

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
Навчально-науковий інститут агроєкології та землеустрою  
Кафедра хімії та фізики

**05-06-145М**

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни  
**«Фізика»** (розділ «Молекулярна фізика та термодинаміка») для  
здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за  
освітньо-професійними програмами: «Гідротехнічне  
будівництво, водна інженерія та водні технології» спеціальності  
194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні  
технології» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво»;  
«Гідроенергетика» спеціальності 145 «Відновлювальні джерела  
енергії та гідроенергетик» галузі знань 14 «Електрична  
інженерія» денної, заочної та дистанційної форм навчання

Рекомендовано  
науково-методичною радою з якості  
навчально-наукового інституту  
енергетики,  
автоматики та водного господарства  
Протокол № 9 від 21.05.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Фізика» (розділ «Молекулярна фізика та термодинаміка») для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійними програмами: «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво»; «Гідроенергетика» спеціальності 145 «Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика» галузі знань 14 «Електрична інженерія» денної, заочної та дистанційної форм навчання. [Електронне видання] / Гаращенко О. В., Гаєвський В. Р., Соляк Л. В., Мороз М. В. – Рівне : НУВГП, 2024. – 47 с.

Укладачі: Гаращенко О. В., доцент кафедри хімії та фізики; Гаєвський В. Р., доцент кафедри хімії та фізики; Соляк Л. В., старший викладач кафедри хімії та фізики; Мороз М. В., професор кафедри хімії та фізики.

Відповідальний за випуск: Мороз М. В., доктор хім. наук, професор, завідувач кафедри хімії та фізики.

Керівник групи забезпечення спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології»

Хлапук М. М.

Керівник групи забезпечення спеціальності 145 «Відновлювальні джерела енергії та гідроенергетика»

Сунічук С. В.

Попередня версія методичних вказівок 05-06-133М

© О. В. Гаращенко,  
В. Р. Гаєвський,  
Л. В. Соляк, М. В. Мороз, 2024  
© НУВГП, 2024

## ЗМІСТ

Передмова	4
Лабораторна робота № 2.1 Визначення в'язкості рідини методом Стокса	5
Лабораторна робота № 2.2 Визначення в'язкості повітря капілярним методом	10
Лабораторна робота № 2.3 Визначення відношення теплоємностей повітря методом адіабатичного розширення	16
Лабораторна робота № 2.4 Визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом відриву кільця	25
Список використаної і рекомендованої літератури	29
Додаток 1. Заготовки звітів	30
Додаток 2. Таблиця коефіцієнтів Стьюдента	47

## ПЕРЕДМОВА

У методичних вказівках наведені лабораторні роботи з дисципліни «Фізика», розділ «Молекулярна фізика та термодинаміка», які виконуються в навчальних лабораторіях кафедри хімії та фізики.

Метою даних лабораторних робіт є вивчення фізичних процесів і явищ, які стосуються молекулярної фізики і термодинаміки. Завданням лабораторних робіт і методичних вказівок є ознайомлення студентів з основними теоретичними поняттями, формулами і законами, навчання студентів вимірюванню фізичних величин, визначенню точності вимірювальних приладів і оволодіння методами обробки результатів вимірювань. У процесі виконання лабораторної роботи студент оформляє звіт за встановленою формою. Для обробки результатів вимірювань методом Стюдента у додатку приведені значення відповідних коефіцієнтів [1].

У кожній лабораторній роботі вказана мета, теоретичні відомості, опис експериментальної установки, хід роботи, зразок таблиці результатів вимірювань і наведені контрольні запитання.

## Лабораторна робота № 2.1

### Визначення в'язкості рідини методом Стокса

**Мета роботи:** визначити в'язкість рідини.

**Дослідити:** умови рівномірного руху кулі в досліджуваній рідині.

#### Теоретичні відомості та опис установки

Внаслідок теплового руху молекули газів та рідин беруть участь у неперервному хаотичному русі, обмінюючись імпульсами і енергіями. У випадку, коли в середовищі існує неоднорідність густини або температури, виникають теплові і масові потоки, що називаються явищами переносу.

*Явища переносу – це процеси переносу маси (дифузія), енергії (теплопровідність) та імпульсу (внутрішнє тертя або в'язкість) напрямленого руху молекул для встановлення рівноваги.*

Явище *дифузії* полягає у взаємному проникненні і перемішуванні частинок речовини внаслідок неоднорідності густини чи різниці концентрацій компонент суміші в різних місцях об'єму. Потік маси, що виникає в процесі дифузії направлений в сторону зменшення густини (концентрації). Явище дифузії описується **законом Фіка**.

$$dM = -D \frac{d\rho}{dz} S dt ,$$

де  $D$  – дифузія, яка дорівнює масі речовини, що переноситься через одиницю площі за одиницю часу при одиничному градієнті густини;  $\frac{d\rho}{dz}$  – градієнт густини;  $S$  – площа поверхні;  $dt$  – час переносу.

Якщо вдовж осі  $Z$  існує градієнт температури  $\frac{dT}{dz}$ , то в напрямку зменшення температури виникає потік тепла через поверхню площею  $S$  перпендикулярну до осі  $Z$ . Явище *теплопровідності* описує **закон Фур'є**.

$$dQ = -K \frac{dT}{dz} S dt,$$

де  $dQ$  – кількість теплоти;  $dt$  – проміжок часу;  $K$  – теплопровідність речовини – це кількість теплоти, що проходить за одиницю часу через одиничну площу при одиничному градієнті температури. Механізм явища теплопровідності полягає в передачі енергії теплового хаотичного руху при зіткненні молекул.

*Явище внутрішнього тертя* (в'язкості) виникає при переносі імпульсу від шару з більшою швидкістю до шару з меншою швидкістю. У

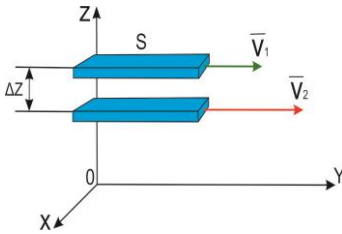


Рис. 1

результаті більш швидкий шар гальмується, повільніший – прискорюється (рис. 1). В результаті такого переносу між шарами, що рухаються з різними швидкостями виникає сила тертя, що сповільнює більш швидкий шар і прискорює

повільний шар рідини чи газу. Такі сили тертя напрямлені по дотичній до поверхні стичних (сусідніх) шарів. Експериментально доказано, що імпульс  $dp$ , що передається від шару до шару через поверхню, пропорційний градієнту швидкості  $\frac{dv}{dz}$  шарів, площі цієї поверхні  $S$  та часу переносу  $dt$

$$dp = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S dt. \quad (1)$$

В результаті між шарами виникає сила внутрішнього тертя

$$F = \left| \frac{dp}{dt} \right| = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S, \quad (2)$$

де  $\eta$  – в'язкість рідини або газу, яка залежить від природи речовини і її температури;  $S$  – площа стичних шарів Із (1) отримаємо вираз для в'язкості (коефіцієнта внутрішнього тертя), що буде мати вигляд:

$$\eta = \frac{F}{\left| \frac{dv}{dz} \right| S}. \quad (3)$$

**В'язкість  $\eta$**  – чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє між рухомими шарами одиничної площі при одиничному градієнті швидкості. В'язкість залежить від природи речовини і її температури. В системі СІ  $[\eta] = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = \text{Па} \cdot \text{с}$ .

При русі тіла в рідині або газі, внаслідок міжмолекулярних сил притягання, до його поверхні прилипає шар рідини і внаслідок цього кожен сусідній шар від шару до шару буде мати неперервне зменшення швидкості по відношенню до рухомого прилипло до тіла шару. В результаті неперервної змін швидкості між шарами виникає градієнт швидкості  $\frac{dv}{dz}$ ,

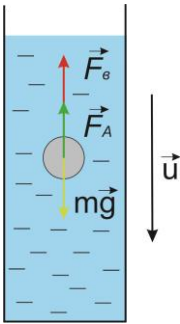


Рис. 2

що приводить до виникнення сили в'язкого (внутрішнього) тертя. Із (3), видно, що сила внутрішнього тертя між сусідніми шарами пропорційна градієнту швидкості:

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S. \quad (4)$$

Експериментально встановлено, що для кульки, яка рухається рівномірно з невеликою швидкістю  $v$ , сила тертя рівна:

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (5)$$

де  $r$  – радіус кульки;  $k$  – коефіцієнт пропорційності, який залежить від природи рідини і від форми та розмірів тіла.

При падінні в рідині на кульку діють такі сили (рис. 2):

$\vec{F}_A$  – сила Архімеда,  $m\vec{g}$  – сила тяжіння,  $\vec{F}_e$  – сила в'язкого тертя. Тоді модуль рівнодійної цих сил буде рівний

$$R = mg - F_A - F_e. \quad (6)$$

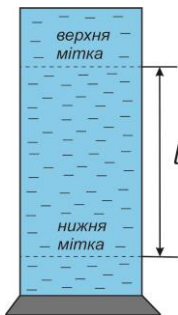


Рис. 3

При русі швидкість кульки буде збільшуватись до моменту, при якому рівнодійна стане рівною нулю і тоді можна записати, що

$$F_g = mg - F_A. \quad (7)$$

Оскільки  $mg = \rho_1 V g$ ,  $F_A = \rho_2 V g$  та

$V = \frac{4}{3} \pi r^3$ , то після підстановки останніх

співвідношень у (7) отримаємо

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 g (\rho_1 - \rho_2)}{\nu}, \quad (8)$$

де  $\rho_1$  – густина кульки,  $\rho_2$  – густина рідини,  $V$  – об'єм кульки,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Експериментальна установка для вимірювання в'язкості представляє собою циліндр (рис. 3) на якому у верхній і нижній частинах зроблені мітки. Верхня мітка знаходиться на висоті, що відповідає умові (7), тобто умові початку рівномірного руху кульки. Якщо відстань між мітками  $l$ , а час падіння  $t$ , то можна записати, що

$$\nu = \frac{l}{t}, \quad (9)$$

де  $l$  – відстань між мітками, тобто шлях рівномірного руху;  $t$  – час проходження кулькою відстані  $l$  (відстані між мітками).

Якщо виразити радіус кульки через її діаметр  $r = d/2$  (який легко виміряти мікрометром) і підставити у (8), з врахуванням (9), то отримаємо робочу формулу для визначення в'язкості рідини:

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{g (\rho_1 - \rho_2) t d^2}{l}. \quad (11)$$

### Хід роботи

1. Виміряти відстань  $l$  між верхньою і нижньою мітками на циліндрі за допомогою міліметрової шкали.
2. Виміряти 3 рази діаметр кульки  $d$  за допомогою мікрометра.



3. Кинути кульку в спеціальний отвір, що знаходиться на кришці циліндра.
4. Виміряти час проходження кулькою відстані між верхньою і нижньою мітками за допомогою секундоміра.
5. Записати значення  $\rho_1, \rho_2, g$ .
6. Визначити і записати в таблицю результатів вимірювань приладові похибки та похибки табличних величин.
7. Обчислити середнє значення величини  $d$ .
8. Обчислити за робочою формулою (11) в'язкість рідини  $\eta$ .
9. Обчислити відносну і абсолютну похибки, записати кінцевий результат.

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \frac{(\Delta \rho_1)^2 + (\Delta \rho_2)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2}$$

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

### Таблиця результатів вимірювань

$\rho_1 =$	$\Delta(\rho_1)_0 =$
$\rho_2 =$	$\Delta(\rho_2)_0 =$
$g =$	$\Delta g_0 =$
$l =$	$\Delta l_0 =$
	$\Delta d_0 =$
	$\Delta t_0 =$

	I кулька	II кулька	III кулька	Ср.
№	$d,$	$d,$	$d,$	
CI				
1				
2				
3				
Ср.				
$t,$				
$f,$				
$\Delta f,$				

### Контрольні запитання

1. Які явища відносяться до явищ переносу? Вказати характерні особливості кожного з цих явищ.
2. В чому полягає суть явища в'язкого тертя? Записати вираз для сили внутрішнього тертя.
3. Який фізичний зміст в'язкості?
4. Пояснити механізм виникнення сили в'язкого тертя, що діє на кульку, яка рухається у в'язкому середовищі.
5. Записати формулу Стокса. Вивести робочу формулу.
6. Як змінюється швидкість кульки при падінні в рідині? Чим це зумовлено?

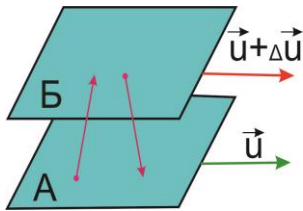
## Лабораторна робота № 2.2

### Визначення в'язкості повітря капілярним методом

**Мета роботи:** визначити в'язкість повітря.

#### Теоретичні відомості

До одного із явищ переносу відноситься внутрішнє тертя (див. л.р. 2.1 ). У явищі внутрішнього тертя спостерігається перенесення імпульсу



напрявленого руху із шарів, які рухаються швидше до повільніших і навпаки. Беручи участь у тепловому хаотичному русі, молекули переходять із шару в шар (рис.1) і при зіткненні між собою,

обмінюються імпульсами. При переході із шару А який, наприклад, рухається із більшою швидкістю, ніж шар В, (рис.1), молекули переносять імпульс впорядкованого руху і в результаті шар А гальмується, а шар В прискорюється, що приводить до виникнення між шарами сил тертя. Ці сили напрямлені по дотичній до поверхні стичних (сусідніх) шарів. Експериментально підтверджено, що імпульс руху  $dp$ , що

передається із шару в шар через поверхню, пропорційний градієнту швидкості  $\frac{dv}{dz}$  шарів, площі цієї поверхні  $S$  та часу переносу  $dt$  і тоді можна записати, що

$$dp = \eta \left| \frac{du}{dz} \right| S dt. \quad (1)$$

В результаті між шарами, що рухаються з різними швидкостями, виникає сила внутрішнього тертя, що рівна:

$$F = \left| \frac{dp}{dt} \right| = \eta \left| \frac{du}{dz} \right| S, \quad (2)$$

де  $\eta$  – в'язкість (коефіцієнт внутрішнього тертя) рідини або газу. Із співвідношення (2) в'язкість буде рівна

$$\eta = \frac{F}{\left| \frac{du}{dz} \right| S}. \quad (3)$$

Із (3) видно, що **в'язкість  $\eta$**  - чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє між шарами одиничної площі при одиничному градієнті швидкості. В'язкість  $\eta$  залежить від природи речовини і її температури.

Одиниця вимірювання в'язкості в системі СІ  $[\eta] = \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = \text{Па} \cdot \text{с}$ . В'язкість ідеального газу, згідно молекулярно-кінетичної теорії, рівна визначається за формулою:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle, \quad (4)$$

де  $\rho$  – густина газу;  $\langle \lambda \rangle$  – середня довжина вільного пробігу частинок (атомів або молекул),  $\langle \lambda \rangle$  - це відстань, що проходить частинка (атом або молекула) за проміжок часу між двома послідовними зіткненнями;  $\langle v \rangle$  - середня арифметична швидкість теплового руху молекул, що визначається за формулою:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (5)$$

де  $\mu$  – молярна маса газу;  $R$  – універсальна газова стала;  $T$  – термодинамічна температура газу.

Одним із методів визначення в'язкості є *метод Пуазейля*. За цим методом в'язкість визначають вимірюючи швидкість витікання певного об'єму середовища через капіляр відомого діаметра (радіуса).

Виділимо в капілярі з газом уявний циліндричний об'єм, радіусом  $r$  і довжиною  $l$  (рис.2).

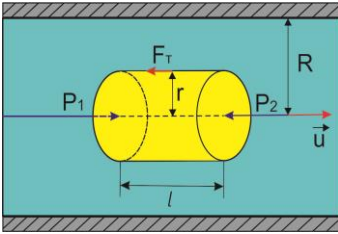


Рис.2

Нехай тиски на його основах будуть  $P_1$  і  $P_2$ . При усталеному русі газу ( $u = \text{const}$ ), сила тиску на циліндр буде рівною  $F = (P_1 - P_2) \cdot \pi r^2$  і ця сила урівноважується силою внутрішнього тертя  $F_T$ , що діє на бічну поверхню циліндра з боку

зовнішніх шарів газу і тоді:

$$F - F_T = 0 \quad (6)$$

Оскільки  $F_T$  визначається за (2) і враховуючи, що  $S = 2\pi rl$  а також, що швидкість  $u(r)$  зменшується при віддаленні від осі труби, тобто  $\frac{du}{dr} < 0$ , запишемо

$$F_T = -\eta \frac{du}{dr} 2\pi rl. \quad (7)$$

Із умови усталеного режиму слідує, що:

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 + \eta \frac{du}{dr} 2\pi rl = 0. \quad (8)$$

Далі, інтегруючи (7), одержимо:

$$u(r) = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} r^2 + C, \quad (9)$$

де  $C$  – стала інтегрування, яка визначається із граничних умов. Оскільки, при  $r = R$  швидкість газу повинна перетворитися на нуль ( $u = 0$ ) то, враховуючи такі граничні умови, отримаємо:

$$u(r) = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (10)$$

Підрахуємо об'ємну витрату газу  $Q$ , що рівна об'єму газу, який протікає за одиницю часу через поперечний переріз капіляра. Через кільцеву площу з внутрішнім радіусом  $r$  і зовнішнім  $r + dr$ , за одну секунду протікає об'єм газу, рівний

$$dQ = 2\pi r \cdot u(r) dr \quad (11)$$

Підставивши (10) в (11), і проінтегрувавши, отримаємо

$$Q = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4. \quad (12)$$

Вираз (12) називається формулою Пуазейля, яку використаємо для експериментального визначення в'язкості газу у даній лабораторній роботі. Із (12) слідує, що

$$\eta = \pi \frac{P_1 - P_2}{8Ql} R^4 = \frac{\Delta P R^4 \pi}{8Ql}. \quad (13)$$

Оскільки  $\Delta P = \rho g \Delta h$  – різниця тисків, що вимірюється за допомогою рідинного манометра;  $\rho$  – густина рідини в манометрі;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\Delta h$  – різниця рівнів води в манометрі, то запишемо:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \rho g \Delta h}{8Ql}. \quad (14)$$

Формулу Пуазейля (12) було одержано в припущенні ламінарної течії газу або рідини. Ця формула справедлива для ділянки капіляра, в якій встановився усталений режим течії за законом розподілу швидкостей (10) по перерізу трубки. Така течія встановлюється на деякій відстані від входу в капіляр, тому для досягнення достатньої точності експерименту,

необхідне виконання умови  $R \ll L$ , де  $R$  – радіус капіляра,  $L$  – довжина капіляра.

## Опис установки

Для визначення коефіцієнта в'язкості повітря використовується експериментальна установка ФПТ 1-1, загальний вигляд якої зображено на рис.3. Установка складається з блоку робочого елемента 1, блоку приладів 2, стійки 3, капіляра 4, реометра 5, манометра 6.

Повітря в капіляр 4 подається мікрокомпресором, розміщеним у блоці приладів 2. Об'ємна витрата повітря вимірюється реометром 5, а потрібне її значення встановлюється регулятором "ВОЗДУХ", який знаходиться на передній панелі блоку робочого елемента 1. Для вимірювання різниці тисків повітря на кінцях капіляра призначений  $U$  – подібний водяний манометр 6. Геометричні розміри капіляра – радіус  $R$ , та довжина  $L$  вказані на панелі установки.

## Хід роботи

1. Увімкнути установку за допомогою тумблера "СЕТЬ".

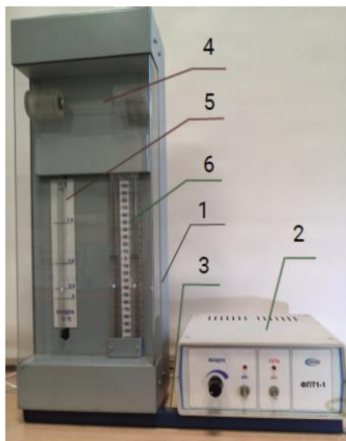


Рис.3

2. За допомогою регулятора "ВОЗДУХ" встановити вибране значення об'ємної витрати повітря  $Q$  за показами реометра ( $0,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ ).

3. Виміряти різницю рівнів води  $\Delta h$  в колінах манометричної трубки

4. Повторити вимірювання за пунктами 2 - 3 для декількох значень об'ємної витрати повітря  $Q$  ( $0,50 \div 2,00$ )  $\cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ .

5. Встановити регулятор витрати повітря на мінімум, після чого вимкнути установку тумблером "СЕТЬ".

6. Записати значення  $\rho$ ,  $\rho_p$ ,  $g$ ,  $R$ ,  $l$ ,  $T$ .

7. Визначити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.

8. Для кожного режиму обчислити за робочою формулою (14) в'язкість повітря  $\eta$ .
9. Обчислити середнє значення величини  $\eta$ .
10. Обчислити абсолютну та відносну похибки і записати кінцевий результат у вигляді

$$\Delta \eta_i = \left| \eta_{cp} - \eta_i \right| \quad \varepsilon = \frac{\Delta \eta_{cp}}{\eta_{cp}} \cdot 100\%$$

11. Обчислити середню арифметичну швидкість  $\langle v \rangle$

формулою  $\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$ , врахувавши, що  $\mu = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ ,

$$R = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль К}}.$$

12. Обчислити середню довжину вільного пробігу молекул  $\langle \lambda \rangle$

за формулою  $\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho_{п} \langle v \rangle}$

### Таблиця результатів вимірювань

$\rho =$	$\Delta \rho_0 =$	$\rho_{п} =$
$\Delta(\rho_{п})_0 =$		
$R =$	$\Delta R_0 =$	
$T =$	$\Delta T_0 =$	
$g =$	$\Delta g_0 =$	
$l =$	$\Delta l_0 =$	

№	$Q,$	$\Delta h,$	$\eta,$	$\Delta \eta,$
СІ				
1				
2				
3				
4				
5				
Ср				
.				

### Контрольні запитання

1. Дати визначення явищ переносу (див. роботу №2.1).
2. Сформулювати закони Фіка, Фур'є та Ньютона для явищ переносу (див. роботу №2.1).
3. Який фізичний зміст в'язкості? В яких одиницях вимірюється ця величина в системі СІ?
4. Записати формулу для в'язкості ідеального газу.
5. Записати формулу середньої арифметичної швидкості теплового руху молекул ідеального газу. Від яких фізичних величин вона залежить?
6. Що таке середня довжина вільного пробігу? Від яких фізичних величин вона залежить?
7. В чому полягає суть капілярного методу визначення в'язкості газів?
8. Виведіть формулу Пуазейля. За яких умов її можна застосувати?

### Лабораторна робота № 2.3

#### Визначення відношення теплоємностей повітря методом адіабатичного розширення

**Мета роботи:** визначити коефіцієнт Пуассона.

#### Теоретичні відомості

(Теорія до даної роботи описана в лекційному курсі (інтерактивного комплексу Ч І) §2.8-2.12)

Теплоємність – це властивість тіла накопичувати теплову енергію. Для кількісної характеристики теплоємності вводять поняття теплоємності тіла, питомої теплоємності і молярної теплоємності. *Теплоємність тіла (C)* – це фізична величина, що чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно надати тілу,

щоб нагріти його на 1К. 
$$C = \frac{\delta Q}{dT},$$
 де  $\delta Q$  – кількість



теплоти, що передається тілу в процесі теплопередачі і змінює температуру тіла на  $dT$  кельвінів.

*Питома теплоємністю* ( $c$ ) називають кількість теплоти, яку необхідно надати одиниці маси (в СІ одному кілограму) речовини, щоб підвищити її температуру на 1К. *Молярною теплоємністю* ( $c_\mu$ ) називають кількість теплоти, яку необхідно надати одному молю речовини, щоб підвищити її температуру на 1К. Із визначень теплоємностей слідує, що одиниці вимірювання  $[C] = \text{Дж/К}$ ,  $[c] = \text{Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $[c_\mu] = \text{Дж/(моль}\cdot\text{К)}$  а також, що питома і молярна теплоємності зв'язані співвідношенням

$$c_\mu = \mu c, \quad (1)$$

де  $\mu$  – молярна маса речовини.

Згідно першого закону термодинаміки

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (2)$$

де  $\delta Q$  – кількість теплоти;  $dU$  – елементарна зміна внутрішньої енергії;  $\delta A$  – елементарна робота.

Елементарна робота розширення одного моля ідеального газу рівна

$$\delta A = p dV = \frac{RT}{V} dV. \quad (3)$$

Елементарний приріст внутрішньої енергії одного моля ідеального газу рівна

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

Процеси, що відбуваються при постійних значеннях певних термодинамічних параметрів називаються ізопроцесами. Для  $T=\text{const}$  процес називається ізотермічний, для  $P=\text{const}$  – ізобаричний, для  $V=\text{const}$  – ізохоричний. Процес, що відбувається при відсутності теплопередачі ( $\delta Q = 0$ ) називається адіабатичний. Перший закон термодинаміки у застосуванні до таких процесів має вигляд:

$$\text{для ізотермічного процесу} \quad \delta Q = \delta A,$$

$$\text{для ізохорного процесу} \quad \delta Q = dU,$$

для ізобарного процесу  $\delta Q = dU + \delta A$ ,

для адіабатичного процесу  $\delta Q = 0$ .

Робота розширення ідеального газу для ізопроцесів визначається за формулами:

ізотермічний процес  $A = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1}$ ,

ізохоричний процес  $A = 0$ ,

ізобаричний процес  $A = p \Delta V$ ,

адіабатичний процес  $A = \nu \cdot C_{V} \cdot \Delta T$ ,

де  $\nu = \frac{m}{\mu}$  – кількість молей ідеального газу.

Теплоємність газів істотно залежить від характеру передачі теплоти. Молярні теплоємності при сталому об'ємі  $c_{\mu V}$  та при сталому тиску  $c_{\mu p}$  для ідеального газу визначаються за формулами:

$$c_{\mu V} = \frac{i}{2} R, \quad (5)$$

$$c_{\mu p} = \frac{i+2}{2} R, \quad (6)$$

де  $i$  – кількість ступеней вільності молекули.

Відношення теплоємностей при  $P = \text{const}$  та при  $V = \text{const}$  називається **коефіцієнтом Пуассона**

$$\gamma = \frac{c_{\mu p}}{c_{\mu V}} = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_p}{C_v}. \quad (7)$$

Визначення  $\gamma$  для повітря є метою даної роботи.

Із (5) і (6) слідує, що коефіцієнт Пуассона для ідеального газу залежить тільки від кількості ступеней вільності ( $i$ ) і виражається за формулою

$$\gamma = \frac{i+2}{i}. \quad (8)$$

Із першого закону термодинаміки та виразу для роботи для адіабатичного процесу, рівняння (7) та рівняння стану ідеального газу ( $pV = \nu RT$ ), отримуємо диференціальне рівняння  $(\gamma - 1)\frac{dV}{V} + \frac{dT}{T} = 0$ , інтегруючи яке, отримуємо

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}, \quad (9)$$

або у іншій формі

$$pV^{\gamma} = \text{const}. \quad (10)$$

Рівняння (9) та (10) є рівняннями адіабати, які також називаються рівняннями Пуассона.

### **Опис установки та виведення робочої формули** **Завдання 1.**

Для експериментального визначення відношення  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$

у газах можна скористатись установкою, суть якої зображена на рис. 1. Вона складається із посудини  $\Pi$ , яка з'єднана з манометром  $M$ . Посудина сполучається з повітряним насосом через кран  $K_1$  та з атмосферним повітрям через кран  $K_2$ .

На початку експерименту при відкритому крані  $K_1$  і закритому  $K_2$  потрібно накачати повітря у посудину. Після накачування кран  $K_1$  закривається. Оскільки повітря при накачуванні нагрівається, то слід почекати деякий час доки воно не охолоне до кімнатної температури, за якої його тиск дорівнюватиме  $p_1 = H + h_1$ , де  $H$  – атмосферний тиск,  $h_1$  – надлишковий тиск, що показує манометр у міліметрах водяного стовпчика.

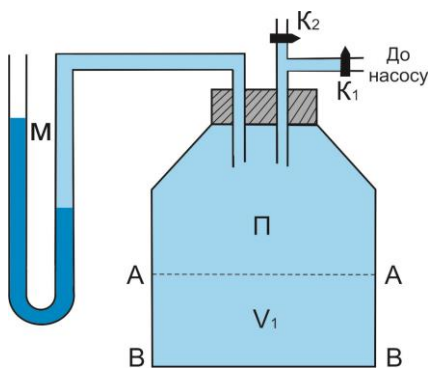


Рис.1

У другій частині експерименту короткочасно відкривають кран  $K_2$ , щоб тиск повітря у посудині зрівнявся з атмосферним  $p = H$ , після чого кран  $K_2$  знову закривають.

Внаслідок адіабатного розширення повітря у посудині охолоне (процес відбувається досить швидко). Тому у другій частині експерименту слід знову почекати деякий час доки температура повітря не стане кімнатною і його тиск дорівнюватиме  $p_2 = H + h_2$ .

Наприкінці першої частини досліду виділимо уявно ту частину газу об'ємом  $V_1$ , яка після розширення (перед закриттям крану  $K_2$ ) займе весь об'єм посудини  $V$ . На рис.1 ця частина виділена площинами AA і BB. Для адіабатного розширення газу від об'єму  $V_1$  до  $V$  і запишемо рівняння Пуассона

$$p_1 V_1^\gamma = p V^\gamma. \quad (11)$$

Порівнюючи кінцевий стан газу, який залишився у посудині, із його початковим станом (перед відкриттям крану  $K_2$ ), легко помітити, що обидва вони відносяться до однієї й тієї ж температури й описуються законом Бойля-Маріотта

$$p_1 V_1 = p_2 V. \quad (12)$$

З останніх двох рівнянь можна виключити об'єми  $V$  і  $V_1$ , що не піддаються вимірюванню. Для цього слід рівняння (12) піднести до степеня  $\gamma$  і поділити його на (11). У

результаті одержимо  $\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^\gamma = \frac{p_1}{p}$ . Логарифмуючи останню рівність, знайдемо вираз для обчислення  $\gamma$

$$\gamma = \frac{\ln \frac{p_1}{p}}{\ln \frac{p_1}{p_2}}. \quad (13)$$

Підставивши у останню рівність значення  $p_1 = H + h_1$ ,  $p_2 = H + h_2$ ,  $p = H$ , одержимо

$$\gamma = \frac{\ln(1+h_1/H)}{\ln \frac{1+h_1/H}{1+h_2/H}} = \frac{\ln(1+h_1/H)}{\ln(1+h_1/H) - \ln(1+h_2/H)}. \quad (14)$$

Оскільки величини  $h_1/H$  і  $h_2/H$  значно менші одиниці ( $H \approx 10\text{ м}$ ), то застосовуючи наближену математичну рівність  $\ln(1+x) \approx x$ , яка справджується при  $x \ll 1$ , одержимо робочу формулу

$$\gamma = \frac{h_1}{h_1 - h_2}. \quad (15)$$

Оскільки тиски  $h_1$  та  $h_2$  пропорціональні різницям рівнів рідини в манометрі, а у формулу (15) входять відношення цих тисків, то під  $h_1$  і  $h_2$  можна розуміти різницю рівнів води в манометрі.

#### **Хід роботи.**

1. Закрити кран  $K_2$ . Грушею накачати в балон повітря стільки, щоб різниця рівнів води в манометрі була по можливості максимальною. Закрити кран  $K_1$ .
2. Через 2-3 хвилини, коли температура повітря в посудині стане рівною кімнатній (рівні води в колінах манометра уже не будуть змінюватись), знайти різницю рівнів води в колінах манометра  $h_1$ .
3. Відкрити на короткий час кран  $K_2$  і як тільки тиск повітря у посудині дорівнюватиме атмосферному (рівні води в колінах манометра однакові), закрити кран  $K_2$ .
4. Через 2-3 хвилини, коли температура повітря в посудині стане рівною кімнатній (рівні води в колінах манометра уже не будуть змінюватись), знайти різницю рівнів води в колінах манометра  $h_2$ .
5. Дослід повторити 5 раз за пунктами 1-4.
6. Оцінити паспортні приладові похибки приладів ( $\Delta h_{10}, \Delta h_{20}$ ).
7. Обчислити за робочою формулою (15) коефіцієнт Пуассона  $\gamma$ .
8. Визначити середнє значення  $\gamma$ .

9. Обчислити абсолютну і відносну похибки, записати кінцевий результат

$$\Delta \gamma_i = \left| \gamma_{cp} - \gamma_i \right|, \quad \varepsilon = \frac{\Delta \gamma_{cp}}{\gamma_{cp}} \cdot 100\%$$

**Таблиця результатів вимірювань**

$\Delta h_{10} =$

$\Delta h_{20} =$

№	$h_1,$	$h_2,$	$\gamma,$	$\Delta \gamma,$
СІ				
1				
2				
3				
4				
5				
Ср.				

**Завдання 2**

Для експериментального визначення коефіцієнта

Пуассона  $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$  застосовується установка ФПТ1-6 (рис.2), яка

складається з блоку манометра 1, блоку приладів 2, блоку робочого елемента 3. На лицьовій панелі блоку БП-6 розміщені пристрої керування, тумблер «Мережа» 4, елементи світлової індикації, пневмотумблер для випускання повітря в атмосферу. Візуально блок приладу розділений на два модулі:

1) модуль живлення “Мережа” з тумблером вмикання живлення мікропроцесора та світлодіодом;

2) модуль “Повітря” з тумблером вмикання подачі повітря в колбу та світлодіодом.

Для підключення колби до пневмомережі над нею є два вивідних штуцери. Блок манометра призначений для вимірювання тиску в колбі. У верхній частині цього блоку розміщена пастка для води. Стійка є настільною конструкцією, на якій закріплені блоки БП-6 та блок манометра.

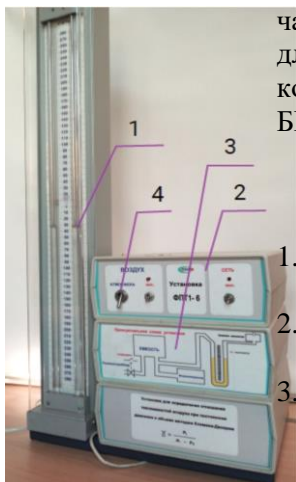


Рис. 2

### Хід роботи

1. Увімкнути установку тумблером “Мережа”.
2. Увімкнути подачу повітря у колбу тумблером “Повітря”.
3. За допомогою манометра контролювати тиск у колбі. Коли різниця рівнів води у манометрі досягне 150-250 мм вод. ст., припинити подачу повітря.
4. Зачекати 2-3хв, доки температура повітря у колбі зрівняється з температурою навколишнього повітря. У колбі при цьому встановлюється сталий тиск  $p_1 = H + h_1$ . Визначити різницю рівнів  $h_1$  і одержане значення занести до таблиці результатів.
5. На короткий час з’єднати колбу з атмосферою, швидко повернувши за годинниковою стрілкою ручку клапана “Атмосфера” із одного крайнього положення до іншого.
6. Через 2-3хв, коли в колбі встановиться сталий тиск  $p_2 = H + h_2$ , визначити різницю рівнів  $h_2$  і одержане значення занести до таблиці результатів.
7. Повторити виміри за пп.2-6 не менше 5 разів для різних значень величин  $h_1$ .
8. Вимкнути установку тумблером “Мережа”.
9. Обчислити за робочою формулою (15) коефіцієнт Пуассона  $\gamma$ .
10. Визначити середнє значення  $\gamma$ .

11. Обчислити абсолютну зі відносну похибки, записати кінцевий результат

$$\Delta \gamma_i = \left| \gamma_{cp} - \gamma_i \right| \quad \varepsilon = \frac{\Delta \gamma_{cp}}{\gamma_{cp}} \cdot 100\%$$

**Таблиця результатів вимірювань**

$\Delta h_{10} =$

$\Delta h_{20} =$

№	$h_1,$	$h_2,$	$\gamma,$	$\Delta \gamma,$
СІ				
1				
2				
3				
4				
5				
Ср.				

**Контрольні запитання**

1. Що розуміють під внутрішньою енергією тіла, кількістю теплоти? Сформулюйте перший закон термодинаміки та запишіть його математичний вираз.
2. Який процес називають ізотермічним, ізохорним, ізобарним, адіабатним? Запишіть вирази роботи розширення ідеального газу для цих процесів.
3. Запишіть перший закон термодинаміки для ізопроцесів та адіабатного процесу. Який термодинамічний зміст універсальної газової сталої?
4. Дайте визначення числа ступенів вільності молекул. Скільки ступенів вільності мають молекули з різною кількістю атомів? Запишіть вираз для внутрішньої енергії ідеального газу.
5. Записати і пояснити рівняння Майера.
6. Що називають питомою та молярною теплоємностями і який зв'язок між ними? Що таке  $C_p$  і  $C_V$ ,  $c_p$  і  $c_V$  та  $c_{\mu p}$  і  $c_{\mu V}$   
Чому для газів  $C_p > C_V$  ( $c_{\mu p} > c_{\mu V}$ ,  $c_p > c_V$ )?



7. Обчисліть  $\gamma$  для повітря, вважаючи його двоатомним газом. Порівняйте теоретичне значення  $\gamma$  з одержаним вами експериментальними даними. Зробіть висновок.
8. Виведіть робочу формулу.

## Лабораторна робота № 2.4

### Визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом відриву кільця

**Мета роботи:** визначити коефіцієнт поверхневого натягу води.

**Дослідити:** залежність поверхневого натягу води від температури

#### Теоретичні відомості

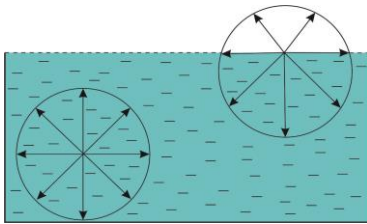


Рис. 1

Рідина займає за своїми властивостями проміжний стан між газами і твердими тілами. Зокрема, рідина як і тверде тіло, зберігає об'єм але подібно до газів не зберігає своєї форми.

Для кристалічного твердого стану характерне упорядковане розташування частинок (атомів або молекул) а у газах частинки розташовані хаотично і до того ж неперервно змінюють своє положення. У рідинах, по відношенню до довільної частинки, розташування найближчих до неї сусідів упорядковане і спостерігається так званий ближній порядок. В кристалічних тілах впорядковане розташування частинок по відношенню до довільної частинки спостерігається на відстанях, що набагато перевищують розміри самих частинок, тобто має місце дальній порядок.

Тепловий рух у рідинах має свої особливості, які полягають у тому, що кожна молекула протягом деякого часу (час осілого життя) коливається біля положення рівноваги, після чого стрибкоподібно (стрибки Френкеля) переходить до іншого

положення, переміщуючись на відстань порядку розмірів самих частинок.

Сили взаємодії між частинками із збільшенням відстані зменшуються і тому кожна молекула рідини взаємодіє лише на певній відстані, що називається радіусом молекулярної взаємодії, що в свою чергу формує так звану сферу молекулярної взаємодії. В результаті, кожна молекула зазнає притягання зі сторони найближчих сусідів, що знаходяться в межах сфери молекулярної взаємодії, центр якої співпадає з даною молекулою. Рівнодійна всіх сил для молекули, що знаходиться в об'ємі рідини дорівнює нулю. Для молекул, що знаходяться в поверхневому шарі рідини, оточення молекул зі сторони об'єму і поверхні різне (над поверхнею є тільки пара рідини, молекули якої знаходяться набагато далі від молекули на поверхні, ніж зі сторони об'єму), а тому, рівнодійна сил не рівна нулю і напрямлена всередину рідини (рис.1). Така ситуація спричинює формування надлишкової енергії поверхневої молекули і тому, якщо на рідину не діють ніякі інші сили, то рідина набуває форми, що відповідає найменшій кількості молекул на поверхні, тобто форму сфери, що і підтверджується в експериментах.

При існуванні результуючої сили, що діє на кожен поверхневу молекулу виникає сила молекулярного тиску, завдяки якій рідина приймає сферичну форму. З цієї ж причини виникає сила, що діє на розтягнуту плівку рідини, що намагається зменшити її поверхню. Всі явища, які викликані існуванням сил молекулярного тиску, пояснюються аналогічним чином. Для того, щоб розтягнуту плівку втримати в рівновазі, необхідно до лінії її границі прикласти силу  $f$ , дотичну до поверхні рідини. Цю силу називають силою поверхневого натягу, яка тим більша, чим більша довжина граничної плівки  $l$ . Таким чином можна записати

$$f = \alpha \cdot l. \quad (1)$$

Коефіцієнт  $\alpha$  називається коефіцієнтом поверхневого натягу і залежить від природи рідини і її температури. Із співвідношення (1) слідує, що  $\alpha$  чисельно дорівнює силі, прикладеній до одиниці довжини краю поверхневої плівки рідини. З

підвищенням температури  $\alpha$  зменшується. При наближенні температури рідини до деякого критичного значення, коефіцієнт поверхневого натягу прямує до нуля. Це пояснюється тим, що при такій критичній температурі різниця між рідким і газоподібним станами зникає.

Для визначення коефіцієнта поверхневого натягу використовують торсійні ваги, зображенні на рис. 2. Визначимо силу  $P$ , при якій кільце (3) відривається від поверхні води. В момент відриву кільця ця сила  $P$  зрівноважує силу поверхневого натягу. Нехай зовнішній діаметр кільця  $D$ , а внутрішній  $d$ . При підніманні кільця над поверхнею рідини між нею та кільцем утворюється плівка. Зовнішня і внутрішня поверхні цієї плівки тягнуть кільце вниз з відповідними силами  $\alpha \cdot \pi D$  (зовнішня) та  $\alpha \cdot \pi d$  (внутрішня).

Результуюча сила, що тягне кільце вниз дорівнює

$$P = \alpha \pi (D + d). \quad (2)$$

Якщо товщина кільця  $h$ ,  $d = D - 2h$  і (4) має вигляд

$$P = 2\alpha \pi (D - h). \quad (3)$$

Звідси

$$\alpha = \frac{P}{2\pi(D - h)}. \quad (4)$$

Співвідношення (6) являється робочою формулою.

Відносна похибка може бути знайдена з (6) за методом диференціювання:

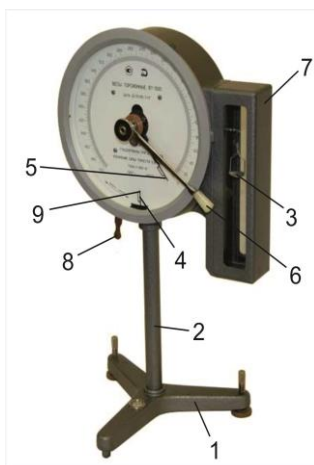


Рис 2

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p}{p}\right)^2 + \frac{(\Delta D)^2 + (\Delta h)^2}{(D - h)^2}} \quad (5)$$

### Хід роботи

1. Відкрити кришку 7 і вийняти підвішене на нитці кільце 3.
2. Штангенциркулем виміряти зовнішній діаметр кільця  $D$  та

товщину кільця  $h$ .

3. Звільнити коромисло 8.

4. Повільно повертаючи (проти годинникової стрілки) поводок 6, сумістити контрольну стрілку 4 з контрольним штрихом циферблата 9. Записати покази стрілки 5 в  $P_0$ .

5. Опустити кільце в посудину з водою. Повільно повертаючи проти годинникової стрілки поводок 6 добитися відриву кільця від поверхні води. Записати покази стрілки 5 в  $P'$ .

6. Порахувати силу  $P$  (за формулою  $P = P' - P_0$ ). Результати вимірювань внести в таблицю.

7. За формулою (6) обрахувати коефіцієнт поверхневого натягу  $\alpha$ .

### Таблиця результатів вимірювань

$$\pi = \quad \Delta\pi_0 = \quad \Delta P_0 = \quad \Delta D_0 = \quad \Delta h_0 =$$

№ з.п.	$D$	$h$	$P$	$P'$	$P_0$
СІ					
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
Ср.					

### Контрольні запитання

1. Описати характер теплового руху в твердих тілах, рідинах і газах.

2. Що таке ближній і дальній порядок? Як він змінюється з температурою?

3. Які сили діють між молекулами рідини? Що таке радіус молекулярної дії?

4. Пояснити причини виникнення поверхневого натягу. Який напрямок має сила поверхневого натягу?

5. Що таке коефіцієнт поверхневого натягу? Як він залежить від температури?
6. Чому при відсутності зовнішніх сил рідина має вигляд сфери?

### **5. Список використаної і рекомендованої літератури**

1. Гаєвський В. Р., Гаращенко, О. В., Соляк Л. В., Мороз М. В. 05-06-133М Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Фізика». Рівне : НУВГП, 2024, 47 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/28949/>
2. Курс фізики / Зачек І. Р., Кравчук І. М., Романишин Б. М. та ін. ; за ред. Лопатинського І. Є., Львів : Бескид Біт, 2002.
3. Олексин Д. І., Мороз В. М. Загальна фізика. Частина 1. Конспект лекцій для студентів заочної форми навчання. Рівне, 2002, 073-89.
4. Загальна фізика : навчальний посібник, ч. I / за редакцією Ковалець М. О., Бялик М. І. та ін. Рівне : НУВГП, 2009. 396 с.
5. Загальний курс фізики /у трьох томах; Кучерук І. М. та ін. К., 1999.
6. Гапчин Б. М., Дутчак Я. Й., Френчко В. С. Молекулярна фізика. Лабораторний практикум : навч. посібник. Львів : Світ, 1990. 240 с.
7. Hugh D. Young, Roger A. Freedman. University physics with modern physics. 14<sup>th</sup> edition. Pearson Education Limited. 2016. 1600 p.

**Заготовки звітів із лабораторних робіт**

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного господарства  
та природокористування

Кафедра хімії та фізики

**Звіт**

з лабораторної роботи № 2.1

***Визначення в'язкості рідини методом  
Стокса***

***Виконав:***

*студент групи* \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*(Прізвище І.П.)*

***Перевірив:***

\_\_\_\_\_  
*(Прізвище І.П.)*

***Рівне 20 р***

**МЕТА РОБОТИ:** визначити в'язкість рідини  $\eta$ .

**РОБОЧА ФОРМУЛА:**

$$\eta = \frac{1}{18} \frac{g(\rho_1 - \rho_2) \cdot f}{l} \quad f = d^2 \cdot t$$

$\eta$  - коефіцієнт в'язкості,

$g$  - прискорення вільного падіння,

$\rho_1$  - густина кульки,

$\rho_2$  - густина рідини,

$l$  - віддаль між верхніми краями двох паперових смужок на циліндрі з рідиною,

$t$  - час падіння кульки,

$d$  - діаметр кульки.

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ:**

$$\rho_1 = \quad \Delta(\rho_1)_0 = \rho_2 =$$

$$\Delta(\rho_2)_0 = \quad g = \quad \Delta g_0 =$$

$$l = \quad \Delta l_0 = \quad \Delta d_0 = \quad \Delta t_0 =$$

	I кулька	II кулька	III кулька	Ср.
	$d$	$d$	$d$	
СІ				
1.				
2.				
3.				
Ср.				
$t,$				
$f,$				
$\Delta f,$				

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ:

$$\eta =$$

### ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК:

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial g} \Delta g\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial\rho_1} \Delta\rho_1\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial\rho_2} \Delta\rho_2\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial f} \Delta f\right)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial\ell} \Delta\ell\right)^2}$$

не обчислювати, це загальна формула похибки непрямого вимірювання

Повні абсолютні похибки прямих вимірювань:

$$\Delta g = \Delta g_{np} = \frac{2}{3} \Delta g_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,05 = 0,03 \frac{M}{c^2}$$

$$\Delta\rho_1 = \Delta\rho_{1np} = \frac{2}{3} \Delta\rho_{10} =$$

$$\Delta\rho_2 = \Delta\rho_{2np} = \frac{2}{3} \Delta\rho_{20} =$$

$$\Delta\ell = \Delta\ell_{np} = \frac{2}{3} \Delta\ell_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \approx 0,333 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta f = \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3}{3} =$$

$$\Delta f_1 = |f_1 - f_{cp}| =$$

$$\Delta f_2 = |f_2 - f_{cp}| =$$

$$\Delta f_3 = |f_3 - f_{cp}| =$$

Частинні похідні з виділенням в них робочої формули::



$$\frac{\partial \eta}{\partial g} = \frac{(\rho_1 - \rho_2) \cdot f}{18\ell} = \frac{\eta}{g}; \quad \frac{\partial \eta}{\partial \rho_1} = \frac{g \cdot f}{18\ell} = \frac{\eta}{\rho_1 - \rho_2};$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial \rho_2} = -\frac{g \cdot f}{18\ell} = -\frac{\eta}{\rho_1 - \rho_2}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial f} = \frac{g(\rho_1 - \rho_2)}{18\ell} = \frac{\eta}{f}; \quad \frac{\partial \eta}{\partial \ell} = -\frac{g(\rho_1 - \rho_2)f}{18\ell^2} = -\frac{\eta}{\ell}.$$

Підставимо частинні похідні в формулу для  $\Delta \eta$  та обрахуємо

$$\varepsilon = \frac{\Delta \eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \frac{(\Delta \rho_1)^2 + (\Delta \rho_2)^2}{(\rho_1 - \rho_2)^2} + \left(\frac{\Delta \ell}{\ell}\right)^2 + \left(\frac{\Delta f}{f}\right)^2} =$$

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

**КІНЦЕВИЙ РЕЗУЛЬТАТ:**

$$\eta = \eta_{cp} \pm \Delta \eta =$$

$$\varepsilon = \quad \%$$

### Контрольні питання

1. Які явища відносяться до явищ переносу? Вказати характерні особливості кожного з цих явищ. Записати закони Фіка, Фур'є, Ньютона
2. В чому полягає суть явища в'язкого тертя? Записати вираз для сили внутрішнього тертя.
3. Який фізичний зміст в'язкості?
4. Пояснити механізм виникнення сили в'язкого тертя, що діє на кульку, яка рухається у в'язкому середовищі.
5. Записати формулу Стокса.
6. Як змінюється швидкість кульки при падінні в рідині? Чим це зумовлено?

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства  
та природокористування  
Кафедра хімії та фізики

**Звіт**  
з лабораторної роботи № 2.2  
*Визначення в'язкості повітря капілярним  
методом*

**Виконав:**  
студент групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Прізвище І.П.)

**Перевірив:**

\_\_\_\_\_  
(Прізвище І.П.)

*Рівне 20* р

**МЕТА РОБОТИ:** визначити в'язкість повітря  $\eta$ , середню арифметичну швидкість  $\langle v \rangle$  і середню довжину вільного пробігу молекул  $\langle \lambda \rangle$ .

**РОБОЧІ ФОРМУЛИ:**

$$\eta = \frac{\pi R_k^4 \rho g \Delta h}{8 Q l}, \quad \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}},$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho_n \langle v \rangle},$$

$\eta$  - коефіцієнт в'язкості,  $R_k$  - радіус капіляра,  $\rho$  - густина води,

$\rho_n$  - густина повітря,  $g$  - прискорення вільного падіння,

$\Delta h$  - різниця рівнів води в манометрі;  $Q$  - об'ємна витрата повітря,

$l$  - довжина капіляра,  $\langle v \rangle$  - середня арифметична швидкість,

$R$  - універсальна газова стала,  $T$  - термодинамічна температура,

$\mu$  - молярна маса повітря,  $\langle \lambda \rangle$  - середня довжина вільного пробігу молекул.

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ:**

$$\rho = \quad \Delta \rho_0 = \quad \rho_n = \quad \Delta(\rho_n)_0 =$$

$$R_k = \quad \Delta(R_k)_0 = \quad T =$$

$$\Delta T_0 =$$

$$g = \quad \Delta g_0 = \quad l = \quad \Delta l_0 =$$

$$\mu = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$R = 8.31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль К}}$$

$$\pi = 3,14$$

	$Q$	$\Delta h$	$\eta$	$\Delta \eta$
СІ				
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
Ср.	-----	-----		

**ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ:**

$$A = \frac{\pi R_k^4 \rho g}{8l} =$$

$$\eta_1 = \frac{A \Delta h_1}{Q_1} = \quad \eta_2 = \frac{A \Delta h_2}{Q_2} = \quad \eta_3 = \frac{A \Delta h_3}{Q_3}$$

$$= \quad \eta_4 = \frac{A \Delta h_4}{Q_4} = \quad \eta_5 = \frac{A \Delta h_5}{Q_5} =$$

$$\eta_{ср} =$$

$$\Delta \eta_i = |\eta_{ср} - \eta_i| \quad \Delta \eta_{ср} =$$

**ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК ЗА МЕТОДОМ СТЬЮДЕНТА:**

$$\Delta \eta = \sqrt{\left(\frac{\partial \eta}{\partial \rho_1} \Delta \rho_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial g} \Delta g\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \Delta h} \Delta \Delta h\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial R_k} \Delta R_k\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial \pi} \Delta \pi\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial Q} \Delta Q\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial l} \Delta l\right)^2}$$

Не обчислювати, це загальна формула похибки непрямого вимірювання

$$\Delta\rho_1 = \Delta\rho_{1np} = \frac{2}{3}\Delta\rho_{10} = \frac{2}{3} \cdot 0,05 \cdot 10^3 \approx 0,033 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\Delta g = \Delta g_{np} = \frac{2}{3}\Delta g_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,05 = 0,033 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$\Delta\Delta h = \Delta\Delta h_{np} = \frac{2}{3}\Delta\Delta h_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 3,33 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$$

$$\Delta R_k = \Delta R_{knp} = \frac{2}{3}\Delta R_{k0} = \frac{2}{3} \cdot 0,005 \cdot 10^{-3} \approx 0,00333 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta\pi = \Delta\pi_{np} = \frac{2}{3}\Delta\pi_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,005 = 0,0033$$

$$\Delta Q = \Delta Q_{np} = \frac{2}{3}\Delta Q_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,005 \cdot 10^{-5} = 0,0033 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

$$\Delta\ell = \Delta\ell_{np} = \frac{2}{3}\Delta\ell_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,0005 = 0,00033 \text{ м}$$

Частинні похідні з виділенням в них робочої формули::

$$\frac{\partial\eta}{\partial\rho_1} = \frac{g\Delta h R_k^4 \pi}{8Q\ell} = \frac{\eta}{\rho_1}; \quad \frac{\partial\eta}{\partial g} = \frac{\rho_1 \Delta h R_k^4 \pi}{8Q\ell} = \frac{\eta}{g};$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial\Delta h} = \frac{\rho_1 g R_k^4 \pi}{8Q\ell} = \frac{\eta}{\Delta h};$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial R_k} = \frac{4\rho_1 g \Delta h R_k^3 \pi}{8Q\ell} = \frac{4\eta}{R_k}; \quad \frac{\partial\eta}{\partial\pi} = \frac{\rho_1 g \Delta h R_k^4}{8Q\ell} = \frac{\eta}{\pi};$$

$$\frac{\partial\eta}{\partial Q} = -\frac{\rho_1 g \Delta h R_k^4 \pi}{8Q^2\ell} = -\frac{\eta}{Q}; \quad \frac{\partial\eta}{\partial\ell} = -\frac{\rho_1 g \Delta h R_k^4 \pi}{8Q\ell^2} = -\frac{\eta}{\ell}.$$

Підставимо частинні похідні в формулу для  $\Delta\eta$  та обрахуємо

$$\varepsilon = \frac{\Delta\eta}{\eta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\rho_1}{\rho_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{g}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\Delta h}{\Delta h}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta R_k}{R_k}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\ell}{\ell}\right)^2} =$$

$$\Delta\eta = \varepsilon \eta_{cp} =$$

Порівняти отримане значення  $\Delta\eta$  з  $\Delta\eta_{cp}$ , отриманим вище.  
Для запису кінцевого результату використати більше значення.

$$\langle \lambda \rangle =$$

$$\langle \nu \rangle =$$

**КІНЦЕВИЙ РЕЗУЛЬТАТ:**

$$\eta = \eta_{cp} \pm \Delta\eta =$$

$$\langle \nu \rangle =$$

$$\varepsilon = \quad \%$$

$$\langle \lambda \rangle =$$

### Контрольні питання

1. Дати загальну характеристику явищ переносу.
2. Сформулювати закони Фіка, Фур'є та Ньютона для явищ переносу.
3. Який фізичний зміст в'язкості? В яких одиницях вимірюється ця величина в системі СІ?
4. Записати формулу для в'язкості ідеального газу.
5. Записати формулу середньої швидкості теплового руху молекул ідеального газу. Від яких фізичних величин вона залежить?
6. Що таке середня довжина вільного пробігу молекули? Від яких фізичних величин вона залежить?
7. В чому полягає суть капілярного методу визначення в'язкості газів?

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства  
та природокористування  
Кафедра хімії та фізики

**Звіт**  
з лабораторної роботи № 2.3  
*Визначення відношення теплоємностей  
повітря методом адіабатичного розширення*

**Виконав:**  
студент групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(Прізвище І.П.)

**Перевірив:**

\_\_\_\_\_  
(Прізвище І.П.)

*Рівне 20    р*

**МЕТА РОБОТИ:** визначити коефіцієнт Пуассона  $\gamma$ .

**РОБОЧА ФОРМУЛА:**

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

$h_1$  - різниця рівнів води в колінах манометра після накачування повітря,

$h_2$  - різниця рівнів води в колінах манометра після адіабатичного розширення (випускання повітря).

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ:**

$$\Delta h_{10} = \Delta h_{20} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

	$h_1$	$h_2$	$\gamma$	$\Delta\gamma$
СІ				
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
Ср.	-----	-----		

**ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ:**

$$\gamma_1 =$$

$$\gamma_2 =$$



$$\gamma_3 =$$

$$\gamma_4 =$$

$$\gamma_5 =$$

$$\gamma_{cp} =$$

$\Delta \gamma_i = |\gamma_i - \gamma_{cp}|$  - обчислити абсолютні похибки та записати в таблицю

$$\Delta \gamma_{en} = \frac{2,8}{\sqrt{5}} \cdot \Delta S_\gamma =$$

$$\Delta S_\gamma = \sqrt{\frac{\sum (\gamma_i - \gamma_{cp})^2}{5-1}} = \sqrt{\frac{\sum (\gamma_1 - \gamma_{cp})^2 + \dots + (\gamma_5 - \gamma_{cp})^2}{5-1}} =$$

Порівняти  $\Delta \gamma_{en}$  та  $\Delta \gamma_{cp}$ .

### **ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК ЗА МЕТОДОМ СТЬЮДЕНТА:**

$$\Delta \gamma = \sqrt{\left(\frac{\partial \gamma}{\partial h_1} \Delta h_1\right)^2 + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial h_2} \Delta h_2\right)^2} - \text{повна абсолютна похибка}$$

непрямого вимірювання

Повні абсолютні похибки прямих вимірювань:

$$\Delta h_1 = \Delta h_{1np} = \frac{2}{3} \Delta h_{10} = \frac{2}{3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\Delta h_2 = \Delta h_{2np} = \frac{2}{3} \Delta h_{10} = \frac{2}{3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = 3,33 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$\Delta h_{1en} = \Delta h_{2en} = 0$$

Частинні похідні:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial h_1} = -\frac{h_2}{(h_1 - h_2)^2}; \quad \frac{\partial \gamma}{\partial h_2} = -\frac{h_1}{(h_1 - h_2)^2}. \text{ Підставимо}$$

частинні похідні в формулу для  $\Delta \gamma$  та обрахуємо. Беремо дані для одного виміру, для якого  $\gamma \approx 1,33 \div 1,4$ .

$$\Delta\gamma = \sqrt{\frac{(h_2\Delta h_1)^2 + (h_1\Delta h_2)^2}{(h_1 - h_2)^2}} =$$

Порівняти отримане значення  $\Delta\gamma$  з раніше обчисленими  $\Delta\gamma_{en}$  та  $\Delta\gamma_{cp}$ . Більше з них підставити в формулу для  $\varepsilon$

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

**КІНЦЕВИЙ РЕЗУЛЬТАТ:**

$$\gamma = \gamma_{cp} \pm \Delta\gamma =$$

$$\varepsilon = \quad \%$$

Проаналізувати за формулою  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{i+2}{i}$  коефіцієнт

Пуассона для одноатомного ( $i=3$ ), двоатомного ( $i=5$ ) та 3-х ат. ( $i=6$ ) газів. Порівняти з експериментом.

Зробити висновок (усно)

$$\gamma_I =$$

$$\gamma_{II} =$$

$$\gamma_{III} =$$

### Контрольні питання

- Що розуміють під внутрішньою енергією тіла, кількістю теплоти? Сформулюйте перший закон термодинаміки та запишіть його математичний вираз.
- Який процес називають ізотермічним, ізохорним, ізобарним, адіабатним? Запишіть вирази роботи розширення ідеального газу для цих процесів.
- Запишіть перший закон термодинаміки для ізопроцесів та адіабатного процесу. Який термодинамічний зміст універсальної газової сталої?
- Дайте визначення числа ступенів вільності молекул. Скільки ступенів вільності мають молекули з різною кількістю атомів? Запишіть вираз для внутрішньої енергії ідеального газу.
- Що називають питомою та молярною теплоємностями і який зв'язок між ними? Що таке  $C_p$  і  $C_V$ ,  $c_p$  і  $c_V$  та  $c_{\mu p}$  і  $c_{\mu V}$ . Чому для газів  $C_p > C_V$  ( $c_{\mu p} > c_{\mu V}$ ,  $c_p > c_V$ )?
- Обчисліть  $\gamma$  для повітря, вважаючи його двоатомним газом. Порівняйте теоретичне значення  $\gamma$  з одержаним вами експериментальними даними. Зробіть висновок.

Міністерство освіти і науки України  
Національний університет водного господарства  
та природокористування  
Кафедра хімії та фізики

**Звіт**  
з лабораторної роботи № 2.4

***Визначення коефіцієнта поверхневого  
натягу методом відриву кільця***

***Виконав:***  
*студент групи* \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
*(Прізвище І.П.)*

***Перевірив:***

\_\_\_\_\_  
*(Прізвище І.П.)*

***Рівне 20 р***

**МЕТА РОБОТИ:** визначення коефіцієнта поверхневого натягу води методом відриву кільця.

**РОБОЧА ФОРМУЛА:**

$$\alpha = \frac{P}{2\pi(D-h)}, \quad P = P' - P_0$$

$\alpha$  - коефіцієнт поверхневого натягу.

$P$  - сила поверхневого натягу (= натягу нитки)

$P_0$  - покази відрахункової стрілки при сухому кільці

$P'$  -покази відрахункової стрілки в момент відриву кільця від поверхні води

$D$  - зовнішній діаметр кільця,

$h$  - товщина стінки кільця,

**РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАНЬ:**

$$\Delta P_{00} = \Delta P_0 = \Delta P'_0 = 0,5 \cdot 9,8 \cdot 10^{-6} = 4,9 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$$

$$\pi = \quad \Delta \pi_0 = \quad \Delta D_0 = \quad \Delta h_0 =$$

	$D, \text{ мм}$	$h, \text{ мм}$	$P, \text{ мГс}$	$P', \text{ мГс}$	$\Delta P_0, \text{ мГс}$
СІ	$10^{-3} \text{ м}$	$10^{-3} \text{ м}$	$9,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$	$9,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$	$9,8 \cdot 10^{-6} \text{ Н}$
1.					
2.					
3.					
4.					
5.					
Ср.		-----		-----	-----

## ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ:

$$\alpha = \alpha_{cp} =$$

## ОБЧИСЛЕННЯ ПОХИБОК:

$$\Delta\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial\alpha}{\partial P}\Delta P\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial\pi}\Delta\pi\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial D}\Delta D\right)^2 + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial h}\Delta h\right)^2}$$

Не обчислювати, це загальна формула похибки непрямого вимірювання

Повні абсолютні похибки прямих вимірювань:

$$\Delta P = \sqrt{\Delta P_{np}^2 + \Delta P_{en}^2} =$$

$$\Delta P_{np} = \frac{2}{3}\Delta P_0 = \frac{2}{3} \cdot 4,9 \cdot 10^{-6} \approx$$

$$\Delta P_{en} = \frac{2,8}{\sqrt{5}} \cdot \Delta S_P =$$

$$\Delta S_P = \sqrt{\frac{(P_1 - P_{cp})^2 + \dots + (P_5 - P_{cp})^2}{5-1}} =$$

Домножити  $\Delta S_P$  на  $9,8 \cdot 10^{-6}$

$$\Delta\pi = \Delta\pi_{np} = \frac{2}{3}\Delta\pi_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,005 \approx 0,0033$$

$$\Delta D = \sqrt{\Delta D_{np}^2 + \Delta D_{en}^2} =$$

$$\Delta D_{np} = \frac{2}{3}\Delta D_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} \approx 0,033 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta D_{en} = \frac{2,8}{\sqrt{5}} \cdot \Delta S_D =$$

$$\Delta S_D = \sqrt{\frac{(D_1 - D_{cp})^2 + \dots + (D_5 - D_{cp})^2}{5 - 1}} =$$

$$\Delta h = \Delta h_{np} = \frac{2}{3} \Delta h_0 = \frac{2}{3} \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} \approx 0,033 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Частинні похідні з виділенням в них робочої формули:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial P} = \frac{1}{2\pi(D-h)} = \frac{\alpha}{P}; \quad \frac{\partial \alpha}{\partial \pi} = -\frac{P}{2\pi^2(D-h)} = -\frac{\alpha}{\pi};$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial D} = -\frac{P}{2\pi(D-h)^2} = -\frac{\alpha}{(D-h)};$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial h} = \frac{P}{2\pi(D-h)^2} = \frac{\alpha}{(D-h)}$$

Підставимо частинні похідні в формулу для  $\Delta \alpha$  та обрахуємо

$$\varepsilon = \frac{\Delta \alpha}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{P}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \pi}{\pi}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{d-h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{d-h}\right)^2} =$$

$$\Delta \alpha = \varepsilon \alpha =$$

### **КІНЦЕВИЙ РЕЗУЛЬТАТ:**

$$\alpha = \alpha_{cp} \pm \Delta \alpha =$$

$$\varepsilon = \quad \%$$

### **Контрольні питання**

1. Описати характер розташування молекул в твердих тілах, рідинах і газах.
2. Що таке ближній і дальній порядок? Як він змінюється з температурою?
3. Які сили діють між молекулами рідини?
4. Пояснити причини виникнення поверхневого натягу. Який напрямок має сила поверхневого натягу?
5. Що таке коефіцієнт поверхневого натягу? Як він залежить від температури?
6. Чому за відсутності зовнішніх сил рідина має вигляд сфери?
7. Чому виникає явище змочування (незмочування) рідиною твердого тіла? У якому випадку змочування (незмочування) вважають повним?
8. Які явища називають капілярними?
9. Запишіть вираз для визначення енергії поверхневого шару рідини.

Додаток 2

Таблиця коефіцієнтів Стюдента

Число вимірів	Надійність							
	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99 9
2	1,0	1,38	2,0	3,1	6,3	12,7	31,8	636, 6
3	0,82	1,06	1,3	1,9	2,9	4,3	7,0	31,6
4	0,77	0,98	1,3	1,6	2,4	3,2	4,5	12,9
5	0,74	0,94	1,2	1,5	2,1	2,8	3,7	8,6
6	0,73	0,92	1,2	1,5	2,0	2,6	3,4	6,9
7	0,72	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,1	6,0
8	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,4	3,0	5,4
9	0,71	0,90	1,1	1,4	1,9	2,3	2,9	5,0
10	0,70	0,88	1,1	1,4	1,8	2,3	2,8	4,8
15	0,69	0,87	1,1	1,3	1,8	2,1	2,6	4,1
20	0,69	0,86	1,1	1,3	1,7	2,1	2,5	3,9
40	0,68	0,85	1,1	1,2	1,7	2,0	2,4	3,6
60	0,68	0,85	1,0	1,2	1,7	2,0	2,4	3,5
120	0,68	0,85	1,0	1,2	1,7	2,0	2,4	3,4
	0,67	0,84	1,0	1,2	1,6	2,0	2,3	3,3