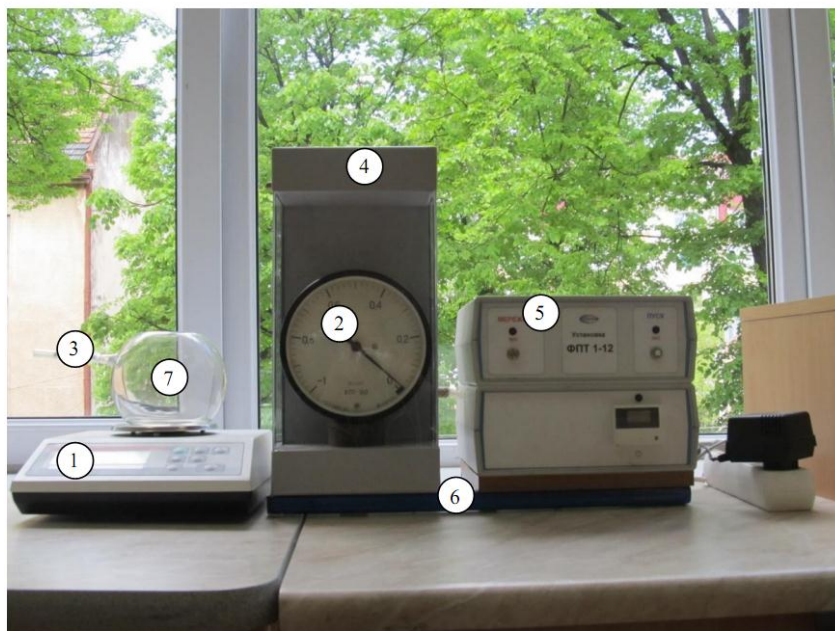
Контрольні завдання

1. Що таке фазовий перехід першого роду?
2. Що таке ентропія?
3. Чому дорівнює зміна ентропії за ізотермічного та адіабатичного процесів?
4. Виведіть основну розрахункову формулу, яка використовується у даній роботі?
5. У чому полягає метод визначення зміни ентропії за нагрівання та плавлення олова, який використано у даній роботі?
6. До якої температури слід нагрівати олово у тиглі при виконанні експерименту?
7. Які основні джерела похибок даного методу вимірювання?

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
1	Досліджуваний матеріал	олово
2	Маса олова, г	150
3	Живлення нагрівача здійснюється постійним струмом	10
4	Номинальна напруга на нагрівачі, В	24
5	Діапазон регулювання напруги на нагрівачі, В	5÷24
6	Похибка вимірювання струму нагрівача, %	5
7	Похибка вимірювання напруги на нагрівачі, %	5
8	Діапазон вимірювання температури нагрівання олова, °С	0...300
9	Похибка вимірювання температури, °С	2
10	Діапазон вимірювання часу цифрового контролера, с	1...1999
11	Похибка вимірювання часу, %	5
12	Час нагрівання олова до температури плавлення, хв.	20
13	Живлення установки від мережі змінного струму: - напруга, В - частота, Гц	220_{-33}^{+22} 50 ± 1
14	Потужність споживання, Вт, не більше	130
15	Габаритні розміри, мм, не більше	430x382x220
16	Маса установки, кг, не більше	7

Лабораторна робота №12

Тема: «Визначення молярної маси повітря
методом відкачування»



Експериментальна установка ФПТ1-12

1 – ваги; 2 – вакуумметр; 3 – вакуумний кран; 4 – вимірювальний блок;
5 – компресор; 6 – стояк; 7 – колба.

Мета роботи: ознайомлення з одним із методів визначення молекулярної маси і густини газу.

Теоретичні відомості

Молекулярною (молярною) масою називається маса одного моля речовини. У системі СІ ця величина вимірюється в кілограмах на моль. Моль – кількість речовини, яка містить стільки ж структурних елементів (молекул, атомів і т.д.), скільки атомів міститься в ізотопі вуглецю ^{12}C масою 0,012 кг. Молярну масу газу можна визначити з рівняння газового стану.

При не дуже високих тисках, але досить високих температурах газ можна вважати ідеальним. Стан такого газу описується рівнянням Менделєєва-Клапейрона:

$$P \cdot V = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T \quad (1)$$

де P – тиск газу; V – об'єм газу; m – маса газу; μ – молярна маса газу; $R = 8,31$ Дж/(моль·К) – універсальна газова стала; T – абсолютна температура газу.

З рівняння (1) можна одержати формулу для молярної маси газу:

$$\mu = \frac{m \cdot R \cdot T}{P \cdot V} \quad (2)$$

Якщо вимірювання тиску P , об'єму V , температури T газу, тобто параметрів газу, які входять до формули (2), не викликає особливих труднощів, то визначення маси газу виконати практично неможливо, тому що газ можна зважити тільки разом з колбою, в якій він знаходиться. Існує інший спосіб визначення μ , який дозволяє виключити невідоме значення маси колби m_0 . Це можна зробити, розглянувши рівняння стану двох мас m_1 і m_2 того самого газу при незмінних температурі T та об'ємі V .

Нехай у колбі об'ємом V знаходиться газ масою m_1 під тиском P_1 і за температури T . Рівняння стану (1) для цього газу має вигляд:

$$P_1 \cdot V = \frac{m_1}{\mu} \cdot R \cdot T \quad (3)$$

Відкачаємо частину газу з колби, не змінюючи його температури. Після відкачування маса газу, що залишився у колбі, та його тиск зменшуються. Позначимо їх відповідно m_2 і P_2 і знову запишемо рівняння стану

$$P_2 \cdot V = \frac{m_2}{\mu} \cdot R \cdot T \quad (4)$$

З рівнянь (3) та (4) дістанемо:

$$\mu = \frac{m_1 - m_2}{P_1 - P_2} \cdot \frac{R \cdot T}{V} \quad (5)$$

Одержана формула (5) дає можливість визначити μ , якщо відома зміна маси газу (але не сама маса), а також зміна тиску, температури та об'єму газу.

У даній роботі досліджуваним газом є повітря, яке являє собою суміш азоту, кисню, аргону та інших газів.

Формула (5) придатна і для визначення μ суміші газів. Знайдене у цьому випадку значення і являє собою деяку середню або ефективну молярну масу суміші газів. Молярна маса суміші газів може бути розрахована і теоретично, якщо відомий

процентний вміст та молярна маса кожного з газів, який входить до складу суміші, за формулою

$$\mu_c = \frac{1}{\frac{m_1}{m} \cdot \frac{1}{\mu_1} + \frac{m_2}{m} \cdot \frac{1}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{m} \cdot \frac{1}{\mu_n}} \quad (6)$$

де $\frac{m_1}{m}, \frac{m_2}{m}, \dots, \frac{m_n}{m}$ – відносний зміст кожного газу; $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ – молярні маси газів.

Якщо відома молярна маса газу, то можна легко визначити ще одну важливу характеристику газу – його густину ρ . Густина газу – це маса одиниці об'єму газу:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (7)$$

Виразивши $\frac{m}{V}$ з рівняння Менделєєва-Клапейрона, дістанемо:

$$\rho = \frac{P \cdot \mu}{R \cdot T} \quad (8)$$

Густина суміші газів можна обчислити за формулою (8), розуміючи під μ ефективну молярну масу суміші.

Експериментальна установка

Для визначення молекулярної маси повітря призначена експериментальна установка ФПТ1-12, загальний вигляд якої зображений на титульній сторінці 65.

Робочий елемент установки являє собою скляна колба 8, з'єднану із стрілочним вакуумметром 2, покази якого P відповідають різниці атмосферного тиску у лабораторії P_0 і тиску газу в колбі P_K . Колба має відросток з краном, який за допомогою гумової трубки з'єднується з вхідним патрубком 5 компресора 6, розміщеного на стояку 7. Колбу встановлено на електронних вагах 1. Значення об'єму V колби вказано у паспорті.

Порядок виконання роботи

1. Подати напругу живлення на електронні ваги, ввімкнувши установку тумблером «Мережа».
2. За допомогою електронних ваг визначити масу колби з повітрям ($m_0 + m_1$) при тиску P_1 .
3. Увімкнувши компресор тумблером «Пуск» і, відкривши кран, відкачати повітря з колби до тиску P_2 , після чого, заклавши кран і вимкнувши компресор, визначити за допомогою ваг масу колби з повітрям ($m_0 + m_2$) за тиску P_2 . Одержані результати занести до таблиці 1.

Таблиця 1

№ вим.	$m_0 + m_1$ кг	$m_0 + m_2$ кг	$m_1 - m_2$, кг	P_1 , Па	P_2 , Па	$P_1 - P_2$, Па	T , К	μ , кг/моль	ρ , кг/м ³	ε %

4. Повторити виміри по пп. 2-3 не менш як 3 рази.
5. Виміряти температуру повітря в лабораторії.
6. Вимкнути установку тумблером «Мережа».

Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного виміру визначити масу відкачаного повітря ($m_1 - m_2$) та різницю тисків ($P_1 - P_2$).
2. За формулою (5) обчислити для кожного виміру значення молярної маси повітря μ . Знайти середнє значення $\langle \mu \rangle$.
3. За формулою (8) обчислити для кожного виміру густину повітря, використовуючи знайдене значення молярної маси μ .
4. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Контрольні завдання

1. Що таке молекулярна маса речовини і в яких одиницях вона вимірюється?
2. Запишіть і поясніть рівняння Менделєєва-Клапейрона. В яких випадках його можна використовувати для практичних обчислень?
3. Як теоретично розрахувати молекулярну масу суміші газів?
4. Що таке густина газу і як її можна визначити експериментально?
5. Виведіть розрахункову формулу для визначення молярної маси, що використовується в даній роботі.
6. Чому молярну масу газу не можна визначити безпосередньо, використовуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона?
7. У чому полягає метод відкачування для визначення молярної маси газу?
8. Основні джерела похибок даного методу вимірювання.

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ		
1	Діапазон вимірюваних тисків, кПа	Від 0 до -101
2	Похибка вимірювання тиску (при атмосферному тиску 101 кПа), %, не більше	± 1
3	Об'єм колби, л	$1 \pm 10\%$
4	Діапазон вимірювання маси, г	$2 \div 250$
5	Похибка зважування, мг	38
6	Живлення установки ФПТ1-12 від мережі змінного тиску: - напругою, В - частотою, Гц	220_{-33}^{+22} 50 ± 1
7	Потужність споживання, Вт, не більше	130
8	Установка допускає неперервну роботу на протязі, год	12
9	Габаритні розміри, мм	630x380x220
10	Маса установки, кг, не більше	10

Лабораторна робота №13

Тема: «Визначення кристалізації твердих тіл
методом кривої охолодження»



Експериментальна установка

1 – мілівольтметр; 2 – термопара; 3 – посудина із сплавом Вуда; 4 -
електроплитка

Мета роботи: визначити питому теплоту та температуру кристалізації сплаву Вуда, розрахувати зміну ентропії методом зняття кривої кристалізації.

Прилади і матеріали: мілівольтметр дзеркальний, термонара, посудина зі сплавом Вуда, електроплитка, металевий стержень, керамічна підкладка.

Теоретичні відомості

Кристалізація - це рівноважний фазовий перехід кристалічного тіла з рідкого стану в твердий. Питома теплота плавлення λ - кількість теплоти, яка необхідна для розплавлення одиниці маси кристалічної речовини при температурі плавлення.

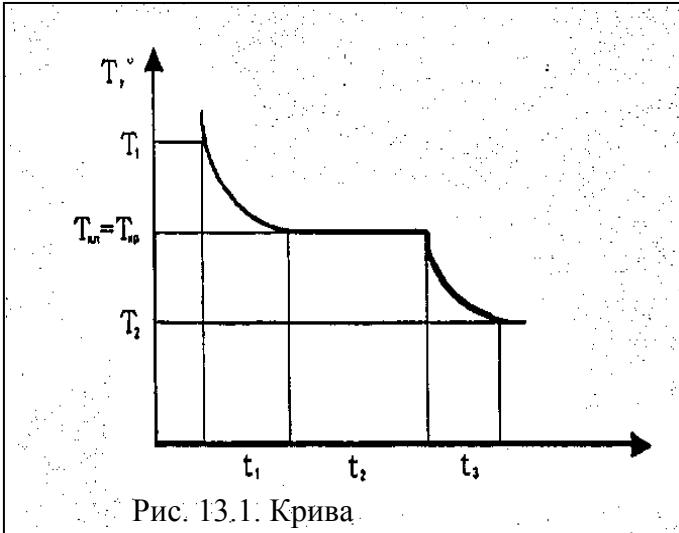


Рис. 13.1. Крива

Температуру плавлення $T_{пл}$ визначають методом зняття кривої плавлення (залежності температури від часу), або, що зручніше на практиці, зняттям кривої тверднення (кристалізації).

Схематично плавлення проходить три етапи:

1. Поглинання твердим тілом деякої кількості теплоти, що приводить до руйнування кристалічної ґратки, внаслідок чого тверде тіло починає ставати рідким;

2. Сам процес плавлення також супроводжується поглинанням деякої кількості теплоти;
3. Рідкий стан, для підтримання якого необхідна певна кількість теплоти.

Зворотнім процесом є кристалізація, яка також складається з трьох етапів:

а) тверднення розплавленого тіла (сплаву Вуда), що супроводжується виділенням за одиницю часу кількості теплоти q :

$$q_1 = \frac{Q_1}{\Delta t_1} (m c_{рід} + m_n c_n) \frac{T_1 - T_{кр}}{\Delta t_1} \quad (1)$$

де m і $c_{рід}$ - маса і питома теплоємність рідкого сплаву Вуда, m_n і c_n - маса і питома теплоємність посудини, T_1 - початкова температура тверднення, $T_{кр}$ - температура кристалізації, що рівна температурі плавлення $T_{кр} = T_{пл}$, Δt_1 - проміжок часу від початку охолодження до початку кристалізації.

б) процес кристалізації супроводжується виділенням за одиницю часу деякої кількості теплоти q_2 :

$$q_2 = \frac{Q_2}{\Delta t_2} = \frac{\lambda m}{\Delta t_2} \quad (2)$$

де λ - питома теплота плавлення (кристалізації), Δt - час кристалізації.

в) охолодження твердого тіла, що також супроводжується виділенням за одиницю часу деякої кількості теплоти q_3 :

$$q_3 = \frac{Q_3}{\Delta t_3} = (m c_{мб} + m_n c_n) \frac{T_{кр} - T_2}{\Delta t_3} \quad (3)$$

де c_{me} - питома теплоємність твердого сплаву Вуда, T_2 - кінцева температура охолодженого сплаву Вуда, Δt_3 - час охолодження.

Якщо проміжки часу вважати однаковими $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$, то величину q_2 можна знайти як середнє арифметичне величин q_1 і q_3 :

$$q_2 = \frac{q_1 + q_3}{2} \quad (4)$$

Враховуючи рівності (1) - (4), отримаємо вираз для питомої теплоти плавлення (кристалізації):

$$\lambda = \frac{1}{2m} [(mc_{pid} + m_n c_n)(T_1 - T_{кр}) + (mc_{mb} + m_n c_n)(T_{кр} - T_2)]$$

Процес тверднення з наступним охолодженням твердого сплаву Вуда супроводжується зміною ентропії dS , яку обчислюють за формулою:

$$dS = \int_{T_{кр}}^{T_2} mc_{mb} \frac{dT}{T} + \frac{\lambda m}{T_{кр}} + \int_{T_{кр}}^{T_2} mc_{mb} \frac{dT}{T} \quad (5)$$

або

$$dS = mc_{pid} \ln \frac{T_{кр}}{T_1} + \frac{\lambda m}{T_{кр}} + mc_{mb} \ln \frac{T_2}{T_{кр}}$$

Параметри експериментальної установки

маса сплаву $m = 212$ г;

маса посудини $m_n = 43,8$ г;

питома теплоємність посудини $c_n = \frac{D_{ж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

питома теплоємність рідкого сплаву $c_{pid} = 146 \frac{D_{ж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

питома теплоємність твердого сплаву $c_{me} = 248 \frac{D_{ж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$

Контрольні завдання

1. Фазовий перехід першого та другого роду.
2. Процеси сублімації, плавлення. Питома теплота плавлення. Залежність температури плавлення від тиску.
3. Процес кристалізації. Фазова діаграма.
4. Поняття ентропії.
5. Теорія методу. Виведення робочої формули.

Порядок виконання роботи

1. Покласти посудину зі сплавом Вуда на електроплитку.
2. Спай термопари опустити в посудину так, щоб він доторкався сплаву.
3. Увімкнути електроплитку і через деякий час перевірити металевим стержнем стан розплаву.
4. Коли сплав Вуда стане рідким, зафіксувати покази мілівольтметра (U_1).
5. Вимкнути електроплитку. Посудину з розплавом зняти з плитки на керамічну підкладку.
6. Через кожні 30 секунд фіксувати температуру сплаву до повного його охолодження до кімнатної температури. Дані $T_1, T_2, \dots, T_n$ занести в таблицю 1.
7. Побудувати криву охолодження і знайти за нею температуру кристалізації.

8. Обчислити питому теплоту плавлення і зміну ентропії.
9. Сформулювати висновки.

Звіт про виконану роботу

1. Робоча формула.

Питома теплота плавлення:

$$\lambda = \frac{1}{2m} [(mc_{pid} + m_n c_n)(T_1 - T_{кр}) + (mc_{mb} + m_n c_n)(T_{кр} - T_2)]$$

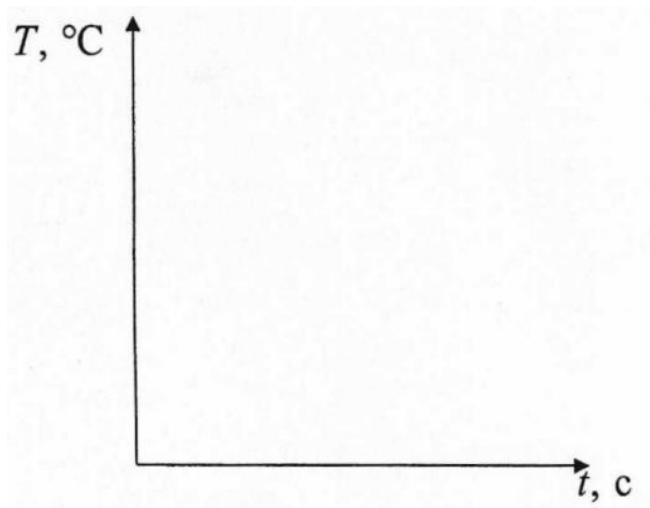
$$\text{Зміна ентропії: } dS = mc_{pid} \ln \frac{T_{кр}}{T_1} + \frac{\lambda m}{T_{кр}} + mc_{mb} \ln \frac{T_2}{T_{кр}}$$

2. Результати експерименту.

Таблиця 1

№	t, c	T, °C	T _{кр} , °C	$\lambda, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$dS \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\varepsilon\%$

3. Крива охолодження



4. Висновки.

Лабораторна робота №14

Тема: «**Фазовий перехід першого роду на прикладі
переходу води в пару при температурі
кипіння**»



Експериментальна установка

1 – джерело струму; 2 – вольтметр; 3 – амперметр; 4 – кип'ятильник з водою; 5 – холодильник; штатив; гумові трубки; склянка для води.

Мета роботи: ознайомитись з одним із методів практичного визначення питомої теплоти фазового переходу води в пару при температурі кипіння.

Прилади і матеріали: джерело струму, провідники, вольтметр, амперметр, штатив, кип'ятильник з водою, холодильник, гумові трубки, склянка для води.

Теоретичні відомості

Питомою теплотою переходу рідини в пару (λ Дж/кг) називається величина, яка чисельно рівна кількості теплоти, яку потрібно надати одиниці маси рідини для перетворення її в пару при постійній температурі кипіння. Теплота, яка підводиться до рідини при ізотермічному випаровуванні, іде на роботу по подоланню сил молекулярного притягання і на роботу проти сил зовнішнього тиску.

Через деякий час після закипання води встановиться приблизно однакова різниця температур колби і навколишнього середовища і, проходячи через конденсатор, пара буде перетворюватися в рідину.

При проходженні електричного струму по провіднику виділяється кількість теплоти, чисельно рівна роботі цього струму :

$$Q = A = I_1 U_1 t \quad (1)$$

де U_1 , - напруга на кінцях провідника, I_1 - сила струму, яка проходить по провіднику протягом часу t . В нашому випадку таким провідником є спіраль нагрівника.

Проте не вся теплота Q , отримана водою від нагрітої спіралі, йде на перетворення води масою m_1 , в пару - частина її витрачається на нагрівання навколишнього середовища (теплові втрати):

$$Q = m_1 \lambda + q \quad (2)$$

де λ - питома теплота переходу води в пару, q - теплові втрати. Або з врахуванням (1):

$$I_1 U_1 t = m_1 \lambda + q \quad (3)$$

Теплові втрати важко визначити експериментально, тому дослід повторюють при іншій потужності електричного струму, вважаючи, що теплові втрати такі самі, як і в першому досліді, якщо час протікання струму однаковий:

$$I_2 U_2 t = m_2 \lambda + q \quad (4)$$

З виразів (3) і (4) легко знаходимо λ :

$$\lambda = \frac{(I_1 U_1 - I_2 U_2) t}{m_1 - m_2} \quad (5)$$

Контрольні завдання

1. Поняття фази. Фазові перетворення.
2. Випаровування. Кипіння. Прихована теплота кипіння та її залежність від температури. Стан динамічної рівноваги рідини і пари. Насичена пара, пружність насиченої пари.
3. Теорія методу. Виведення робочої формули.

Порядок виконання роботи

1. Увімкнути джерело струму. Повернути ручку регулятора так, щоб напруга $U_1 = 80\text{В}$. Значення U_1 , та покази амперметра I_1 , занести в таблицю 1.

- Поки вода в кип'ятильнику закипить, зважити порожню склянку для води. Значення m_c занести в таблицю (1).
- Після того, як з холодильника почне капати конденсат, підкласти склянку. Набирати конденсат протягом заданого часу.
- Зважити склянку з конденсатом m_{c+k} . Знайти масу конденсованої пари:

$$m_1 = m_{c+k} - m_c$$
- Вимкнути джерело струму, щоб вода у кип'ятильнику перестала кипіти.
- Через деякий час повторити пп.. 1-6 при іншому значенні напруги $U_2 = 60\text{В}$. Значення U_2 , I_2 та m_2 занести в таблицю 1.
- Обчислити питому теплоту пароутворення води, абсолютну та відносну похибки.
- Результати представити у вигляді $\lambda = \langle \lambda \rangle \pm \Delta \lambda$. Сформулювати висновки.

Звіт про виконану роботу

1. Робоча формула

Питома теплота пароутворення:

$$\lambda = \frac{(I_1 U_1 - I_2 U_2) t}{m_1 - m_2}$$

2. Результати експерименту

Таблиця 1

$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$m_1, \text{кг}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$m_2, \text{кг}$	$t, \text{с}$	$\lambda, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\Delta \lambda, \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	$\varepsilon, \%$

3. Обчислення похибок

$$\ln \lambda = \ln(I_1 U_1 - I_2 U_2) + \ln t - \ln(m_1 - m_2)$$

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{U_1 dl_1 + I_1 dU_1 + U_2 dl_2 + I_2 dU_2}{I_1 U_1 - I_2 U_2} + \frac{\Delta t}{t} - \frac{dm_1 - dm_2}{m_1 - m_2}$$

а) відносна похибка визначення теплоти пароутворення:

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta I(U_1 + U_2) + \Delta U(I_1 + I_2)}{I_1 U_1 - I_2 U_2} + \frac{\Delta t}{t} + 2 \frac{\Delta m}{m} \right) \cdot 100\% \quad (6)$$

де Δz — абсолютна похибка вимірювання величини z (сили струму, напруги, часу, маси).

б) абсолютна похибка:

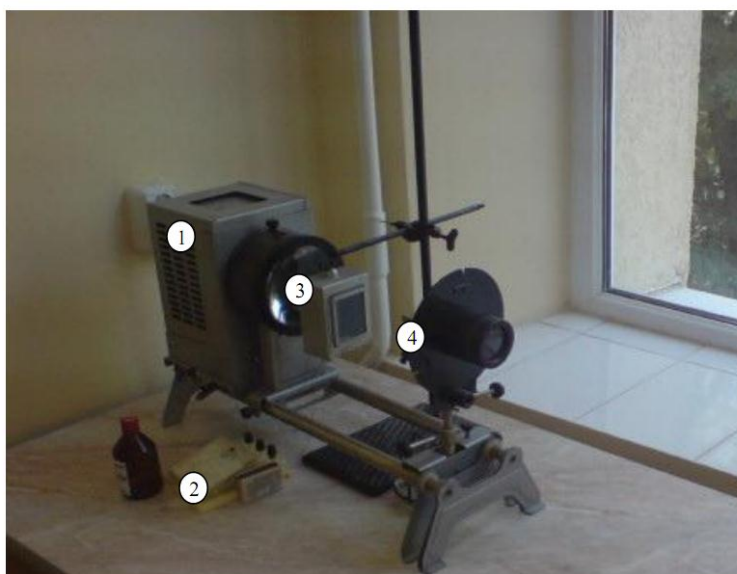
$$\Delta \lambda = \varepsilon \lambda \quad (7)$$

4. Висновок записати у такій формі:

$$\lambda = \lambda_{\text{сер}} \pm \Delta \lambda$$

Лабораторна робота №15

Тема: «Визначення критичної температури
етилового спирту»



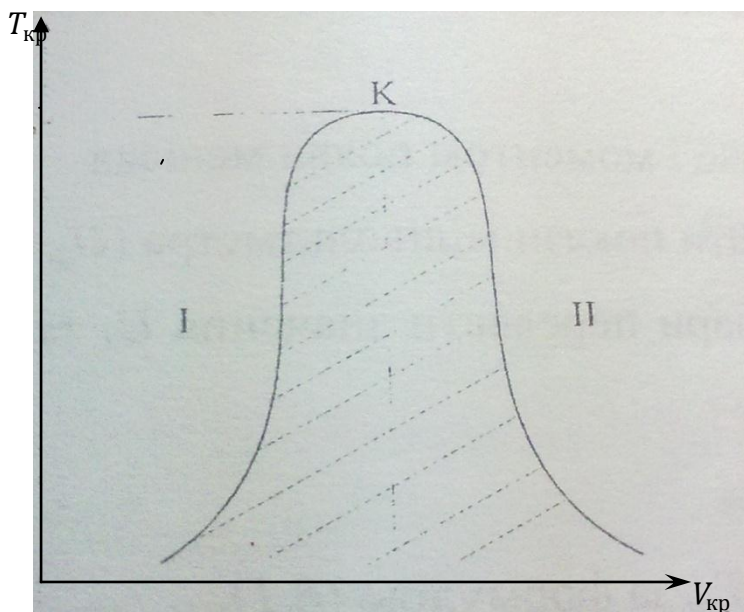
Експериментальна установка

1 – проекційний апарат (ФОС-115); 2 – мілівольтметр; 3 – ампула з ефіром;
4 – екран на штативі; термopара (мідь-константан); таблиця градуювання
термopари; електронагрівник.

Мета роботи: дослідити перехід етилового ефіру через критичний стан при нагріванні та охолодженні.

Прилади і матеріали: проекційний апарат ФОС-115, мілівольтметр, термopapa (мідь-константан), таблиця градування термopари, ампула з ефіром, електронагрівник, екран на штативі.

Теоретичні відомості



На термодинамічній діаграмі (рис. 1) області I і II відповідають стану рідини і газу відповідно. Заштрихована область відповідає рівноважному співіснуванню рідини і пари. Стан у точці К, де зникає різниця між фазами – рідиною і парою – називається *критичним станом* речовини. Сама точка К називається *критичною*. Окіл критичної точки – це область розвинутих флуктуацій. В усьому об'ємі газу утворюються і знову розпадаються місцеві центри згущення. Інтенсивність розсіювання

світла речовиною тим більша, чим більші флуктуації густини. В критичному стані флуктуації густини, особливо великі, вони поширюються в областях об'єму, що в кілька разів перевищує радіус молекулярної дії. Інтенсивність розсіяного світла залежить від довжини хвилі падаючого світла. Для газу чи рідини ця інтенсивність обернено пропорційна четвертому степеневі довжини хвилі. Для речовини, що перебуває в критичному стані, інтенсивність обернено пропорційна квадратові довжини хвилі. Для різних довжин хвиль, в критичному стані, спектральний склад розсіяного світла такий самий як і падаючого. Тому розсіяне світло набуває каламутно-білого забарвлення, яке нагадує колір мінералу опалу (так зване явище критичної опалесценції). Критична опалесценція спостерігається саме в критичній точці, а не вище чи нижче від неї. Дослідження показують, що нижче за $T_{кр}$ в рідині є багато дрібних бульбашок пари, і рідину можна порівняти з губкою, яка насичена паром (рідина в даному випадку – дисперсійне середовище, а пара – дисперсійна фаза). Вище за $T_{кр}$ основним середовищем є пара, в якій містяться найдрібніші крапельки рідини. Низька величина вільної поверхневої енергії при температурах близьких до $T_{кр}$, створює сприятливі умови для флуктуації та взаємних переходів пари в рідину і навпаки. Максимум флуктуації збігається з моментом критичної точки, коли дисперсійне середовище і дисперсійна фаза міняються місцями. В даній роботі для визначення критичної температури етилового ефіру використовують метод Авенаріуса, де застосовують герметичні ампули з незмінною масою речовини. Підвищення температури речовини в ампулі до деякого значення приводить до перевodu речовини з двофазного стану в однорідний. Візуально це спостерігається при зникненні

меніску і появи опалесценції. Через деякий час явище опалесценції зникає і знову спостерігається меніск. Це відбувається при деякій температурі T_2 . За критичну температуру беруть середнє арифметичне температур моменту зникнення і появи меніска:

$$T_{кр} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (1)$$

Контрольні завдання

1. Рівняння стану реальних газів (рівняння Ван-дер-Ваальса).
2. Ізотерми Ендрюса та Ван-дер-Ваальса, їх аналіз.
3. Критичний стан речовини (критичний тиск, об'єм і температура). Явище опалесценції.
4. Методика визначення критичної температури.

Порядок виконання роботи

1. Перевірити контакт термopар з ампулою.
2. Увімкнути проекційний апарат.
3. Добитися чіткого зображення меніска на екрані.
4. Увімкнути електронагрівник і спостерігати за процесами, що відбуваються в ампулі.
5. В момент появи опалесценції і зникнення меніска зафіксувати покази мілівольтметра U_1 .
6. Далі спостерігати за опалесценцією і моментом появи меніска.
7. В момент появи меніска зафіксувати покази мілівольтметра U_2 .
8. За таблицею градування термopар перевести значення напруги , U_1 та U_2 в температуру.
9. Обчислити критичну температуру, абсолютну та відносну похибки.
Результати представити у вигляді $T_{кр} = \langle T_{кр} \rangle \pm \Delta T_{кр}$
10. Сформулювати висновки.

Звіт про виконану роботу

1. Робоча формула

Критична температура : $T_{кр} = \frac{\langle T \rangle_1 + \langle T \rangle_2}{2}$

2. Результати експерименту

Таблиця 1

№	U_1 , мВ	T_1 , °C	U_2 , мВ	T_2 , °C	$T_{кр}$ °C	$\Delta T_{кр}$ °C	$\epsilon\%$

3. Обчислення похибок

$$\Delta T_1 = |T_{cp} - T_1|$$

$$\Delta T_2 = |T_{cp} - T_2|$$

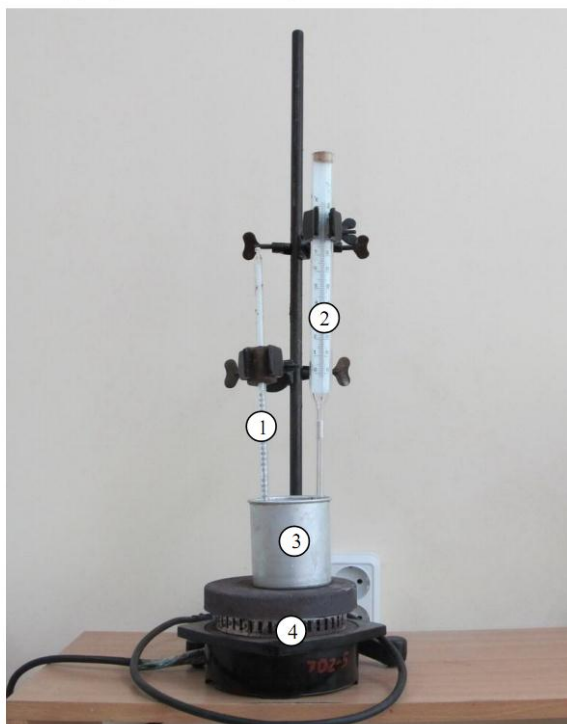
$$\varepsilon = \frac{\Delta T_{cp}}{T_{cp}} \cdot 100\%$$

4. Висновок записати у такій формі:

$$T_{кр} = \langle T_{кр} \rangle \pm \Delta T_{кр}$$

Лабораторна робота №16

Тема: «Перевірка основних та проміжних точок
ртутного термометра»



Експериментальна установка

1 – досліджуваний ртутний термометр (від 0°C до 100°C); 2 – зразковий ртутний термометр (від 0°C до 250°C); 3 – посудина з водою; 4 – електроплитка; кубики льоду, штатив.

Мета роботи: ознайомитись з одним із методів перевірки основних та проміжних точок досліджуваного термометра в порівнянні зі зразковим та побудувати криву поправок.

Прилади і матеріали: штатив, досліджуваний ртутний термометр (від 0°C до 100°C), зразковий ртутний термометр (від 0°C до 250°C), посудина з водою, кубики льоду, електроплитка.

Порядок виконання роботи

1. Для перевірки нульової точки (0°C) термометра підготувати посудину із сумішшю води і товченого льоду.
2. Покласти посудину з підготовленою сумішшю на холодну електроплитку.
3. Опустити термометри в посудину так, щоб резервуари ртуті були занурені в дану суміш.
4. Через деякий час зафіксувати початкові покази термометрів (t_{doc} і t_{zp}).
5. Для перевірки проміжних точок увімкнути електроплитку і через деякий час фіксувати покази обох термометрів:
 - а) до 60°C через кожні 10°C зміни температури;
 - б) від 60°C до температури кипіння знімати покази з інтервалом в 5°C.
6. Для перевірки точки кипіння води резервуар з ртуттю термометра поміщають не у воду, а в пару.
7. Для побудови кривої поправок:
 - а) знайти різницю в показях термометрів $\Delta t = t_{zp} - t_{doc}$ (°C);
 - б) побудувати графік залежності Δt °C від t_{doc} (°C);

Контрольні запитання

1. Температура та способи її вимірювання.
2. Термодинамічні шкали температур.
3. Будова, дія і призначення різних видів термометрів.
4. Основні характеристики термометра: чутливість, інерційність, точність, константа охолодження.
5. Теорія методу сталих точок.

Звіт про виконану роботу

1. Робоча формула.

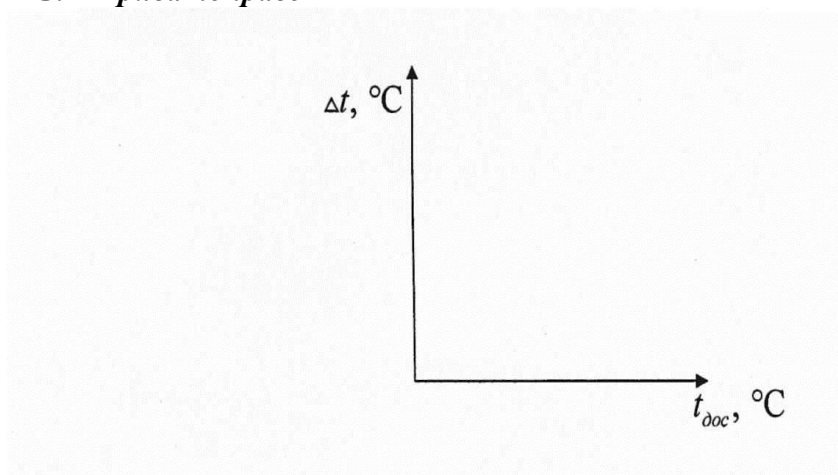
Різниця в показях термометрів: $\Delta t = t_{zp} - t_{doc}$

2. Результати експерименту.

Таблиця 1

№	t_{zp} , °C	t_{doc} , °C	Δt , °C

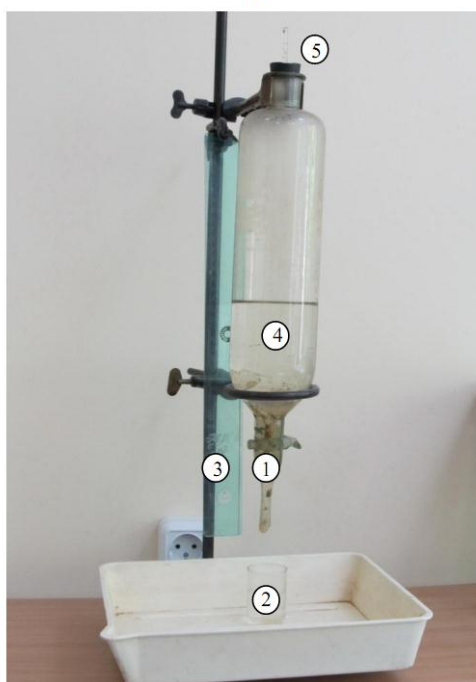
3. Крива поправок



1. Висновок

Лабораторна робота №17

Тема: «Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметру молекул повітря»



Експериментальна установка

1 – кран; 2 – мірна посудина; 3 – лінійка; 4 – скляний балон з водою;
5 – капіляр; штатив.

Мета роботи: ознайомитися з одним із способів експериментального визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметру молекул повітря.

Прилади і матеріали: скляний балон, наповнений водою; штатив, мірна посудина, вага із різноважками, термометр, аерометр.

Теоретичні відомості

При витіканні з балона води, об'ємом V , тиск всередині балона знижується. Це зниження приводить до всмоктування через капіляр такого ж об'єму повітря. Цей об'єм знаходимо за формулою Пуазейля:

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

де r - радіус капіляра, l - довжина капіляра, Δp - різниця тисків на кінцях капіляра

$$\Delta p = \rho_{\text{вод}} g \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (2)$$

h_1 і h_2 - початковий і кінцевий рівні водяного стовпа; η - коефіцієнт в'язкості, який виникає внаслідок взаємодії між сусідніми шарами повітря, що рухаються з різними швидкостями один відносно одного, тобто із виникненням сил внутрішнього тертя.

Молекулярно-кінетична теорія дає зв'язок між коефіцієнтом в'язкості повітря η і середньою довжиною вільного пробігу хаотичного теплового руху молекул газу:

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

де λ - середня довжина вільного пробігу молекул; $\langle v \rangle$ - середня арифметична швидкість молекул; ρ - густина газу.

Враховуючи максвелівський розподіл швидкостей молекул та сил взаємодії реального газу маємо:

$$\eta = \frac{1}{2} \langle v \rangle \lambda \rho \quad (4)$$

Звідки

$$\lambda = \frac{2\eta}{\rho \langle v \rangle} \quad (5)$$

Для обчислення λ за формулою (17.5) із рівняння Менделєєва-Клапейрона знаходимо густину

$$\rho = \frac{p \mu}{RT} \quad (6)$$

Із формули Пуазейля (1) знаходимо коефіцієнт в'язкості:

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8l} \cdot \frac{\Delta p t}{V} \quad (7)$$

Середня арифметична швидкість визначається за формулою:

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

Враховуючи (6), (7), (8), матимемо:

$$\lambda = \frac{\pi r^4 \sqrt{\pi RT_{\text{клм}}}}{8lp_{\text{атм}} \sqrt{2\mu}} \cdot \frac{\Delta p t}{V} \quad (9)$$

Для визначення ефективного діаметру молекули d використовуємо співвідношення:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d^2 n} \quad (10)$$

де n - концентрація молекул, яку визначають за формулою:

$$n = L \frac{P_{\text{клм}} T_0}{P_0 T_{\text{клм}}} \quad (11)$$

де L – число Лошмідта.

Отже, ефективний діаметр, знайдемо із (10) та (11) і він буде рівний:

$$d = \frac{P_0 T_{\text{клм}}}{\sqrt{2\pi L P_{\text{атм}} T_0}} \quad (12)$$

Послідовність виконання роботи

1. Заповнити посудину на $\frac{3}{4}$ її об'єму і відміряти рівень води.
2. Відкрити нижній кран блока так, щоб вода витікала краплями. Підкласти мірну посудину об'ємом V , ввімкнути секундомір.
3. Після заповнення мірної посудини водою, зупинити секундомір, закрити кран і відмітити новий рівень води h_2 . Якщо немає мірної посудини, то об'єм води, що витекла, визначають так:
 - а) зважити посудину, яку підкладають під кран порожньою (P_0 -вага порожньої посудини);
 - б) потім зважити посудину з водою (P_1 - вага посудини з водою);
 - в) значення різниці $P_1 - P_0$ є масою води, що витекла:

$$m_{\text{вод}} = P_1 - P_0$$

Знаючи масу $m_{\text{вод}}$, знаходимо об'єм води:

$$V = \frac{m_{\text{вод}}}{\rho_{\text{вод}}}$$

4. Дослід повторити 3 рази.
5. Значення величин V , h_1 та h_2 занести в таблицю.
6. Обчислити різницю тисків Δp за формулою:

$$\Delta p = \rho_{\text{вод}} g \frac{h_1 + h_2}{2}$$
7. Обчислити за формулою (9) середню довжину вільного пробігу молекул повітря λ ;
8. Вивести формулу для визначення відносної похибки вимірювання.
9. За формулою (12) обчислити ефективний діаметр d ;
10. Вивести формулу для визначення відносної похибки вимірювання.

Контрольні запитання

1. Молекулярний рух. Пояснення зіткнення молекул на основі молекулярно-кінетичної теорії.
2. Середнє число зіткнень молекул за одиницю часу. Середня довжина вільного пробігу молекул. Ефективний діаметр молекул газу.
3. Залежність довжини вільного пробігу та ефективного діаметру молекул газу від температури і тиску.

4. Теорія методу. Формула Пуазейля, її використання для визначення середньої довжини вільного пробігу молекул повітря. Вивести робочу формулу.

Звіт за виконану роботу

1. Робочі формули

$$\Delta p = \rho_{\text{вод}} g \frac{h_1 + h_2}{2} \quad (2) - \text{різниця тисків на кінцях капіляра} [\Delta p] = \text{Па};$$

$$\lambda = \frac{\pi r^4 \sqrt{\pi R T_{\text{кім}}}}{8 l p \sqrt{2 \mu}} \cdot \frac{\Delta p t}{V} \quad (9) - \text{середня довжина вільного пробігу молекул повітря} [\lambda] = \text{м}$$

$$d = \frac{p_0 T_{\text{кім}}}{\lambda \sqrt{2 \pi L P_{\text{атм}} T_0}} \quad (12) - \text{ефективний діаметр} [d] = \text{м}$$

2. Табличні величини

L- число Лешмідта , L=2,7-1025 м-3;

r- радіус капіляра, r=5*10-4м ;

l - довжина капіляра , l=0,135 м ;

μ - маса одного моля повітря, μ=29*10-3 кг/моль;

ρ- густина води, ρ=103 кг/м3 ;

V- об'єм мірної посудини , V=50мл=5*10-5м3;

R –універсальна газова стала [R]=8,31 Дж/(моль*K) ;

p_0, T_0 – тиск і температура при нормальних умовах $p_0 = 10^5$, $T_0 = 273\text{K}$.

Таблиця 1

№	h ₁ , м	H ₂ , м	t, с	P _{атм} , Па	T _{кім} , К	λ, м	d, м	ε%	Δλ

3. Обчислимо значення λ:

а). $\lambda = \frac{\pi r^4 \sqrt{\pi R T_{\text{кім}}}}{8 l p \sqrt{2 \mu}} \cdot \frac{\Delta p t}{V}$

б). Обчислення відносної похибки

$$\ln \lambda = \ln(\Delta p) + \ln t - \ln V$$

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{d(\Delta p)}{\Delta p} + \frac{dt}{t} - \frac{dV}{V}$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\Delta(\Delta p)}{\Delta p} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta V}{V} \right) \cdot 100\%$$

в). Обчислення абсолютної похибки

$$\Delta \lambda = \varepsilon \lambda_{сер}$$

4. Висновок запишемо у такій формі:

$$\lambda = \lambda_{сер} \pm \Delta \lambda$$

Лабораторна робота №18

Тема: «**Визначення коефіцієнта лінійного
розширення твердих тіл методом
Менделєєва**»



Експериментальна установка

1 – пробікотримач; 2 – пробірки; 3 – металеві стержні; 4 – індикатор
годинникового типу; 5 – нагрівач.

Мета роботи: ознайомитися з класичними методами визначення коефіцієнта об'ємного розширення гліцерину та коефіцієнтів лінійного розширення стержнів різних металів.

Прилади і матеріали: прилад Дюлонга і Пті, електроплитка, колба з водою, гумова трубка, посуд для збору конденсованої пари, термометр, барометр, три металеві стержні (залізо, мідь), пробірки, пінцет з дерев'яною ручкою, пробірко-тримач, масштабна лінійка.

Теоретичні відомості

Визначення коефіцієнта лінійного розширення металевих стержнів.

При нагріванні твердих тіл з ростом температури зростає енергія теплового руху, а отже, і середня відстань між атомами. Тобто, внаслідок коливних рухів атомів навколо свого положення рівноваги, збільшується об'єм твердих тіл. Якщо б частинки твердого тіла здійснювали гармонічні коливання, то тверді тіла не повинні були б розширюватися при нагріванні. Для різних кристалографічних напрямів відстані між структурними частинами різні, а отже, різні і сили притягання та відштовхування між ними. Тому теплове розширення твердих тіл має анізотропний характер. Кількісною характеристикою теплового розширення є коефіцієнт лінійного розширення α - це величина, яка дорівнює відношенню відносного видовження $\Delta l/l_0$ тіла до зміни температури ΔT , яка зумовила це видовження:

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} = \frac{l}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T}; \quad (1)$$

де l_0 - довжина тіла при 0°C .

Користуватись формулою (1) для визначення α незручно, бо важко створити нульову температуру для визначення l_0 . В даній роботі маємо металевий стержень циліндричної форми:

$$V_1 = S \cdot l_1 \quad (2)$$

де S – площа поперечного перерізу, l_1 – довжина стержня при T_1 .

При зростанні температури до T_2 , об'єм збільшується до величини:

$$V_2 = S \cdot l_2 \quad (3)$$

де l_2 - довжина стержня при температурі T_2 враховуючи, що

$$V_1 = \frac{m}{\rho_1}, \quad V_2 = \frac{m}{\rho_2}$$

в рівностях (2) та (3)

$$\frac{m}{\rho_1} = S l_1 \quad \frac{m}{\rho_2} = S l_2$$

знайдемо відношення збільшення об'єму:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \quad (4)$$

Оскільки

$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{1+\alpha T_1} \quad \rho_2 = \frac{\rho_0}{1+\alpha T_2} \quad (5)$$

рівність (4) матиме вигляд :

$$\frac{l_2}{1+\alpha T_2} = \frac{l_1}{1+\alpha T_1} \quad (6)$$

Із (6) знаходимо:

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1 T_2 - l_2 T_1} = \frac{\Delta l}{l_1 T_2 - l_2 T_1} \quad (7)$$

Послідовність виконання роботи

1. З допомогою масштабної лінійки визначити початкову довжину стержня l_1 (мм) і занести в таблицю.
2. Налити в пробірку води, вкласти в неї стержень з алюмінію.
3. Пробірку розмістити в теплоізолювану колбу нагрівача, затискачем індикатора годинникового типу закріпити стержень у вертикальному положенні; гвинтом зафіксувати положення стержня, щоб позначка індикатора була рівна нулю.
4. Ввімкнути в мережу нагрівач.
5. Зачекати, щоб вода в колбі закипіла. За цей час за спеціальною таблицею знайти температуру кипіння води T_2 (К), попередньо визначивши атмосферний тиск $P_{атм}$ за показами барометра. Значення T_2 , $P_{атм}$ та кімнатну температуру T_1 занести у таблицю 1.
6. Після моменту закипання води зняти покази індикатора, тобто величину відносного видовження Δl і занести в таблицю 1.
7. Вимкнути з мережі нагрівач.
8. З допомогою пінцета вийняти пробірку і вкласти в пробіркотримач.
9. Повторити пункти 1-7 для стержнів із заліза та міді. Результати вимірювання занести в таблицю 1.
10. Вимірявши величини, l_1 та Δl знаходимо значення l_2 за формулою:
$$l_2 = l_1 + \Delta l$$
11. Обчислити за формулою (7) коефіцієнт лінійного розширення α двох зразків.

Контрольні завдання

1. Молекулярно-фізичне тлумачення теплового розширення твердих тіл.
2. Визначення коефіцієнта об'ємного розширення рідин методом Дюлонга-Пті. Теорія методу. Виведення робочої формули.
3. Визначення коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл методом Менделєєва. Теорія методу. Робоча формула.

Звіт за виконану роботу

1. Робочі формули :

$$\alpha = \frac{l_2 - l_1}{l_1 T_2 - l_2 T_1} = \frac{\Delta l}{l_1 T_2 - l_2 T_1} \quad (7)$$

коефіцієнт лінійного розширення гліцерину[α] = K^{-1} ;

Таблиця 1

№	Матеріал	$l_1, м$	$l_2, м$	$\Delta l, м$	T_1, K	T_2, K	α, K^{-1}	$\varepsilon \%$
1	Залізо							
2	мідь							

$$\alpha_3 = \frac{\Delta_3}{l_{13} T_2 - l_{23} T_1}$$

$$\alpha_M = \frac{\Delta_{3M}}{l_{1M} T_2 - l_{2M} T_1}$$

2. Обчислення $\varepsilon \%$

$$\ln \alpha = \ln \frac{\Delta l}{l_1 T_2 - l_2 T_1} = \ln \Delta l - \ln(l_1 T_2 - l_2 T_1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\alpha}{\alpha} &= \frac{d\Delta l}{\Delta l} - \frac{1}{l_1 T_2 - l_2 T_1} d(l_1 T_2 - l_2 T_1) = \frac{d\Delta l}{\Delta l} - \frac{1}{l_1 T_2 - l_2 T_1} [d(l_1 T_2) - d(l_2 T_1)] = \\ &= \frac{d\Delta l}{\Delta l} - \frac{1}{l_1 T_2 - l_2 T_1} [dl_1 T_2 + dT_2 l_1 - dl_2 T_1 - dT_1 l_2]; \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} - \frac{1}{l_1 T_2 - l_2 T_1} [\Delta l_1 T_2 + \Delta T_2 l_1 - \Delta l_2 T_1 - \Delta T_1 l_2];$$

$$\frac{\Delta \alpha_3}{\alpha_3} = \frac{\Delta(\Delta l_3)}{\Delta l_3} - \frac{1}{l_{13} T_2 - l_{23} T_1} [\Delta l_{13} T_2 + \Delta T_2 l_{13} + \Delta l_{23} T_1 + \Delta T_1 l_{23}]$$

$$\frac{\Delta \alpha_M}{\alpha_M} = \frac{\Delta(\Delta l_M)}{\Delta l_M} - \frac{1}{l_{1M} T_2 - l_{2M} T_1} [\Delta l_{1M} T_2 + \Delta T_2 l_{1M} + \Delta l_{2M} T_1 + \Delta T_1 l_{2M}]$$

$$\varepsilon = \frac{1}{l_{1M} T_2 - l_{2M} T_1} [\Delta l_{1M} T_2 + \Delta T_2 l_{1M} + \Delta l_{2M} T_1 + \Delta T_1 l_{2M}] \cdot 100\%$$

$$\varepsilon = \frac{1}{l_{13} T_2 - l_{23} T_1} [\Delta l_{13} T_2 + \Delta T_2 l_{13} + \Delta l_{23} T_1 + \Delta T_1 l_{23}] \cdot 100\%$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\Delta \alpha_3}{\alpha_3} \cdot 100\% ;$$

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta \alpha_M}{\alpha_M} \cdot 100\% ;$$

3. Обчислюємо:

$$\Delta \alpha_3 = \varepsilon_3 \cdot \alpha_3 ;$$

$$\Delta \alpha_M = \varepsilon_M \cdot \alpha_M ;$$

4. Виразуємо:

$$\alpha_3 = \alpha_3 \pm \Delta\alpha_3 ;$$

$$\alpha_m = \alpha_m \pm \Delta\alpha_m ;$$

5. Висновок записати у такому вигляді:

$$\alpha_3 = \alpha_{3сер} \pm \Delta\alpha_3$$

$$\alpha_m = \alpha_{mсер} \pm \Delta\alpha_m$$

Зміст

Знаходження похибок вимірювання і обчислення шуканих величин.....	4
Лабораторна робота № 1. Визначення коефіцієнта в'язкості повітря капілярним методом.....	8
Лабораторна робота № 2. Визначення розмірів молекули рицинової олії.....	16
Лабораторна робота № 3. Визначення коефіцієнта теплопровідності повітря.....	20
Лабораторна робота № 4. Визначення питомої теплоємності рідин електрокалориметром.....	26
Лабораторна робота № 5. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом Ребіндера.....	30
Лабораторна робота № 6. Визначення відношення теплоємності повітря при сталих тиску і об'єму.....	34
Лабораторна робота № 7. Вивчення залежності швидкості звуку в повітрі від температури і визначення відношення теплоємностей $\gamma = C_p/C_v$	41
Лабораторна робота № 8. Визначення теплоємності твердих тіл.....	47
Лабораторна робота № 9. Визначення в'язкості рідин методом Стокса.....	52
Лабораторна робота № 10. Визначення вологості повітря. Гігрометри та психметри.....	56
Лабораторна робота № 11. Визначення зміни ентропії при плавленні олова.....	61
Лабораторна робота № 12. Визначення молярної маси повітря методом відкачування.....	65
Лабораторна робота № 13. Визначення кристалізації твердих тіл методом кривої охолодження.....	70
Лабораторна робота № 14. Фазовий перехід першого роду на прикладі переходу води в пару при температурі кипіння.....	74
Лабораторна робота № 15. Визначення критичної температури етилового спирту.....	78
Лабораторна робота № 16. Перевірка основних та проміжних точок ртутного термометра.....	82
Лабораторна робота № 17. Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметру молекул повітря.....	85
Лабораторна робота № 18. Визначення коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл методом Менделєєва.....	90
ЗМІСТ.....	95

ДЛЯ НОТАТОК