

ур

Міністерство освіти України  
Прикарпатський університет ім.Василя Стефаника  
кафедра фізики твердого тіла

Лисак А.В., Фреїк Д.М., Класічка В.М.

# Фізичний практикум

Молекулярна фізика

Для студентів спеціальності 7.070101.  
"Фізика"

Івано-Франківськ – 1998 р.

## Лабораторний експеримент №1

### Визначення відношення теплоємностей газу методом Клемана - Дезорма



**Мета:** Ознайомитись з одним із методів практичного визначення відношення  $c_p/c_v$  для повітря.

**Прилади і матеріали:** аспіратор, нагнітальний насос, кран, манометр,

штатив.

### Нотатки з теорії

1. Теплоємністю речовини називається кількість теплоти, яку необхідно надати деякій масі речовини для підвищення її температури на один градус.

Молярна теплоємність речовини – величина, яка вимірюється кількістю теплоти, яку слід надати одному молю речовини для нагрівання її на один градус.

Щільна теплоємність вимірюється тією теплотою, яку треба надати одиниці маси речовини для збільшення її температури на один градус.

Зв'язок між молярною ( $C$ ) та питомою ( $c$ ) теплоємностями:

$$C = \mu c \quad (1)$$

де  $\mu$  - молярна маса.

В системі СІ одиниці вимірювання теплоємностей такі:

для питомої -  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right]$ , для молярної -  $\left[ \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \right]$

Для ізопроеців теплоємності речовин різні. Розрізняють:

$C_p$  - при ізобаричному процесі,

$C_v$  - при ізохоричному процесі,

$C_T$  - при ізотермічному процесі,

$C_{Ad}$  - при адиабатному процесі,

Стан речовини зі сталою теплоємністю ( $C = \text{const}$ ) відповідає політропному процесу.

У фізичних процесах важливими є теплоємності при сталому тиску та сталому об'ємі.

Причому,  $C_p > C_v$ , тому що:

1) при ізохоричному ( $V = \text{const}$ ) нагріванні газу вся теплота, надана газу, йде на збільшення його внутрішньої енергії;

2) при ізобаричному ( $p = \text{const}$ ) нагріванні, окрім збільшення внутрішньої енергії, відбувається розширення газу, тобто здійснюється робота проти зовнішніх сил за рахунок додаткової кількості теплоти  $dQ$

$$\begin{cases} Q_V = C_V m dT \\ Q_P = C_P m dT \end{cases} \quad (2)$$

Різниця  $dQ$ , яка йде на роботу по розширенню газу рівна:

$$dQ = Q_P - Q_V = (C_P - C_V) m dT, \quad (3)$$

За рахунок цієї теплоти здійснюється робота:

$$dQ = dA = \frac{m}{\mu} R dT, \quad (4)$$

Порівнюючи (3) та (4), маємо:

$$(c_p - c_v) m dT = \frac{m}{\mu} R dT, \quad (5)$$

Звідки

$$\mu c_p - \mu c_v = R - \text{рівняння Майєра} \quad (6)$$

або, через молярні теплоємності

$$C_p - C_v = R, \quad C_p = C_v + R, \quad (7)$$

Для реальних газів різниця теплоємностей може відрізнитися від  $R$ . Це зумовлено тим, що внутрішня енергія реальних газів залежить не тільки від температури, а й від об'єму, який займає.

## 2. Зв'язок теплоємностей з числом ступенів вільності.

Числом ступеней вільності ( $i$ ) називається число незалежних координат, які визначають положення тіла в просторі. По три ступені вільності мають поступальний, обертальний та коливальний рухи:

- а) молекули одноатомних газів можуть здійснювати три незалежних рухи вздовж координатних осей, тому  $i=3$ .
- б) молекули двоатомних газів окрім поступальних рухів, здійснюють ще два обертальні рухи навколо двох перпендикулярних осей, тому  $i=5$ .
- в) для молекул багатоатомних газів  $i=6$ .

Якщо газ нагрівається при сталому об'ємі, то вся теплота згідно першого закону термодинаміки, йде на збільшення його внутрішньої енергії:

$$dQ = dU, \quad (8)$$

Якщо при деякій температурі  $T$  внутрішня енергія рівна:

$$U = \frac{i}{2} R T, \quad (9)$$

то при нагріванні газу на 1 градус вона збільшиться до величини:

$$U = \frac{i}{2} R (T + 1), \quad (10)$$

тобто зросте на величину:

$$dU = \frac{i}{2} R, \quad (11)$$

Перепишемо рівність (8):

$$dQ = dU,$$

$$C_V dT = \frac{i}{2} R dT,$$

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad (12)$$

$$C_P = \frac{i+2}{2} R, \quad (13)$$

$$\gamma = \frac{\mu C_P}{\mu C_V} = \frac{C_P}{C_V} = \frac{i+2}{i}, \quad (14)$$

Для одноатомного газу  $\gamma = 1.67$ ; для двоатомного  $\gamma = 1.40$ ; для багатоатомного газу  $\gamma = 1.33$ .

## Теорія методу

**I стан повітря ( $P_1 V_1 T_{кім}$ ).** Аспіратор наповнений повітрям при атмосферному тиску  $p_{атм}$ . При нагнітанні насосом маса повітря в балоні займе менший об'єм  $V_1$ , стиснеться до деякого тиску  $p_1$  та нагріється до температури більшої за кімнатну  $T_1 > T_{кім}$ . Припинення накачування приведе до вирівнювання температури  $T_1 = T_{кім}$ . При цьому різниця рівнів  $h_1$ , яка встановилася в манометрі, дає можливість знайти тиск

$$p_1 = p_{атм} + h_1.$$

**II стан повітря ( $P_2 V_2 T_2$ ).** На короткий час відкриваємо кран аспіратора, щоб тиск в ньому зрівнявся з атмосферним  $p_2 = p_{атм}$  (рівні рідин у манометрі зрівнялися). Закриваємо кран. Повітря в балоні швидко розширюється до об'єму  $V_2$  (через малий час розширення теплобіну між стінками балона і навколишнім повітрям не буде). Температура повітря при розширенні зменшиться до деякого значення  $T_2$ .

**III стан повітря ( $P_3 V_3 T_{кім}$ ).** Через деякий час температура повітря в аспіраторі зрівняється з кімнатною  $T_2 = T_{кім}$ . Оскільки об'єм залишився сталим  $V_2$ , то при нагріванні повітря збільшиться його тиск

$$p_3 = p_{атм} + h_2 \quad (1)$$

де  $h_2$  – різниця рівнів води, що встановилася в манометрі.

Перехід зі стану I у стан II є адіабатичним, тому можна записати рівняння Пуасона :

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \quad (2)$$

Температури в I та III станах однакові (рівні  $T_{кім}$ ), то згідно закону Бойля - Маріотта маємо:

$$p_1 V_1 = p_3 V_3 \quad (3)$$

Розв'яжемо систему рівнянь (2) – (3) відносно  $\gamma$ :

$$\begin{cases} p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \\ p_1 V_1 = p_3 V_3 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^\gamma \\ \frac{p_1}{p_3} = \frac{V_2}{V_1} \end{cases} \Rightarrow \Rightarrow \frac{p_1}{p_2} = \left( \frac{p_1}{p_3} \right)^\gamma, \quad (4)$$

Прологарифмуємо рівність (4):

$$\gamma \lg \frac{p_1}{p_2} = \lg \frac{p_1}{p_3}, \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{\lg \frac{p_1}{p_2}}{\lg \frac{p_1}{p_3}} = \frac{\lg p_1 - \lg p_2}{\lg p_1 - \lg p_3}, \quad (6)$$

Розкладемо  $\lg P_1$ ,  $\lg P_3$  в ряд Тейлора та обмежимося двома першими членами:

$$\lg p_1 = \lg(p_{атм} + h_1) = \lg p_{атм} + \frac{h_1}{p_{атм}} + \dots$$

$$\lg p_3 = \lg(p_{атм} + h_2) = \lg p_{атм} + \frac{h_2}{p_{атм}} + \dots, \quad (7)$$

Враховуючи, що  $P_2 = P_{атм}$ , отримаємо :

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}, \quad (8)$$

### Хід роботи

- З допомогою насоса накачати в аспіратор повітря, щоб у манометрі була значна різниця рівнів рідин. Зафіксувати різницю рівнів  $h_1$ , що встановилася після охолодження повітря, нагрітого при стиску, до кімнатної температури.
- Відкрити і швидко закрити кран аспіратора. Через кілька хвилин зафіксувати різницю рівнів манометра  $h_2$ .

3. Дослід повторити 5-6 разів. За формулою (8) обчислити відношення теплоємностей  $\gamma$ .

### Обробка результатів вимірювання

№	$h_1$ , мм.вод.ст	$h_2$ , мм.вод.ст	$\gamma_{ср}$	$\epsilon$ , %	$\Delta\gamma$
1	*	*			
2	*	*			
3	*	*			
4	*	*			
5	*	*			
ср.	*	*	*	*	*

- Вивести формулу для знаходження відносної похибки вимірювання та скласти програму її обчислення на калькуляторі.
- Записати кінцевий результат  $\gamma = \gamma_{ср} \pm \Delta\gamma$  та порівняти із табличними значеннями.

### Контрольні запитання

- Внутрішня енергія газу. Теплоємності: молярна і питома, теплоємність при сталому об'ємі  $C_V$  та при сталому тиску  $C_P$ .
- Зв'язок теплоємностей одно-, дво- та багатоатомних газів із числом ступеней вільності.
- Обчислити відношення теплоємностей  $C_P/C_V$  для газів.
- Термодинамічні процеси (ізотермічний, ізобаричний, ізохорний, адіабатичний) та використання їх закономірностей в методиці визначення  $C_P/C_V$ .



Вивести робочу формулу:

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}$$

### Література

1. Дущенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1981. – С.197–199.
2. Гершензон Е.М., Малова Н.Н. Лабораторный практикум по общей физике. – М.: Просвещение, 1985. – С.295 – 298.
3. Кортнев А.В. и др. Практикум по физике. – М.: Высшая школа, 1965. – С.138–142.

## Лабораторний експеримент №2

### Визначення коефіцієнта динамічної в'язкості повітря



**Мета:** Навчитись одному із методів визначення коефіцієнта динамічної та кінематичної в'язкості повітря.

**Прилади і матеріали:** аспіратор, капіляр, осушувач, манометр, крани, вода, мірна посудина, секундомір, термометр, лоток під воду.

### Нотатки з теорії

Між шарами газу, що переміщуються паралельно один одному з різними за величиною швидкостями, виникають сили тертя:

$$F = \eta \left| \frac{dU}{dz} \right| S \quad (1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;

$\left| \frac{dU}{dz} \right|$  – модуль градієнта швидкості руху газу в напрямку перпендикулярному до потоку газу;

$S$  – площа між сусідніми шарами, на яку по дотичній діє сила  $F$ .

Явище виникнення таких сил називають внутрішнім тертям (або в'язкістю). З формули (1) випливає, що

|| коефіцієнт внутрішнього тертя чисельно рівний силі, яка діє по дотичній на  $1 \text{ см}^2$  площі, взятої на межі між шарами, що рухаються один відносно одного при градієнті швидкості  $1 \text{ см/сек}$  на  $1 \text{ см}$ .

Взаємодія між шарами здійснюється перенесенням імпульсу з одного шару в інший. При переході із шару з більшою швидкістю в шар з меншою швидкістю молекули переносять з собою більший імпульс, прискорюючи рух одного шару і навпаки. Імпульс кожної молекули можна розкласти на дві складові, одна з яких зумовлена хаотичним рухом молекул (з швидкістю  $\langle V \rangle$ ), а друга - поступальним рухом (з швидкістю  $U$ ).

|| Причиною внутрішнього тертя є накладання впорядкованого руху шарів з різними швидкостями  $U$  на хаотичний тепловий рух з швидкостями  $\langle V \rangle$ .

Розглядаючи явище внутрішнього тертя як процесу передачі імпульсу можна дати нове фізичне тлумачення коефіцієнту динамічної в'язкості. Для цього розрахуємо повну зміну імпульсу шару. Вона рівна зміні імпульсу одної молекули при переході з одного шару в інший, помножений на число молекул, що пролітають через площу  $S$  між шарами:

$$dp = dp_i \cdot N, \quad (2)$$

де  $dp_i$  – зміна імпульсу  $i$ -тої частки рівна:

$$dp_i = 2m_0 \left| \frac{dU}{dz} \right| \lambda, \quad (3)$$

де  $m_0$  – маса однієї молекули,  
 $\lambda$  – середня довжина вільного пробігу молекули.

Число  $N$  молекул, що проходять через площадку  $S$  обчислюють за формулою :

$$N = nV, \quad (4)$$

де  $V$  – об'єм, який вибирають як прямокутний паралелепіпед з основою  $S$  і висотою  $h = \langle V \rangle t$ , яка за одиницю часу рівна швидкості теплового руху молекул  $h = \langle V \rangle$ . Тобто,  $V = S \langle V \rangle$ ;  
 $n$  – концентрація молекул.

Оскільки всі напрямки руху рівномірні, то через площу  $S$  за одиницю часу пролетить третина всіх молекул (зокрема,  $1/3$  молекул, що рухаються у вертикальному напрямку, половина з них рухається вгору, половина - вниз).



Тому, загальне число молекул, що пройшли в певному напрямку за час  $\Delta t$  рівне:

$$N = \frac{1}{6} n S \langle V \rangle \Delta t, \quad (5)$$

Отже, повна зміна імпульсу (2) за час  $\Delta t$ :

$$dp = 2m_0 \left| \frac{dU}{dz} \right| \lambda \cdot \frac{1}{6} n S \langle V \rangle \Delta t, \quad (6)$$

Зміна імпульсу за одиницю часу рівна силі, то

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{1}{3} m_0 n \left| \frac{dU}{dz} \right| \lambda S \langle V \rangle, \quad (7)$$

Враховуючи, що  $m_0 n = \rho$  – густина газу, то формула (7) матиме вигляд:

$$F = \frac{1}{3} \rho \lambda S \langle V \rangle \left| \frac{dU}{dz} \right|, \quad (8)$$

Порівнюючи вирази для сил за формулою (8) та формулою Ньютона (1) знаходимо вираз для коефіцієнта динамічної в'язкості повітря:

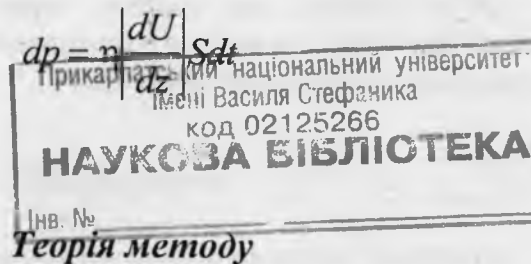
$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle V \rangle \lambda, \quad (9)$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості – це імпульс, який переноситься молекулами у шар одиничної площі за одиницю часу при градієнті швидкості 1 м/с на 1 м.

Це видно з формули Ньютона :

$$F = \eta \left| \frac{dU}{dz} \right| S$$

$$F dt = \eta \left| \frac{dU}{dz} \right| S dt$$



Для визначення коефіцієнта динамічної в'язкості повітря при закритому верхньому кранові аспіратора відкривають нижній кран. Через витікання води тиск в балоні зменшиться і в нього через капіляр буде засмоктуватися повітря. Швидкості руху шарів повітря на різних відстанях від осі капіляра будуть різними. Найбільша швидкість буде на осевій лінії капіляра. Оскільки швидкості різні, то має місце сила внутрішнього тертя. На кінцях капіляра буде різниця тисків (тиск на вході більший, на виході менший). Різниця

тисків буде постійною, якщо встановиться ламінарна течія (така течія, при якій швидкість руху газу в напрямку, перпендикулярному до осі трубки рівна нулю). Швидкість витікання води можна відрегулювати так, щоб течія була ламінарною, тобто покази манометра будуть постійними. Це означає, що різниця тисків повітря на кінцях капіляра є постійною:

$$\Delta p = p - p_1 = h \cdot 9,81 \text{ Па} \quad (10)$$

де  $p$  і  $p_1$  – тиск повітря за межами аспіратора і всередині аспіратора відповідно;

$h$  – покази манометра (в мм.вод.ст.).

Об'єм повітря, що протікає через капіляр за час  $t$  рівний об'єму води, що витікає з нижнього крану аспіратора і обчислюється за формулою Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 \eta l}, \quad (11)$$

де  $r$  – радіус капіляра;  
 $l$  – довжина капіляра.

Із рівності (11) маємо:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 V l}, \quad (12)$$

або

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8 l} \cdot \frac{\Delta p t}{V}, \quad (13)$$

Знаючи коефіцієнт динамічної в'язкості, можна визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості:

$$D = \frac{\eta}{\rho_{нов}}, \quad (14)$$

де  $\rho_{нов}$  – густина повітря при кімнатній температурі.

### Хід роботи

1. Підкласти лоток під нижній кран аспіратора. Підібрати такий режим витікання води, щоб покази манометра ( $h$ ) залишалися постійними.
2. При встановленій ламінарній течії підкласти під кран мірну посудину об'ємом  $V$  і одночасно увімкнути секундомір і визначити час ( $t$ ) до повного заповнення посудини.

- Знаючи  $h$  (мм.вд.ст.) за формулою (10) знайти різницю тисків  $\Delta p$  і записати в таблицю.
- Дослід провести 3 рази при різних показках  $h$ .

### Обробка результатів вимірювання

1.

№	$\Delta p = h \cdot 9.81,$ Па	$t,$ с	$\eta,$ Па·с	$\epsilon, \%$	$\Delta \eta = \epsilon \eta,$ Па·с	$D =$ $= \eta / \rho_{\text{пов}},$ $\text{м}^2 \text{сек}$
1	*	*				
2	*	*				
3	*	*				
сер.	*	*	*	*	*	*

#### Взяти до відома:

$$r = 4.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$l = 0.205 \text{ м}$$

$$V = 50 \text{ мл} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$\rho_{\text{пов}} (\text{при } T_{\text{квм}}) = 1.293 \text{ кг/м}^3$$

- За формулою (13) обчислити коефіцієнт динамічної в'язкості  $\eta$ .
- Обчислити відносну та абсолютну похибки для  $\eta$ .
- За формулою (14) обчислити коефіцієнт кінематичної в'язкості  $D$ .
- Записати кінцевий результат  $\eta = \eta_{\text{сер}} \pm \Delta \eta$  та висновок.

### Контрольні запитання

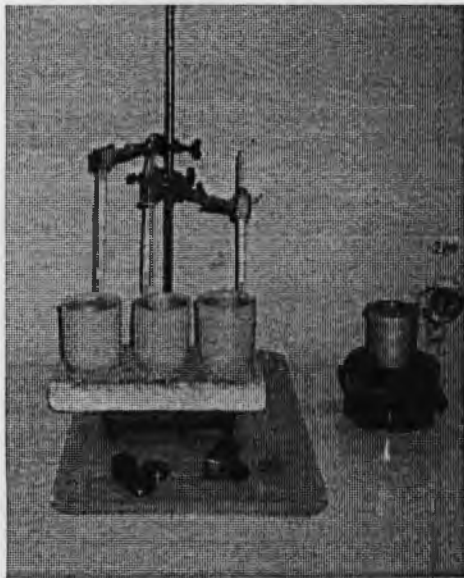
- Явища переносу. Внутрішнє тертя в газах.
- Коефіцієнт динамічної та кінематичної в'язкості газу.
- Залежність коефіцієнта в'язкості від температури і тиску газу.
- Теорія методу. Формула Пуазейля та робоча формула.

### Література

- Ноздр'єв В.Ф. Практикум по общей физике. – М.: Просвещение, 1971. – С.145–148.
- Кембровский Г.С. Физический практикум. – Минск: Изд. Университетское, 1986. – С.132–134.
- Гапчин Б.М., Дутчак Я.Й. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум. – Львів: Світ, 1990. – С.116–17.

## Лабораторний експеримент №3

### Зміна ентропії в реальних системах



**Мета:** Навчитись визначати зміну ентропії та показати її залежність від маси та питомої теплоємності тіла.

**Прилади і матеріали:** один штатив; три термометри; три калориметри; нагрівач; посудина з водою; три зразки однакової маси, але різної густини (алюміній, залізо, латунь); три зразки різної маси, але однакової

густини (латунь); гачок для виймання зразків.

#### Теорія методу

Якщо в калориметр, що містить деяку кількість води при кімнатній температурі ( $T_1$ ) опустити тіло, нагріте до вищої температури ( $T_2$ ), то відбудеться теплообмін і встановиться деяка спільна температура.

Наявність зовнішньої посудини калориметра робить систему майже адіабатно ізольовану, а ступінь оборотності процесу визначають за зміною ентропії:

$$dS = mc \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (1)$$

де  $c$  – питома теплоємність тіла (для рідин і твердих тіл  $c_V = c_P = c$ ),

$T_1$  і  $T_2$  – початкова і кінцева температури відповідно.

Якщо система складається з декількох тіл, то зміна ентропії всієї системи рівна зміні ентропії всіх складових:

$$dS = \sum_{i=1}^n dS_i, \quad (2)$$

де  $dS_i$  – зміна ентропії одного тіла,  
 $n$  – кількість тіл.

В даній роботі система складається :

- 1) з калориметричної посудини масою  $m_k$ , питомою теплоємністю  $c_k$  та початковою температурою  $T_0$
- 2) води в калориметрі масою  $m_w$ , питомою теплоємністю  $c_w$  температурою  $T_0$ ;
- 3) тіла масою  $m_t$ , питомою теплоємністю  $c_t$  і початковою температурою  $T_1$  (температура пари води, що кипить).

Після закінчення процесу теплообміну і вирівнювання температур до деякого значення  $T$  запишемо:

$$dS = dS_1 + dS_2 + dS_3, \quad (3)$$

$$dS_1 = m_k c_k \ln \frac{T}{T_0},$$

$$dS_2 = m_o c_o \ln \frac{T}{T_0},$$

$$dS_3 = m_T c_T \ln \frac{T}{T_1}.$$

Отже, зміна ентропії всієї системи рівна:

$$dS = (m_k c_k + m_o c_o) \ln \frac{T}{T_0} + m_T c_T \ln \frac{T}{T_1}, \quad (4)$$

### Хід роботи

I.

1. Налити у три калориметри по 100 мл (0.1 кг) води. Записати в таблиці 1–3 значення  $T_0$ .
2. Увімкнути нагрівач, на якому знаходиться посудина з водою, попередньо опустивши туди три зразки однакової маси, але різної густини (алюміній, залізо, латунь).

3. Після того, як закипить вода ( $T_1$ ), зачекати не менше трьох хвилин. Потім за допомогою гачка зразки опустити по одному в калориметри.
4. За показами трьох термометрів слідкуйте за зростанням температур. Зафіксуйте максимальні значення температур ( $T$ ) і запишіть їх в таблиці 1–3.

II.

1. Налити у три калориметри по 150 мл (0.15 кг) води.
2. Повторити операції, перераховані в пунктах I.2-4, для трьох зразків різної маси, але однакової густини (латунь).
3. Значення  $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T$  занести в таблицю 4.

### Обробка результатів вимірювання

#### I система (калориметр + вода + алюміній)

Табл.1

№	$T_0$ , К	$T_1$ , К	$T$ , К	$dS$ , Дж/К	$\epsilon$ , %	$\Delta(dS)$ , Дж/К
1	*	*	*	*	*	*

#### II система (калориметр + вода + залізо)

Табл.2

№	$T_0$ , К	$T_1$ , К	$T$ , К	$dS$ , Дж/К	$\epsilon$ , %	$\Delta(dS)$ , Дж/К
1	*	*	*	*	*	*

### III система (калориметр + вода + латунь)

Табл.3

№	T <sub>0</sub> , К	T <sub>1</sub> , К	T, К	dS, Дж/К	ε, %	Δ(dS), Дж/К
1	*	*	*	*	*	*

#### Взяти до уваги:

Маси тіл із:

Маси калориметрів:

алюмінію  $m_{ал} = 30.75 \cdot 10^{-3}$  кг $m_{к1} = m_{к2} = m_{к3} = m_{к} = 68.42$  кгзаліза  $m_{зал} = 30.8 \cdot 10^{-3}$  кглатуні  $m_{лат} = 30.4 \cdot 10^{-3}$  кгводи  $m_{вод} = 0.1$  кг

Теплоємності:

води

 $C_B = 4.187 \cdot 10^3$  Дж/кг К

алюмінію

 $C_A = 879$  Дж/кг К

заліза

 $C_3 = 498$  Дж/кг К

латуні

 $C_л = 384$  Дж/кг К

### Система (три калориметри + вода + 3 зразки латуні різної маси)

Табл. 4

№	T <sub>0</sub> , К	T <sub>1</sub> , К	T, К	dS, Дж/К	ε, %	Δ(dS), Дж/К
1	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*

#### Взяти до відома:

Маси тіл:

$m_1 = 160 \cdot 10^{-3}$  кг

$m_2 = 65.1 \cdot 10^{-3}$  кг

$m_3 = 30.4 \cdot 10^{-3}$  кг

$m_{вод} = 0.15$  кг

- За робочою формулою (4) обчислити значення dS.
- Вивести формулу для знаходження відносної похибки ε (%), скласти програму для обчислення її на програмуючому калькуляторі.
- Побудувати графіки залежності dS від m<sub>T</sub> та c<sub>T</sub>.
- Записати кінцевий результат для всіх випадків у формі dS = dS<sub>сер</sub> ± Δ(dS), Дж/кг та висновок.

#### Контрольні запитання

- Поняття про оборотні та необоротні процеси.
- Цикл Карно.
- Перший та другий закони термодинаміки.
- Поняття про ентропію.
- Теорія методу визначення зміни ентропії:
  - при нагріванні зразків різної маси, але однакової густини,



б) при нагріванні зразків однакової маси, але різної густини.

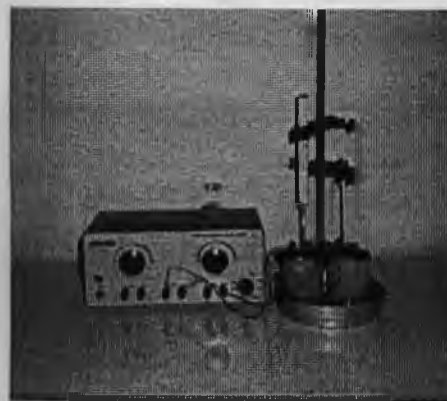
Вивести робочу формулу.

### Література

1.Евграфова Н.Н. Руководство к лабораторным работам по физике. – М.: Высшая школа, 1970.–С.82–83.

## Лабораторний експеримент №4

### Визначення питомої теплоємності рідин електрокалориметром



**Мета:** 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.

### Теорія методу

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:

$$Q_1 = (K + c_g m_g)(t_g^2 - t_g^1), \quad (2)$$

де  $K$  – тепловий еквівалент алюмінієвого калориметра

$$K = m_k c_{Al},$$

$t_g^2, t_g^1$  – кінцева і початкова температури води у калориметрі,

$c_g, c_{Al}, m_g, m_k$  – питомі теплоємності та маси води і калориметра відповідно.

Для калориметра з гліцерином:

$$Q_2 = (K + c_{gl} m_{gl})(t_{gl}^2 - t_{gl}^1), \quad (3)$$

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

Рівняння теплового балансу:

$$Q_1 = Q_2, \quad (4)$$

$$(K + c_g m_g)(t_g^2 - t_g^1) = (K + c_{gl} m_{gl})(t_{gl}^2 - t_{gl}^1), \quad (5)$$

Отже, питома теплота досліджуваного гліцерину рівна:

$$c_{gl} = \frac{1}{m_{gl}} \left[ (K + c_g m_g) \frac{t_g^2 - t_g^1}{t_{gl}^2 - t_{gl}^1} - K \right], \quad (6)$$

### *Хід роботи*

1. Занести в таблицю початкові покази термометрів ( $t_v^1$  та  $t_{gl}^1$ ).
2.
  - а) увімкнути джерело живлення;
  - б) слідкувати за показами термометрів;
  - в) після зростання температур  $\sim$  на 5-6 °С вимкнути джерело струму;
  - г) зафіксувати значення температур  $t_v^2$  та  $t_{gl}^2$  і занести їх в таблицю.

### Обробка результатів вимірювання

1.

№	$t^1_{\text{в}},$ К	$t^2_{\text{в}},$ К	$t^1_{\text{гл}},$ К	$t^2_{\text{гл}},$ К	$c_{\text{гл}},$ Дж/кг К	$\epsilon, \%$	$\Delta c_{\text{гл}},$ Дж/кг К
1	*	*	*	*	*	*	*

#### Взяти до відома:

питома теплоємність алюмінію	$c_{\text{Al}} = 8.79 \text{ Дж/кг К}$
питома теплоємність води	$c_{\text{в}} = 4.197 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг К}$
маса калориметрів	$m_{\text{к}} = 33.3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$
маса води	$m_{\text{в}} = 0.1 \text{ кг}$
маса гліцерину	$m_{\text{гл}} = 0.189 \text{ кг}$

2. Обчислити сталу калориметра (К) за формулою

$$K = m_{\text{к}} c_{\text{Al}}$$

- Розрахувати за формулою (6) значення  $c_{\text{гл}}$ .
- Вивести та обчислити формулу для знаходження відносної похибки ( $\epsilon$ ).
- Кінцевий результат записати у вигляді:

$$c_{\text{гл}} = c_{\text{гл}} \pm \Delta c_{\text{гл}}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

### Контрольні запитання

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

### Література

- Дуценко В.П. Фізичний практикум. – К: Вища школа, 1981. – С.193–195.

## Лабораторний експеримент №5

### Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом Ребіндера



**Мета:** 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, лійка, затискач для гумової трубки.

#### Теорія методу

Коли з аспіратора 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  $\sigma$  в момент відриву бульбашки рівний:

$$\sigma = Ah, \quad (1)$$

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 поданою). З формули (1):

$$A = \frac{\sigma_a}{h_a}, \quad (2)$$

Знаючи сталу приладу  $A$ , можна визначити коефіцієнт поверхневого натягу  $\sigma$  будь-якої рідини:

$$\sigma = Ah = \frac{\sigma_a}{h_a} h, \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_a \frac{h}{h_a}, \quad (4)$$

де  $h$  – висота досліджуваної рідини.

### Хід 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  $\sigma$  при кімнатній температурі ( $t_k$ , °C).
5. Знайти сталу даного приладу за формулою:

$$\sigma = \sigma_{\sigma} \frac{h}{h_{\sigma}}$$

Поміняти колбу з водою на колбу з гліцерином. Повторити пункти 2 і 3. Зафіксувати різницю показів манометра ( $h_{глі}$ ) і визначити за формулою:

$$\sigma_{глі} = A h_{глі}$$

7. Аналогічно провести дослід для інших досліджуваних речовин.

### Обробка результатів вимірювання

#### 1. Визначення сталої приладу

№	$t_{кім}$ , °C	$\sigma_{\sigma} \cdot 10^{-3}$ , Н/м	$h_{\sigma}$ , м	A, Н/м
	*	*	*	*

	°C	, Н/м	м	
1	*	*	*	*

#### 2. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу гліцерину

№	$h_{глі}$ , м	$\sigma_{глі} \cdot 10^{-3}$ , Н/м	$\epsilon$ , %	$\Delta\sigma \cdot 10^{-3}$ , Н/м
1	*			
2	*			
3	*			
ср.	*	*	*	*

а) за формулою  $\sigma_{глі} = A h_{глі}$  обчислити коефіцієнт поверхневого натягу гліцерину;

б) за формулою

$$\sigma = \sigma_{\sigma} \frac{h_{глі}}{h_{\sigma}}$$

визначити відносну похибку вимірювання.

в) кінцевий результат записати у формі

$$\sigma_{глі} = \sigma_{ср} \pm \Delta\sigma \text{ (Н/м)}$$

#### 3. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу 80% розчину спирту.

№	$h_{80\%}$ , м	$\sigma_{80\%} \cdot 10^{-3}$ , Н/м	$\epsilon$ , %	$\Delta\sigma \cdot 10^{-3}$ , Н/м
1	*			
2	*			
3	*			
ср.	*	*	*	*

а) вивести формулу для знаходження відносної похибки вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу

$$\sigma_{80\%} = \sigma_s \frac{h_{80\%}}{h_s}$$

б) результат записати у формі  $\alpha_{80\%} = \alpha_{cp} \pm \Delta\alpha$   
(Н/м)

4. Визначення коефіцієнта поверхневого натягу 60% розчину спирту.

№	$h_{60\%}$ , м	$\sigma_{60\%} \cdot 10^{-3}$ , Н/м	$\epsilon, \%$	$\Delta\sigma \cdot 10^{-3}$ , Н/м
1	*			
2	*			
3	*			
сер.	*	*	*	*

а) вивести формулу для знаходження відносної похибки вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу

$$\sigma_{60\%} = \sigma_s \frac{h_{60\%}}{h_s}$$

б) результат записати у формі  $\alpha_{60\%} = \alpha_{cp} \pm \Delta\alpha$   
(Н/м)

**Контрольні запитання**

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.

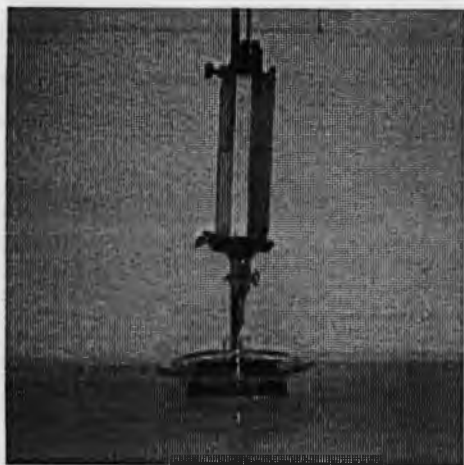
### **Література**

1. Иверонова В.И. Физический практикум.—М.: Физматгиз, 1962.—С.183–186.
2. Дущенко В.П. та ін. Фізичний практикум.—К.: Рад школа, 1965.—С.136–138.



## Лабораторний експеримент №6

### Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметру молекул повітря



**Мета:** Ознайомитись 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, барометр.

#### Теорія методу

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,  
 $\Delta p$  – різниця тисків на кінцях капіляра

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

$h_1$  і  $h_2$  – початковий і кінцевий рівні водяного стовпа;

$\eta$  – 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  $\eta$  і середньою довжиною вільного пробігу хаотичного теплового руху молекул газу:

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

де  $\lambda$  – середня довжина вільного пробігу молекул,  
 $\langle v \rangle$  – середня арифметична швидкість молекул,  
 $\rho$  – густина газу.

Враховуючи максвелівський розподіл швидкостей молекул та сил взаємодії для 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  $\lambda$  за формулою (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:

$$\lambda = \frac{\pi r^4 \sqrt{\pi RT_{к\text{і}м}}}{8l p_{\text{атм}} \sqrt{2\mu}} \cdot \frac{\Delta p t}{V}, \quad (9)$$

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:

$$n = L \frac{P_{к\text{і}м} T_0}{P_0 T_{к\text{і}м}}, \quad (11)$$

де  $L$  – число Лошмідта.

Отже, ефективний діаметр, знайдений із (10) та (11), рівний:

$$d = \frac{P_0 T_{к\text{і}м}}{\lambda \sqrt{2\pi} L p_{\text{атм}} T_0}, \quad (12)$$

### Хід роботи

1. Заповнити посудину водою на  $3/4$  її об'єму і відмітити рівень води  $h_1$ .

2. Відкрити нижній кран балона так, щоб вода витікала краплями. Підкласти мірну посудину об'ємом  $V$  і 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 витікла, визначають так:

- а) зважити посудину, яку підкладають під кран порожньою ( $P_0$  – маса порожньої посудини);
- б) затим, зважити посудину з водою ( $P_1$  – маса посудини з водою);
- в) значення різниці  $P_1 - P_0$  є масою води, що витікла:

$$m_{\text{води}} = P_1 - P_0$$

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

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

4. Дослід повторити 3 рази.
5. Значення величин  $V$ ,  $h_1$ , та  $h_2$  занести в таблицю.

### Обробка результатів вимірювання

№	$h_1$ , м	$h_2$ , м	$t$ , сек	$P_{\text{атм}}$ , Па	$T_{\text{кім}}$ , К	$\lambda$ , м	$\varepsilon$ , %	$\Delta\lambda$ , м	$d$ , м	$\varepsilon$ , %	$\Delta d$ , м
1	*	*	*								
2	*	*	*								
3	*	*	*								
сер	*		*	*	*	*	*	*	*	*	*

#### Ціни до відома:

$L = 2.7 \cdot 10^{-25} \text{ м}^{-3}$  – число Лошмідта

$r = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  – радіус капіляра

$l = 0.135 \text{ м}$  – довжина капіляра

$\mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  – маса одного моля повітря

$\rho_{\text{вод}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$  – густина води

$V = 50 \text{ мл} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$  – об'єм мірної посудини

$P_0 = 10^5 \text{ Па}$

умовних

– тиск і температура при нормальних  
 $T_0 = 273 \text{ К}$

2. Обчислити різницю тисків  $\Delta p$  за формулою:

$$\Delta p = \rho_{\text{води}} g \frac{h_1 + h_2}{2}$$

3. а) обчислити за формулою (9) середню довжину вільного пробігу молекул повітря  $\lambda$ ;

б) вивести формулу для визначення відносної похибки вимірювання.

4. а) за формулою (12) обчислити ефективний діаметр  $d$ ;  
 б) вивести формулу для визначення відносної похибки вимірювання.

5. Записати результати у вигляді:

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

$$d = d_{\text{сер}} \pm \Delta d$$

### 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.

### Література

1. Ахматова А.С. Лабораторный практикум по физике – М.: Высшая школа, 1980. – С.97–99.
2. Майкова М.Н. Практикум по курсу общей физики. – М.: Высшая школа, 1970. – С.125–127.
3. Кортнев А.В. и др. Практикум по физике. – М.: Высшая школа, 1965. – С.150–152.

## Лабораторний експеримент №7

### Фазовий перехід першого роду на прикладі переходу води в пару при температурі кипіння



трубки, склянка для води.

**Мета:** Ознайомлення з одним із способів дослідного 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

#### Теорія методу

Питомою теплотою переходу рідини в пару  $\lambda$  (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, йде на роботу по подоланню сил молекулярного притягування 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, буде перетворюватися в рідину.

Кількість теплоти, яку отримує спіраль при проходженні по ній електричного струму за деякий час рівна роботі цього струму:

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

де  $U_1$  – напруга на кінцях спіралі,

$I_1$  – сила струму, що проходить по спіралі за час  $t$ .

$P$  – потужність

Теплота  $Q$ , отримана водою від нагрітої спіралі, рівна тій кількості теплоти  $Q_1$ , яка йде на перетворення води масою  $m_1$  в пару і на нагрівання навколишнього середовища, тобто теплову втрату ( $q$ ):

$$Q = Q_1 + q, \quad (2)$$

Враховуючи, що

$$Q_1 = m_1 \lambda, \quad (3)$$

де  $\lambda$  – питома теплота переходу води в пару, рівність (2) матиме вигляд:

$$I_1 U_1 t = m_1 \lambda + q, \quad (4)$$

Теплові втрати  $q$  визначити експериментально важко. Тому дослід повторюють при іншій потужності електричного струму, вважаючи, що теплові втрати такі самі, як і в першому досліді:

$$I_2 U_2 t = Q_2 + q, \quad (5)$$

Із формул (4) і (5) знаходимо  $\lambda$ :

$$I_1 U_1 t - I_2 U_2 t = m_1 \lambda - m_2 \lambda, \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{(I_1 U_1 - I_2 U_2) t}{m_1 - m_2}, \quad (7)$$

### Хід роботи

1. Увімкнути джерело струму. Повернути ручку регулятора так, щоб напруга становила  $U_1=80\text{В}$ .

Значення  $U_1$  та покази амперметра  $I_1$  занести в таблицю.

2. Зачекати, щоб вода в кип'ятильнику почала кипіти.

3. Зважити склянку для води порожньою ( $m_n$ ).

- Після того, як почне крапати з холодильника конденсат, підкласти склянку. Увімкнути секундомір. Набирати конденсат протягом трьох хвилин.
- Зважити склянку з конденсатом ( $m_n$ ). Знайти масу конденсованої пари

$$m_1 = m_n - m_g$$

Значення  $m_1$  занести в таблицю.

- Вимкнути джерело струму, щоб вода у кип'ятильнику перестала кипіти.
- Через деякий час повторити операції зазначені у пунктах 1-6 при іншому значенні напруги  $U_2=60\text{В}$ . Значення  $U_2$ ,  $I_2$  та  $m_2$  занести в таблицю.

### Обробка результатів вимірювання

№	$U_1$ , В	$I_1$ , А	$m_1$ , кг	$U_2$ , В	$I_2$ , А	$m_2$ , кг	$t$ , сек	$\lambda$ , Дж/кг	$\epsilon$ , %	$\Delta\lambda$ , Дж/кг
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

2. Обчислити за робочою формулою (7) значення питомої теплоти переходу води в пару.

3. Вивести формулу для обчислення відносної похибки вимірювання ( $\epsilon$ ) та скласти програму для її обчислення на калькуляторі.

4. Записати кінцевий результат у формі  $\lambda = \lambda_{\text{ср}} \pm \Delta\lambda$ , Дж/кг та висновок.



### Контрольні запитання

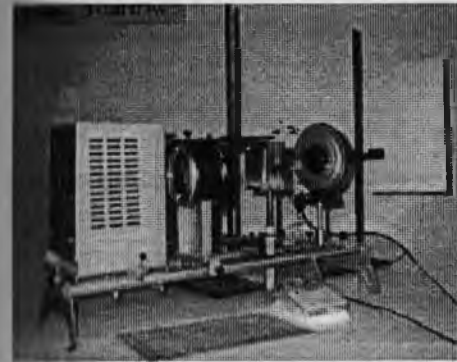
1. Поняття фази. Фазові перетворення.
2. Випаровування. Кипіння. Прихована теплота кипіння та її залежність від температури. Стан динамічної рівноваги, рідини і пари. Насичена пара, пружність насиченої пари.
3. Теорія методу. Виведення робочої формули.

### Література

1. Ноздрев В.Ф. Практикум по общей физике. – М.: Просвещение, 1971 – С.106–110.

## Лабораторний експеримент №8

### Визначення критичної температури етилового спирту



**Мета:** Дослідити стани проходження етилового ефіру при його нагріванні та охолодженні через критичний стан.

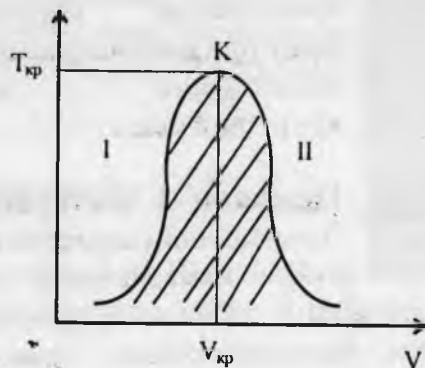
**Прилади і матеріали:** Прокційний апарат (ФРС – 115), мілівольтметр (0–50mV), термопара (мідь-константан), таблиця градуювання термопари, ампула з ефіром, електронагрівник, екран на штативі.

### Теорія методу

На термодинамічній діаграмі (див. рис.) 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 є область розвинутих флуктуацій. В

уському 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, 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 парою (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 стилowego ефіру використовують метод Авенаріуса, де застосовують герметичні ампули з незмінною масою речовини.

Підвищення температури речовини в ампулі до деякого значення  $T_1$  приводить до переходу речовини з двофазного стану в однорідний. Візуально це спостерігається при зникненні меніску і появі опалесценції.

Через деякий час явище опалесценції зникає і знову спостерігається меніск, що відбувається при деякій температурі  $T_2$ .

За критичну температуру беруть середнє арифметичне температур моменту зникнення і появи меніска:

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

### Хід роботи

1. Перевірити дотикання термонари до ампули з стилевим ефіром.
2. Увімкнути проєкційний апарат.

3. Добитися чіткого зображення ампули на екрані, щоб добре було видно меніск.
4. Увімкнути електронагрівник і спостерігати за процесами, що відбуваються в ампулі.
5. В момент появи опалесценції і зникнення меніска зафіксувати покази мілівольтметра ( $U_1, \text{mV}$ ).
6. Далі спостерігати за опалесценцією і моментом появи меніска.
7. В момент появи меніска зафіксувати покази мілівольтметра ( $U_2, \text{mV}$ ).
8. За таблицею градуювання термопарі перевести значення  $U_1$  та  $U_2$  в градуси  $^{\circ}\text{C}$ .
9. Дані  $U_1$  та  $U_2$  записати в таблицю.

### Обробка результатів вимірювання

1.

№	$U_1,$ mV	$T_1,$ $^{\circ}\text{C}$	$U_2,$ mV	$T_2,$ $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{кр}},$ $^{\circ}\text{C}$
1	*	*	*	*	*

2. Визначити критичну температуру  $T_{\text{кр}}$  за формулою (1).

### Контрольні запитання

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.

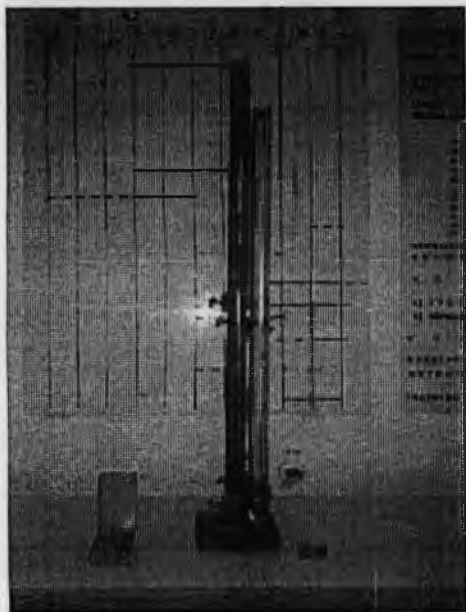
4. Методика визначення критичної температури.

### Література

1. Дущенко В.П. Физический практикум. – К: Вища школа, 1981р. – С.211–213.

## Лабораторний експеримент №9

### Визначення в'язкості рідин методом Стокса



**Мета:** 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.

#### Теорія методу

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

##### 1. Сила тяжіння:

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

де  $m_k$  – маса кульки.

Враховавши, 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  $\eta$  – 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 кульки 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,

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

Враховуючи, що  $V=l/t$ , маємо:

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

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

### Хід 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 гліцеринном і три рази для циліндра, заповненого мастилом.
4. Дані  $r$ ,  $t$ ,  $l$  занести у таблиці (для гліцерину і для мастила).

### Обробка результатів вимірювання

№	$r \cdot 10^{-3}$ , м	$l$ , м	$t$ , сек	$\eta$ , Па·с	$\epsilon$ , %	$\Delta\eta = \eta_{\text{сер}} \cdot \epsilon$ , Па·с
1	*	*	*			
2	*	*	*			
3	*	*	*			
сер.	*	*	*	*	*	*

### Взяти до відома:

$$\rho_{\text{гліцерину}} = 1.26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{мастила}} = 0.9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$\rho_{\text{кульки}} = \rho_{\text{свинцю}} = 11.35 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

1. За формулою (10) обчислити  $\eta$  для гліцерину і мастила.
2. Вивести формули та обчислити значення відносної похибки ( $\epsilon$ ).
3. Записати кінцевий результат у вигляді  $\eta = \eta_{\text{сер}} \pm \Delta\eta$  (Па·с) та висновок.

### Контрольні запитання

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. Виведення робочої формули:

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

### Література

1. Кортнев А.В., Рублев Ю.В. Практикум по физике. – М.: Высшая школа, 1965. – С.145–148.
2. Ахматова А.С. Лабораторный практикум по физике. – М.: Высшая школа, 1980. – С.100–106.
3. Майсова Н.И. Практикум по курсу общей физики. – М.: Высшая школа, 1970. – С.136–139.

## Лабораторний експеримент №10

### Визначення вологості повітря. Гігрометри та психрометри.



**Мета:** Ознайомлення з деякими фізичними основами метеорології.

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

### Теорія методу

#### 1. Робота з гігрометром.

Температура, при якій водяна пара стає насиченою називається «точкою роси». Для визначення "точки роси" достатньо охолодити металевий предмет з блискучою поверхню. Момент появи на поверхні легкого серпанку



водяної пари у вигляді роси і буде температурою точки роси. В гігromетрі поверхню металевого дзеркала камери охолоджують швидким випаровуванням налитого в камеру ефіру, крізь який продувають повітря.

Знаючи температуру «точки роси» ( $t_p$ ) за гігromетричною таблицею знаходять кількість водяної пари (в грамах), яка є в  $1 \text{ м}^3$  повітря в момент спостереження, тобто абсолютну вологість повітря ( $m$ ) та пружність ( $p$ ) цієї пари (в мм.рт.ст.).

Для визначення відносної вологості повітря необхідно ще знайти кількість водяної пари ( $m_1$ ), необхідної для насичення повітря при температурі в кімнаті. Значення  $m_1$  та пружності насиченої пари  $P$  (при кімнатній температурі  $t_{\text{кім}}$ ) беруть з гігromетричної таблиці.

Відношення кількості водяної пари ( $m$ ), що є в повітрі в момент спостереження («точки роси»), до тієї кількості ( $m_1$ ), яка необхідна для повного насичення і є відносною вологістю:

$$\varphi = \frac{m}{m_1} \cdot 100\%, \quad (1)$$

На практиці частіше визначають абсолютну вологість не за кількістю водяної пари в грамах, що міститься в  $1 \text{ м}^3$  повітря, а за її пружністю, вираженою в мм.рт.ст.:

$$\varphi = \frac{P}{p} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $P$  – пружність насиченої водяної пари при даній температурі  $T_{\text{кім}}$ .

## II. Робота із 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 ( $\varphi$ ).

Температура вологого термометра буде знижуватися до тих пір, доки кількість теплоти  $Q_1$ , яка поступає 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:

$$Q_1 = aS(t_c - t_m), \quad (4)$$

де  $a$  – коефіцієнт теплообміну,  
 $S$  – площа поверхні батисту.

Запишемо рівняння теплового балансу (3) у вигляді:

$$aS(t_c - t_M) = qm\lambda S, \quad (5)$$

де  $\lambda$  – питома теплота випаровування,

$q_m$  – швидкість випаровування  $\frac{dm}{dt}$  з одиниці поверхні.

Із рівності (5) отримаємо:

$$t_c - t_M = \frac{q_m \lambda}{a}, \quad (6)$$

Швидкість випаровування  $q_m$  знаходять за законом Дальтона:

$$q_m = a_m(p_M - p) \cdot \frac{760}{P_{атм}}, \quad (7)$$

де  $p_M$  – пружність насиченої водяної пари при температурі мокрого термометра,

$p$  – тиск пари в навколишньому повітрі (абсолютна вологість),

$P_{атм}$  – атмосферний тиск,

$a_m$  – коефіцієнт випаровування.

Підставивши (7) в (6) маємо:

$$t_c - t_M = \frac{760 \cdot a_m \cdot \lambda}{P_{атм} a} \cdot (p_M - p), \quad (8)$$

Ввівши позначення  $A = \frac{a}{760 \cdot a_m \cdot \lambda}$ , рівність (8)

матиме вигляд:

$$p = p_M - P_{атм}(t_c - t_M)A, \quad (9)$$

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

$$A = \frac{p_M - p}{P_{атм}(t_c - t_M)}, \quad (10)$$

## Хід роботи

### I. Робота із 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.

- За значеннями  $t_1$  і  $t_2$  знайдіть температуру точки роси:  
 $t_p = (t_1 + t_2)/2$ .
- Дослід повторити тричі у різних місцях кімнати.
- За допомогою гігromетричної таблиці (див. в додатку) знайти пружність насиченої пари  $p$  (абсолютну вологість) і пружність насиченої пари  $P$  при кімнатній температурі  $t_{\text{кім}}$ .
- Визначити відносну вологість повітря  $\phi$  за формулою (2).
- Значення  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_p$ ,  $t_k$ ,  $p$ ,  $P$  і  $\phi$  занести в таблицю.

### II. Робота з психрометром

- За допомогою піпетки змочити батист вологого термометра.
- Заведіть вентилятор не більше трьох-чотирьох обертів завідного ключа.
- Після припинення роботи вентилятора зафіксуйте покази сухого ( $t_c$ ) та мокрого ( $t_m$ ) термометрів.
- За різницею ( $t_c - t_m$ ) з допомогою психрометричної таблиці визначити відносну вологість повітря  $\phi$ .  
Значення  $t_c$ ,  $t_m$ ,  $\phi$  занести в таблицю.

### III. Визначення сталої приладу

- З таблиці II взяти середні значення температур  $t_c$  та  $t_m$ .
- За допомогою гігromетричної таблиці знайти пружність пари ( $P_m$ ), що насичує простір при температурі мокрого термометра ( $t_m$ ).
- З таблиці I взяти значення пружності водяної пари в повітрі, тобто абсолютної вологості ( $p$ ).

- Значення атмосферного тиску ( $P_{\text{ат}}$ ) визначити за показами барометра.
- За формулою (10) знайти сталу психрометра  $A$ .

### *Обробка результатів вимірювання*

I

№	$t_1$ , °C	$t_2$ , °C	$t_p$ , °C	$p$ , мм.рт.ст	$P$ , мм.рт.ст	$\phi$ , %
1	*	*				
2	*	*				
3	*	*				
сер.	*	*	*	*	*	*

II.

№	$t_c$ , °C	$t_m$ , °C	$t_c - t_m$ , °C	$\phi$ , %
1	*	*		
2	*	*		
3	*	*		
сер.	*	*	*	*

## III.

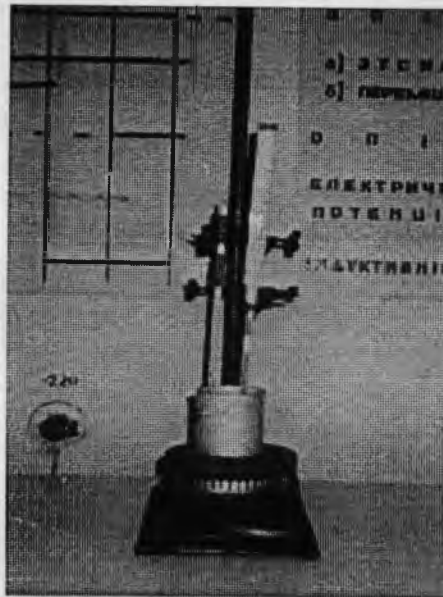
$t_c,$ °C	$t_m,$ °C	$p,$ мм.рт.ст.	$P_m,$ мм.рт.ст.	$P_{ат},$ мм.рт.ст.	$A,$ (°C) <sup>-1</sup>
*	*	*	*	*	*

**Контрольні запитання**

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

**Література**

1. Дущенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1981. – С.128–222.
2. Ноздрев В.П. Практикум по общей физике. – М.: Просвещение, 1981. – С.118–124.
3. Винниченко В.Є. Фізичний практикум. – К.: Радянська школа, 1954. – С.195–200.

**Лабораторний експеримент №11****Перевірка основних та проміжних точок ртутного термометра**

**Мета:** Ознайомитись з одним із методів перевірки основних та проміжних точок досліджуваного термометра в порівнянні із 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.

**Хід 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 ( $t_{\text{дос}}$ ,  $t_{\text{зр}}$ ).

5. Для перевірки проміжних точок увімкнути електроплитку і через деякий час фіксувати покази обидвох термометрів:

а) до  $60^{\circ}\text{C}$  через кожні  $10^{\circ}\text{C}$  зміни температур,

б) від  $60^{\circ}\text{C}$  до температури кипіння знімати покази з інтервалом в  $5^{\circ}\text{C}$ .

6. Для перевірки точки кипіння води резервуар з ртуттю термометра вміщують не у воду, а в пару.

7. Для побудови кривої поправок:

а) знайти різницю в показах термометрів  $\Delta t = t_{\text{зр}} - t_{\text{дос}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ),

б) побудувати графік залежності  $\Delta t$   $^{\circ}\text{C}$  від  $t_{\text{дос}}$   $^{\circ}\text{C}$ .

### Обробка результатів вимірювання

№	$t_{\text{зр}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$t_{\text{дос}}$ , $^{\circ}\text{C}$	$\Delta t$ , $^{\circ}\text{C}$
1	10	*	*
2	20	*	*
3	30	*	*
4	40	*	*
5	50	*	*
6	60	*	*
7	65	*	*
...	...	...	...
...	...	...	...
...	...	...	...
*	*	*	*

### Контрольні запитання

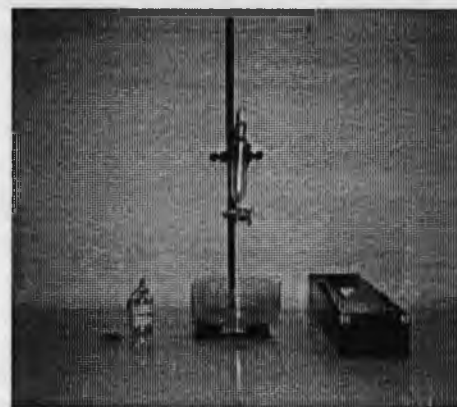
1. Температура та способи її вимірювання.
2. Термодинамічні шкали температур.
3. Будова, дія і призначення різних видів термометрів.
4. Основні характеристики термометра: чутливість, точність, інерційність, константа охолодження.
5. Теорія методу сталих точок.

### Література

1. Душенко В.П. Фізичний практикум. – К: Вища школа, 1981. – С.165–168.

## Лабораторний експеримент №12

### Визначення розмірів молекул рицинової олії



**Мета:** Практичне визначення площі поперечного перерізу і висоти молекул рицинової олії.

**Прилади і матеріали:** Бюретка, рицинова олія, кювета з водою, лінійки, дерев'яний

порошок (тальк), штатив.

### Теорія методу

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  $D$  дає можливість розрахувати площу поперечного перерізу однієї молекули :

$$S_M = \frac{S}{n}, \quad (2)$$

де  $S$  – площа утвореного круга,  
 $n$  – кількість молекул в краплі.

Число молекул в краплі обчислюють за формулою:

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

де  $\mu$  – молярна маса,  
 $m$  – маса однієї краплі.

$$m = \frac{P_1 - P_0}{20}, \quad (4)$$

де  $P_0$  – маса порожньої склянки;

$P_1$  – маса склянки з двадцятьма краплями рицинової олії.

Враховуючи рівність (4) та величину площі круга  $S = \frac{\pi D^2}{4}$ ,

знаходимо

площу поперечного перерізу однієї молекули  $S$ :

$$S_M = \frac{\pi D^2 \mu}{4m N_A} = \frac{\pi \mu}{4 N_A m} \cdot D^2, \quad (5)$$

Висоту  $h$  молекули рицинової олії з наближенням можна

обчислити через об'єм мономолекулярного шару ( $V = \frac{m}{\rho}$ , де

$m$  – маса однієї краплі,  $\rho$  – густина)

та площу  $S$  утвореного круга:

$$h = \frac{V}{S} = \frac{m \cdot 4}{\rho \pi D^2} = \frac{4m}{\rho \pi} \cdot \frac{1}{D^2}, \quad (6)$$

### Хід роботи

1. Посипати поверхню води у кюветі легким шаром дерев'яного порошку.
2. Крапнути краплю рицинової олії, щоб вона розтекла і утворила чітку круглу пляму.
3. Лінійкою виміряти в декількох напрямках діаметр утвореного круга і знайти за формулою (1) діаметр  $D$ .

### Обробка результатів вимірювання

1.

№	D, м	S <sub>м</sub> , м	ε, %	ΔS <sub>м</sub> , м <sup>2</sup>	h, м	ε, %	Δh, м
1	*						
2	*						
3	*						

сєр.	*	*	*	*	*	*	*
------	---	---	---	---	---	---	---

**Взяти до уваги:**

$$N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$\rho = 0.95 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$m = 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$\mu = 870 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

2. За формулами (5) і (6) обчислити  $S_m$  та  $h$ .
3. Знайти формули для обчислення відносних похибок вимірювань  $\varepsilon_s$  (%) і  $\varepsilon_h$  (%).
4. Записати кінцевий результат у формі:

$$S_m = S_{m_{\text{сєр}}} \pm \Delta S_m$$

$$h = h_{\text{сєр}} \pm \Delta h$$

**Контрольні запитання**

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.

**Література**

1. Ноздрев В.Ф. Практикум по общей физике. – М.: Просвещение, 1971. – С.141–144.

## Лабораторний експеримент №13

### Вивчення кристалізації твердих тіл методом кривої охолодження



**Мета:** Визначення питомої теплоти та температури кристалізації сплаву Вуда, розрахунок зміни ентропії шляхом зняття кривої кристалізації.

**Прилади і матеріали:** Мілівольтметр дзеркальний, термopара, посудина із сплавом Вуда, електроплитка, металевий стержень, керамічна підкладка.

#### Теорія методу

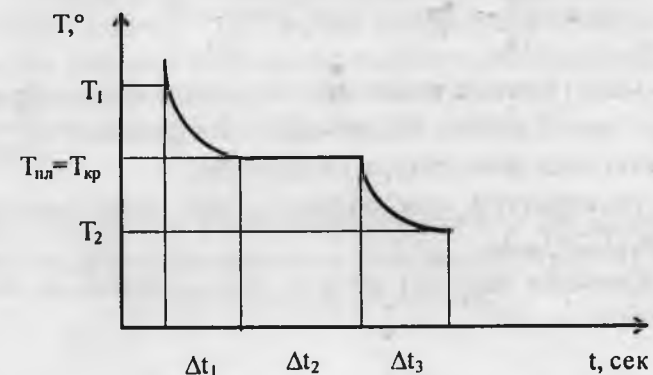
Кристалізація – це рівноважний фазовий перехід кристалічного тіла з рідкого стану в твердий.

Питома теплота плавлення ( $\lambda$ ) – кількість теплоти, необхідної для розплаву (розплавлення) одиниці маси кристалічної речовини при температурі плавлення.

Температура плавлення ( $T_{пл}$ ) визначають методом зняття кривої плавлення

$T = f(t)$  (температури як функції часу), або, що зручніше на практиці, зняттям кривої тверднення (кристалізації) (див.Рис.1).

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 (рівновага між рідким та твердим станами) також супроводжується поглинанням деякої кількості теплоти;
- 3) рідкий стан, для підтримання якого потрібна певна кількість теплоти.

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

I. Тверднення розплавленого тіла (сплаву Вуда), що супроводжується виділенням за деякий проміжок часу  $\Delta t$  кількості теплоти  $q_1$ :

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

де  $m$  і  $c$  – 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 ( $T_{кр} = T_{пл}$ ),

$\Delta t_1$  – проміжок часу від початку охолодження до початку кристалізації.

II. Процес кристалізації супроводжується виділенням деякої кількості теплоти  $q_2$ :

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

де  $\lambda$  – питома теплота плавлення (кристалізації),

$\Delta t_2$  – час кристалізації.

III. Охолодження твердого тіла, що також супроводжується виділенням деякої кількості теплоти  $q_3$ :

$$q_3 = \frac{Q_3}{\Delta t_3} = (mc' + m_n c_n) \frac{T_{кр} - T_2}{\Delta t_3}, \quad (3)$$

де  $c'$  – питома теплоємність твердого сплаву Вуда,

$T_2$  – кінцева температура охолодженого сплаву Вуда,

$\Delta t_3$  – 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) одержимо рівняння для знаходження питомої теплоти плавлення (кристалізації):

$$\lambda = \frac{1}{2m} [(mc + m_n c_n)(T_1 - T_{кр}) + (mc' + m_n c_n)(T_{кр} - T_2)], \quad (5)$$

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

$$dS = \int_{T_1}^{T_{кр}} mc \frac{dT}{T} + \frac{\lambda m}{T_{кр}} + \int_{T_{кр}}^{T_2} mc' \frac{dT}{T},$$

або

$$dS = mc \ln \frac{T_{кр}}{T_1} + \frac{\lambda m}{T_{кр}} + mc' \ln \frac{T_2}{T_{кр}}, \quad (7)$$

### Хід роботи

1. Покласти посудину зі сплавом Вуда на електроплитку.
2. Спай термомпари опустити в посудину, щоб доторкався сплаву.
3. Повернути ручку регулятора мілівольтметра на позначку **7.5mV**. Визначити ціну поділки приладу.
4. Увімкнути електроплитку і через деякий час перевірити металевим стержнем стан розплаву.
5. Коли сплав Вуда стане рідким, зафіксувати покази мілівольтметра за положенням «зайчика» ( $U_1$ ).
6. Вимкнути електроплитку. Посудину з розплавом зняти з плитки на керамічну підкладку.
7. Через кожні 30 сек фіксувати зміну напруги до повного охолодження тіла. Дані ( $U_1, U_2, \dots, U_n$ ) занести в таблицю.
8. З допомогою спеціальної таблиці перевести одержані значення  $U_1, U_2, \dots, U_n$  в значення температур  $T_1, T_2, \dots, T_n$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) і записати в таблицю обробки результатів.

### Обробка результатів вимірювання

1.

№	U, mV	T, °C	T <sub>кр</sub> , °C	λ, Дж/кг	dS, Дж/К
1	*	*			
2	*	*			
*	*	*			
...	...	...			
...	...	...			
...	...	...		35·10 <sup>3</sup>	
*	*	*	*	*	*

### Взяти до відома:

$$m=212 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$m_{\text{пл}}=43.79 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$c_{\text{пл}}=c_{\text{ал}}=920 \text{ Дж/кгК}$$

$$c=1.46 \cdot 10^2 \text{ Дж/кгК}$$

$$c'=2.46 \cdot 10^2 \text{ Дж/кгК}$$

2. За формулою (5) обчислити значення питомої теплоти плавлення.
3. За формулою (7) знайти величину зміни ентропії (dS).
4. Побудувати криву охолодження і знайти за нею температуру кристалізації ( $T_{\text{кр}}=T_{\text{пл}}$ ).

### Контрольні запитання

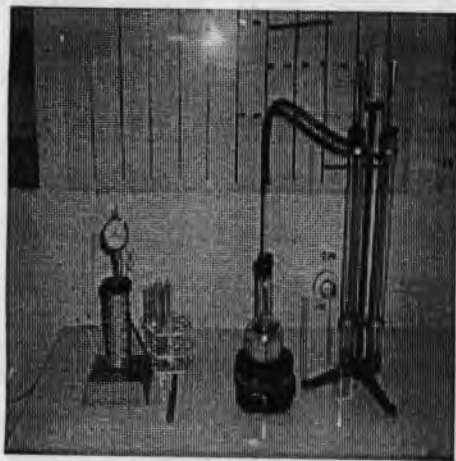
1. Фазовий перехід першого та другого роду.
2. Процеси сублімації, плавлення. Питома теплота плавлення. Залежність температури плавлення від тиску.
3. Процес кристалізації. Фазова діаграма.
4. Поняття ентропії.
5. Теорія методу. Виведення робочої формули.

### Література

1. Дущенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1981. – С.208–210.

## Лабораторний експеримент №14

### Визначення коефіцієнта об'ємного розширення рідин методом Дюлонга і Пті та коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл методом Менделєєва



**Мета:** Ознайомлення 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, посудина для збору конденсованої пари, термометр, барометр, три металеві стержні (алюміній, залізо, мідь), пробірки, пінцет з дерев'яною ручкою, пробіркотримач, масштабна лінійка.

### I. Визначення коефіцієнта об'ємного розширення (β) гліцерину.

#### Теорія методу

В даній роботі U-подібна трубка приладу Дюлонга і Пті наповнена гліцерином. Одне коліно трубки, охоплене охоронною скляною муфтою, знаходиться при кімнатній температурі ( $T_1$ ). Інше коліно охоплене скляною муфтою, через яку пропускають водяну пару. Температуру кипіння води ( $T_2$ ) в залежності від атмосферного тиску знаходять із спеціальних таблиць.

Метод сполучених посудин ґрунтується на використанні рівноваги двох стовпчиків гліцерину, які мають різні температури  $T_1$  та  $T_2$ :

$$\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2, \quad (1)$$

де  $h_1$  – висота стовпчика гліцерину в коліні трубки при кімнатній температурі ( $T_1$ ),

$h_2$  – висота стовпчика гліцерину в коліні трубки, в якому підтримується температура ( $T_2$ ) за рахунок водяної пари,  $\rho_1$  та  $\rho_2$  – густини гліцерину при різних температурах  $T_1$  та  $T_2$  відповідно.

Із рівняння (1) маємо:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}, \quad (2)$$

Враховуючи вирази для густин:



$$\rho_1 = \frac{\rho_0}{1 + \beta T_1}, \quad \rho_2 = \frac{\rho_0}{1 + \beta T_2}, \quad (3)$$

де  $\rho_0$  – густина гліцерину при  $0^\circ\text{C}$ , знаходимо:

$$\frac{h_1}{1 + \beta T_1} = \frac{h_2}{1 + \beta T_2}, \quad (4)$$

Із (4) маємо вираз для коефіцієнта об'ємного розширення:

$$\beta = \frac{h_2 - h_1}{h_1 T_2 - h_2 T_1} \quad [\beta] = \left[ \frac{\text{м}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right] = [\text{К}^{-1}] \quad (5)$$

### Хід роботи

1. Покласти колбу з водою на електроплитку.
2. З допомогою гумової трубки з'єднати колбу з верхнім отвором скляної муфти, що охоплює одне коліно U-подібної трубки. Біля нижнього отвору муфти підкласти посудину для збору конденсату водяної пари.
3. Увімкнути електроплитку. Через деякий час, коли закипить вода, зафіксувати значення рівнів  $h_2$  та  $h_1$  по спільній шкалі. Дані занести в таблицю.
4. Визначити кімнатну температуру ( $T_1$ ) та температуру кипіння води ( $T_2$ ) із спеціальної таблиці (див. додаток) залежності  $T_2$  від атмосферного тиску  $P_{\text{атм}}$ , який вимірюють барометром. Значення величин  $T_2$ ,  $T_1$  та  $P_{\text{атм}}$  записати у таблицю обробки результатів вимірювання.

Пр

СТАЛЬ 1,2  
МІДЬ 1,3

### Обробка результатів вимірювання

№	$h_1$ , м	$h_2$ , м	$T_1$ , К	$T_2$ , К	$P_{\text{атм}}$ , мм.рт. ст.	$\beta$ , $\text{К}^{-1}$	$\epsilon$ , %	$\Delta\beta$ , $\text{К}^{-1}$
1	*	*						
2	*	*						
3	*	*						
сер.	*	*	*	*	*	*	*	*

$T_{\text{пл.}} 65.6^\circ\text{C}$

1. За формулою (6) обчислити величину об'ємного розширення гліцерину ( $\beta$ ).
2. Вивести формулу та обчислити відносну похибку вимірювання ( $\epsilon$ ).
3. Кінцевий результат записати у такій формі:

$$\beta = \beta_{\text{ср}} \pm \Delta\beta \quad (\text{К}^{-1})$$

### II. Визначення коефіцієнта лінійного розширення металевих стержнів.

#### Теорія методу

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 ( $\alpha$ ) – це величина, яка дорівнює відношенню відносного видовження  $\Delta l/l_0$  тіла до зміни температури  $\Delta T$ , яка зумовила це видовження:

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

де  $l_0$  – довжина тіла при  $0^\circ\text{C}$ .

Користуватись формулою (1) для визначення  $\alpha$  незручно, бо важко створити нульову температуру для визначення  $l_0$ .

В даній роботі маємо металевий стержень циліндричної форми:

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

де  $S$  – площа поперечного перерізу,

$l_1$  – довжина стержня при  $T_1$ .

При зростанні температури до  $T_2$ , об'єм збільшиться до величини:

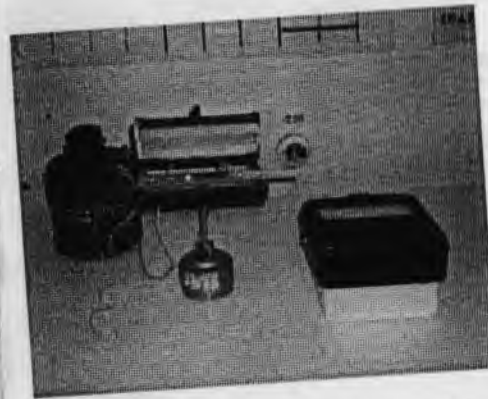
$$V_2 = S l_2, \quad (3)$$

Контр. заняття.

1. Математико-фізичне визначення теплового розширення.  
2. Визч. коеф. лінійного розширення тв. тіл методом Менделєва-Тейлора.  
3. Визч. коеф. об'ємного розширення методом Дюроу-Тейлора.

## Лабораторний експеримент №15

### Визначення питомої теплоємності металів методом охолодження



**Мета:** Практичне визначення питомої теплоємності різних металевих стержнів.

**Прилади і матеріали:** Лабораторний автотрансформатор

р (або регулятор напруги шкільний РНШ), термометр з мілівольтметром, проградуєований в градусах  $^\circ\text{C}$ , муфельна піч. Пробірка, металеві стержні (залізо, мідь), пінцет.

### Теорія методу

При охолодженні металу масою  $m$  на  $\Delta T$  градусів кількість теплоти, яку віддає метал рівна:

$$dQ = cm dT, \quad (1)$$

де  $c$  – середня теплоємність металу в інтервалі температур  $dT$ .

Якщо охолодження відбувається протягом деякого часу  $dt$ , то формула (1) матиме вигляд:

$$dQ = cm \frac{dT}{dt} dt, \quad (2)$$

З іншого боку, за законом охолодження Ньютона:

$$dQ = \alpha(T_n - T_{\text{кім}})Sdt, \quad (3)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну,  
 $S$  – площа поверхні зразка.

З рівностей (1) і (3) маємо:

$$cm \frac{dT}{dt} = \alpha(T_n - T_{\text{кім}})S, \quad (4)$$

В даній роботі розглядаються два металевих стержні однакового об'єму при однакових інтервалах температури ( $T_n - T_{\text{кім}}$ ) еталонний – залізо та досліджуваний – мідь.

Запишемо рівність (4) для цих зразків.

Для заліза:

$$c_1 m_1 \left( \frac{dT}{dt} \right)_1 = \alpha(T_n - T_{\text{кім}})S, \quad (5)$$

Для міді:

$$c_2 m_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_2 = \alpha(T_n - T_{\text{кім}})S, \quad (6)$$

В (5), (6) маємо:

$$c_1 m_1 \left( \frac{dT}{dt} \right)_1 = c_2 m_2 \left( \frac{dT}{dt} \right)_2, \quad (7)$$

Звідки

$$c_2 = c_1 \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\left( \frac{dT}{dt} \right)_1}{\left( \frac{dT}{dt} \right)_2}, \quad (8)$$

де  $\left( \frac{dT}{dt} \right)_1$  і  $\left( \frac{dT}{dt} \right)_2$  – швидкість охолодження залізного та мідного стержнів відповідно.

Величина

$$\left(\frac{dT}{dt}\right) = \operatorname{tg} \varphi, \quad (9)$$

де  $\varphi$  – кут нахилу між віссю часу, що виражає залежність  $\ln(T - T_{\text{кім}}) = f(t)$ , і дотичною до кривої, отриманої для стержня.

Для стержня із заліза:

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_1 = \operatorname{tg} \varphi_1, \quad (10)$$

Для стержня із міді:

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_2 = \operatorname{tg} \varphi_2, \quad (11)$$

Отже, робоча формула для визначення теплоємності досліджуваного зразка (міді) має вигляд:

$$c_2 = c_1 \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{\operatorname{tg} \varphi_1}{\operatorname{tg} \varphi_2}, \quad (12)$$

Ввівши величину відносної швидкості охолодження зразків:

$$K = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1}, \quad (13)$$

рівність (12) матиме вигляд:

$$c_2 = c_1 \frac{m_1}{m_2} \cdot \frac{1}{K}, \quad (14)$$

### *Хід роботи*

1. Вкласти металевий стержень у скляну пробірку.
2. Покласти пробірку із зразком у муфельну піч.
3. Термопару розмістити в пробірці так, щоб її спай щільно доторкався зразка.
4. Увімкнути трансформатор, ручку регулятора налаштувати на позначку **120В**.
5. Нагріти зразок до **250°C**.
6. Вимкнути автотрансформатор; з допомогою пінцету обережно підняти верхню частину муфельної печі; вийняти пінцетом пробірку (слідкуючи за тим, щоб спай термопари не відійшов від зразка) і покласти її на підкладку.
7. Увімкнути секундомір і через кожні **10 сек** фіксувати температуру зразка в інтервалі від деякої початкової температури  $T_{\text{поч}}$  до кімнатної  $T_{\text{кім}}$ .
8. Значення температур від  $T_{\text{поч}}$  до кінцевої  $T_{\text{кім}}$  занести в таблицю.
9. Пункти 1 – 8 повторити для іншого зразка.

### Обробка результатів вимірювання

1.

№	T, °C	T, K	T - T <sub>кім</sub> , K	ln(T - T <sub>кім</sub> )
1	T <sub>п</sub>	*	*	*
2	*	*	*	*
3	*	*	*	*
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
...	T <sub>кім</sub>	*	*	*

- Для кожного значення температури T (від T<sub>п</sub> до T<sub>кім</sub>) знайти різницю (T - T<sub>кім</sub>), а також ln(T - T<sub>кім</sub>).
- Побудувати криву ln(T - T<sub>кім</sub>) = f(t), як функцію часу.
- Графічним методом знайти тангенси кутів φ<sub>1</sub> і φ<sub>2</sub>, утворених віссю часу і дотичними в декількох місцях до кривих ln(T - T<sub>кім</sub>) = f(t):

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = K_1, \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = K_2.$$

- Знайти відносну швидкість охолодження міді:

$$K = \frac{K_2}{K_1} = \frac{\operatorname{tg} \varphi_2}{\operatorname{tg} \varphi_1}$$

6.

№	tg φ <sub>1</sub>	tg φ <sub>2</sub>	K	c <sub>cu</sub> Дж/кг К	ε, %	Δc, Дж/кг К
1	*	*				
2	*	*				
3	*	*				
сер.	*	*	*	*	*	*

#### Взяти до відома:

$$m_{\text{Fe}} = 5,38 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$m_{\text{Cu}} = 4,30 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$c_{\text{Fe}} = 498 \text{ Дж/кгК}$$

- За формулою (14) обчислити питому теплоємність міді c<sub>cu</sub>.
- Вивести формулу для обчислення відносної похибки (ε).
- Кінцевий результат записати у формі:

$$c = c_{\text{cp}} \pm \Delta c$$

#### Контрольні запитання

- Тепловий рух у твердих тілах. 228
- Теплоємність твердих тіл. Закон Дюлонга - Пті. 224-225

3. Залежність теплоємності твердих тіл від температури. 226

4. Теорія методу. Визначення теплоємності металів методом охолодження. Виведення робочої формули:

$$c_1 = c_2 \frac{m_2}{m_1} \frac{1}{K}$$

### Література

1. Иверонова В.И. Физический практикум. – М.: Изд. физ.-мат. мет., 1962. – С. 148 – 150.

2. Дущенко В.П. Фізичний практикум. – К.: Вища школа, 1981. – С. 188 – 193.

## Додаток

### Знаходження відносної похибки

#### 1. При прямих вимірюваннях.

1. Вимірюємо декілька разів шукану величину:

$$x_1, x_2 \dots x_n, \quad (1)$$

2. Знаходимо середнє значення величини:

$$x_{\text{ср}} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} |x_{\text{ср}} - x_1| &= \Delta x_1 \\ |x_{\text{ср}} - x_2| &= \Delta x_2 \\ &\dots \\ |x_{\text{ср}} - x_n| &= \Delta x_n \end{aligned} \quad (3)$$



4. Знаходимо середню абсолютну похибку результатів вимірювання:

$$\Delta x_{\text{ср}} = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta x_i}{n} \quad (4)$$

5. Знаходимо відносну похибку результатів вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta x_{\text{ср}}}{x_{\text{ср}}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

6. Істинне значення вимірюваної величини рівне:

$$x = x_{\text{ср}} \pm \Delta x_{\text{ср}}, \quad (6)$$

## II. При послідовних вимірюваннях.

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

$$N = f(x, y, z), \quad (7)$$

Середнє значення такої величини рівне:

$$N_{\text{ср}} = f(x_{\text{ср}}, y_{\text{ср}}, z_{\text{ср}}), \quad (8)$$

Відносна похибка вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta N_{\text{ср}}}{N_{\text{ср}}}, \quad (9)$$

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

$$\frac{dN}{N} = d(\ln N), \quad (10)$$

Виходячи з цього, маємо алгоритм знаходження відносної похибки:

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

$$\ln(N), \quad (11)$$

2. взяти диференціал від логарифму (11):

$$d(\ln N) = \frac{1}{N} dN, \quad (12)$$

3. замість диференціалів незалежних змінних записуємо абсолютні похибки результатів прямих вимірів, і всі знаки "-" замінюємо на "+". Одержимо відносну похибку вимірювання:

$$\varepsilon = \frac{\Delta N}{N}, \quad (13)$$

4. знаючи відносну похибку  $\varepsilon$ , знаходимо абсолютну похибку вимірювання:

$$\Delta N_{\text{ср}} = \varepsilon \cdot N_{\text{ср}}, \quad (14)$$

5. істинне значення величини записують у формі:

$$N = N_{\text{ср}} \pm \Delta N_{\text{ср}}, \quad (15)$$

### 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,

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

1. Питомі теплоємності  $c$ , [Дж/кгК] (при кімнатній температурі).

Алюміній	$8.79 \cdot 10^2$
Залізо	$4.98 \cdot 10^2$
Мідь	$3.81 \cdot 10^2$
Латунь	$3.84 \cdot 10^2$
Сплав Вуда (твердий)	$2.46 \cdot 10^2$
Сплав Вуда (рідкий)	$1.46 \cdot 10^2$
Вода	$4.187 \cdot 10^3$
Гліцерин	$2.48 \cdot 10^3$
Масло	$1.63 \cdot 10^3$

2. Коефіцієнт внутрішнього тертя  $\eta$  [Па·с]

Гліцерин	1.39
Масло	0.11 – 0.66
Повітря	$1.81 \cdot 10^{-3}$

3. Густина речовин  $\rho$ , [кг / м<sup>3</sup>]

Вода	$1 \cdot 10^3$
Алюміній	$2.7 \cdot 10^3$
Латунь	$8.5 \cdot 10^3$
Мідь	$8.9 \cdot 10^3$
Свинець	$11.3 \cdot 10^3$

Гліцерин	$1.26 \cdot 10^3$
Масло	$0.9 \cdot 10^3$
Залізо	$7.9 \cdot 10^3$

#### 4. Коефіцієнт поверхневого натягу $\sigma$ , [дин/см = $10^{-3}$ Н/м]

Вода	72.5
Гліцерин	64.3
Спирт етиловий	22

#### 5. Питома теплота плавлення металів $\lambda$ , [Дж/кг]

Сплав Вуда ..... 7.6 кал/г =  $7.6 \cdot 4.187 \cdot 10^3$   
Дж/кг

#### 6. Коефіцієнт об'ємного розширення $\beta$ , [K<sup>-1</sup>]

Вода	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Гліцерин	$5.1 \cdot 10^{-4}$
Масло	$7.2 \cdot 10^{-4}$
Ефір	$1.7 \cdot 10^{-3}$
Спирт	$1.1 \cdot 10^{-3}$

#### 7. Коефіцієнт лінійного розширення $\alpha$ , [K<sup>-1</sup>]

Алюміній	$2.6 \cdot 10^{-5}$
Латунь	$1.9 \cdot 10^{-5}$
Мідь	$1.7 \cdot 10^{-5}$

### Одиниці вимірювання

#### 1. Тиск [P]

1 мм.вод.ст. = 9.81 Па  
 1 мм.рт.ст. =  $1.33 \cdot 10^2$  Па  
 1 тех. атм. =  $9.81 \cdot 10^4$  Па  
 1 атм. = 760 мм.рт.ст. =  $1,013 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup> =  $1.013 \cdot 10^5$  Па  
 1 бар =  $10^5$  Па  
 1 Н/м<sup>2</sup> = 1 Па  
 1 Н =  $10^5$  дин  
 1 Н/м<sup>2</sup> =  $10^5$  дин /  $10^4$  см<sup>2</sup> = 10 дин / см<sup>2</sup>  
 1 дин / см<sup>2</sup> = 0.1 Н / м<sup>2</sup>

#### 2. Об'єм [V]

1 л =  $10^{-3}$  м<sup>3</sup>

#### 3. Теплота [Q]

1 кал = 4.187 Дж  
 1 Дж = 0.239 кал  
 1 ерг =  $10^{-7}$  Дж  
 1 Дж = 1 Нм = 1 кг м<sup>2</sup> / с<sup>2</sup>

#### 4. Питома теплосмність [C]

кал / г град. = 4.187 Дж /  $10^{-3}$  кгК =  $4.187 \cdot 10^3$  Дж / кгК.

5. Коефіцієнт динамічної в'язкості  $[\eta]$ 

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с} = 1 \text{ Н} \frac{\text{с}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2} \frac{\text{с}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{кг}}{\text{мс}}$$

6. Коефіцієнт кінематичної в'язкості  $[D = \eta / \rho]$ 

$$\left[ \frac{\eta}{\rho} \right] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^3}{\text{мс} \cdot \text{кг}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

7. Температура  $[T]$ 

$$T(\text{K}) = t(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

## Термодинамічні шкали

Цельсія .....  $0^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$

Реомюра .....  $0^{\circ}\text{R} - 80^{\circ}\text{R}$

Фаренгейта .....  $32^{\circ}\text{F} - 212^{\circ}\text{F}$

8. Коефіцієнт поверхневого натягу  $[\sigma]$ 

$$1 \frac{\text{дин}}{\text{см}} = 1 \frac{10^{-5} \text{ Н}}{10^{-2} \text{ м}} = 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{мм}} = 10^{-3} \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2}$$

9. Питома теплота плавлення  $[\lambda]$ 

$$[\lambda] = 1 \text{ кал} / \text{г} = 4.187 \text{ Дж} / 10^{-3} \text{ кг} = 4.187 \cdot 10^3 \text{ Дж} / \text{кг}$$

10. Коефіцієнт лінійного та об'ємного розширення речовин  
 $[\alpha]$ 

$$[\alpha] = [\text{K}^{-1}]$$

$$[\beta] = [\text{K}^{-1}]$$

Гігрометрична таблиця густини насиченої водяної пари  
при різних температурах

t, °C	P, мм.рт.ст.	m, г/м <sup>3</sup>
0	4.58	4.84
1	4.93	5.22
2	5.29	5.60
3	4.69	5.98
4	6.10	6.40
5	6.54	6.84
6	7.01	7.3
7	7.51	7.8
8	8.05	8.3
9	8.61	8.8
10	9.21	9.4
11	9.84	10.0
12	10.52	10.7
13	11.23	11.4
14	11.99	12.1
15	12.79	12.8
16	13.63	13.6
17	14.53	14.5
18	15.48	15.4
19	16.48	16.3
20	17.54	17.3
21	18.65	18.3
22	19.83	19.4
23	21.07	20.6
24	22.38	21.8
25	23.78	23.0

Психрометрична таблиця відносної вологості повітря (в  
%)

Різниця показів сухого і вологого термометрів, °C

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	100	81	63	45	28	11					
2	100	84	68	51	35	20					
4	100	85	70	56	42	28	14				
6	100	86	73	60	47	35	23	10			
8	100	87	75	63	51	40	28	18	7		
10	100	88	76	65	54	44	34	24	14	4	
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17	9
16	100	90	81	71	62	54	45	37	30	22	15
18	100	91	82	73	64	56	48	41	34	26	20
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
26	100	92	85	78	71	64	58	50	45	40	34
28	100	93	85	78	72	65	59	53	48	42	37
30	100	93	86	79	73	67	67	55	50	44	39

Таблиця залежності коефіцієнта поверхневого натягу води ( $\sigma$ ) від температури

Температура, °C	Поверхневий натяг, дин/см або ( $10^{-3}$ Н/м)	Температура, °C	Поверхневий натяг, дин/см або ( $10^{-3}$ Н/м)
0	75.49	45	65.6
5	74.75	50	67.8
10	74.01	55	66.9
15	73.26	60	66.0
20	72.53	65	65.1
25	71.78	70	64.2
30	71.03	75	63.3
35	70.29	80	62.3
40	69.54		

Залежність температури кипіння води при різних тисках

P, мм.рт.ст.	680	690	700	710	720	730
0	96.92	97.32	97.71	98.11	98.49	98.88
1	96.96	97.36	97.75	98.14	98.53	98.91
2	97.00	97.40	97.79	98.18	98.57	98.95
3	97.04	97.44	97.83	98.22	98.61	98.99
4	97.08	97.48	97.87	98.26	98.65	99.03
5	97.12	97.52	97.91	98.30	98.69	99.07
6	97.16	97.56	97.95	98.34	98.72	99.10
7	97.20	97.60	97.99	98.38	98.76	99.14
8	97.24	97.63	98.03	98.42	98.80	99.18
9	97.28	97.67	98.07	98.45	98.84	99.22
10	97.32	97.71	98.11	98.49	98.88	99.26

P, мм.рт.ст.	740	750	760	770	780	790
0	99.26	99.63	100.00	100.37	100.73	101.09
1	99.29	99.67	100.04	100.40	100.76	101.12
2	99.33	99.70	100.07	100.44	100.80	101.16
3	99.37	99.74	100.11	100.48	100.84	101.19
4	99.41	99.78	100.15	100.51	100.87	101.23
5	99.44	99.82	100.18	100.55	100.91	101.26
6	99.48	99.85	100.22	100.58	100.94	101.30
7	99.52	99.89	100.26	100.62	100.98	101.33
8	99.56	99.93	100.29	100.66	101.02	101.37
9	99.59	99.96	100.33	100.69	101.05	101.41
10	99.63	100.00	100.37	100.73	101.09	101.44



## Література для теоретичної самопідготовки

- [1] Матвсев А.Н. Молекулярная физика.—М.: Высшая школа, 1989.— 360с.
- [2] Кикоин А.К., Кикоин И.К. Молекулярная физика.—М.: Наука, 1976.— 480с.
- [3] Сивухин Д.В. Общий курс физики.—М.: Наука, 1990.— 951с.
- [4] Савельев И.В. Курс общей физики.—М.: Наука, 1973.— 416с.
- [5] Яворский Б.М. и др. Курс физики.—М.: Высшая школа, 1963.— 401с.
- [6] Кудрявцев Б.Б. Курс физики.—М.: Просвещение, 1965.— 223с.
- [7] Ілляшенко Г.Ю. Молекулярна фізика.—К.: Рад.школа, 1970.— 167с.
- [8] Радченко І.В. Молекулярна фізика.—Харк. універ., 1975.— 540с.
- [9] Дутчак Я.Й. Молекулярна фізика.— Львів.універ., 1973.— 263с.

## ЗМІСТ

- |                             |  |
|-----------------------------|--|
| Лабораторний експеримент №1 | Визначення відношення теплоємностей газу методом Клемана-Дезорма                       |
| Лабораторний експеримент №2 | Визначення коефіцієнта динамічної в'язкості повітря                                    |
| Лабораторний експеримент №3 | Зміна ентропії в реальних системах   |
| Лабораторний експеримент №4 | Визначення питомої теплосмності рідин слектрокалориметром                              |
| Лабораторний експеримент №5 | Визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідин методом Ребіндера                     |
| Лабораторний експеримент №6 | Визначення середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметру молекул повітря  |
| Лабораторний експеримент №7 | Фазовий перехід першого роду .на прикладі переходу води в пару при температурі кипіння |
| Лабораторний експеримент №8 | Визначення критичної температури етилового спирту                                      |
| Лабораторний експеримент №9 | Визначення в'язкості рідин методом Стокса  |

Лабораторний експеримент №10      Визначення вологості повітря. Гігрометри та психметри.

Лабораторний експеримент №11      Перевірка основних та проміжних точок ртутного термометра

Лабораторний експеримент №12      Визначення розмірів молекул рицинової олії

Лабораторний експеримент №13      Вивчення кристалізації твердих тіл методом кривої охолодження

Лабораторний експеримент №14      Визначення коефіцієнта об'ємного розширення рідин методом Дюлонга і Пті та коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл методом Менделєєва

Лабораторний експеримент №15      Визначення питомої теплоємності металів методом охолодження  
Додаток . . .  
Література