

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

05-06-132М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни
«Фізика» (розділ «Молекулярна фізика та термодинаміка») для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)» спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)» галузі знань 27 «Транспорт» денної, заочної та дистанційної форм навчання

Рекомендовано
науково-методичною радою з якості
навчально-наукового механічного
інституту
Протокол № 4 від 21.12.2023 р.

Рівне – 2023

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Фізика» (розділ «Молекулярна фізика та термодинаміка») для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)», спеціальності 275 «Транспортні технології (за видами)» галузі знань 27 «Транспорт» денної, заочної та дистанційної форм навчання. [Електронне видання] / Гаєвський В. Р., Гаращенко О. В., Соляк Л. В., Мороз М. В. – Рівне : НУВГП, 2023. – 29 с.

Укладачі: Гаєвський В. Р., доцент кафедри хімії та фізики; Гаращенко О. В., 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 275 «Транспортні технології (за видами)»

Хітров І. О.

© В. Р. Гаєвський,
О. В. Гаращенко,
Л. В. Соляк, М. В. Мороз, 2023
© НУВГП, 2023

ЗМІСТ

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	24
Список використаної і рекомендованої літератури	28
Додаток. Таблиця коефіцієнтів Стьюдента	29

ПЕРЕДМОВА

У методичних вказівках представлені лабораторні роботи з дисципліни «Фізика» розділ «Молекулярна фізика та термодинаміка», які виконуються на кафедрі хімії та фізики.

Метою лабораторних робіт є вивчення фізичних процесів і явищ, що стосуються молекулярної фізики і термодинаміки. Завданням лабораторних робіт і методичних вказівок дати основні теоретичні поняття, формули і закони, навчити студента вимірювати фізичні величини, визначати точність вимірювальних приладів і оволодіти методами обробки результатів вимірювань. У процесі виконання лабораторної роботи студент оформляє звіт за встановленою формою. Для обробки результатів вимірювань методом Стьюдента у додатку приведені значення коефіцієнтів Стьюдента.

У кожній лабораторній роботі вказана мета, теоретичні відомості, опис експериментальної установки, хід роботи, зразок таблиці результатів вимірювань і 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) 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

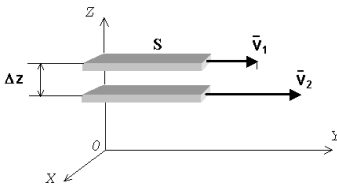


Рис. 1

меншою швидкістю. У 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 η – 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 η – 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 прилипшого до тіла шару. В результаті неперервної змін швидкості

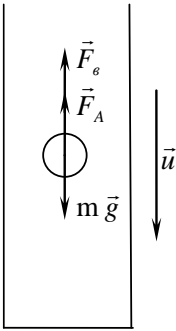


Рис. 2

між шарами виникає градієнт швидкості $\frac{dv}{dz}$,

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 сила тертя рівна:

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

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

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

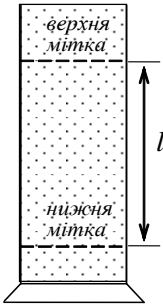


Рис. 3

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

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

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

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

співвідношень у (7) отримаємо

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

де ρ_1 – густина кульки, ρ_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 то швидкість ν тоді 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 5 разів 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 ρ_1, ρ_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 (14) в'язкість рідини η .
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 (14).
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

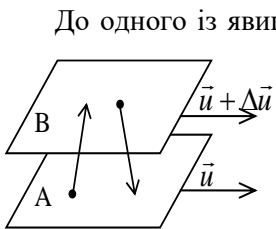


Рис.1

До одного із явищ переносу відноситься внутрішнє тертя (див. л.р. 2.1). У явищі внутрішнього тертя спостерігається перенесення імпульсу напрямленого 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 чим 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 напрямленні 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 η – 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 η** - чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, яка діє між шарами одиничної площі при одиничному градієнті швидкості. В'язкість η 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 ρ – 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 μ – 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).

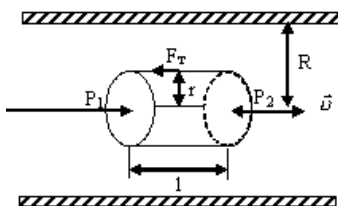


Рис.2

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

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

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

$$\eta = \frac{\pi R^4 \rho g \Delta h}{8Ql}. \quad (13)$$

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.

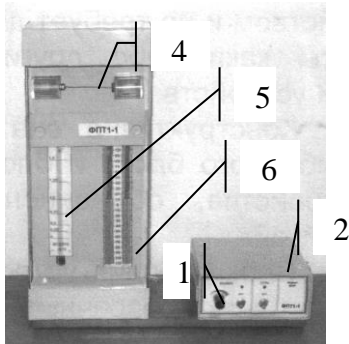


Рис. 3

Опис установки

Для визначення коефіцієнта в'язкості повітря використовується експериментальна установка ФПТ I-I, загальний вигляд якої зображено на рис.3.

Повітря в капіляр 4 подається мікрокомпресором, розміщеним у блоці 2. Об'ємна витрата повітря вимірюється витратоміром (реометром) 5,

регулятором “ВОЗДУХ” (1), який знаходиться на передній панелі блоку приладів, встановлюється необхідна величина витрати повітря. Для вимірювання різниці тисків повітря на кінцях капіляра, використовують U – подібний водяний манометр 6. Геометричні розміри капіляра – радіус R , та довжина L вказані на передній панелі установки.

Хід роботи

1. Увімкнути установку за допомогою тумблера “СЕТЬ”.
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 Δh 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 ρ , ρ_p , g , R , l , T .
7. Визначити паспортні приладові похибки та похибки табличних величин.
8. Для кожного режиму обчислити за робочою формулою (13) в'язкість повітря η .
9. Обчислити середнє значення величини η .

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.
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? 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)

Теплоємністю тіла називається фізична величина, що чисельно рівна кількості теплоти, яку необхідно надати тілу, щоб нагріти його на 1К. $C = \frac{\delta Q}{dT}$, де δQ – кількість

теплоти, необхідна для зміни температури тіла на dT кельвінів.

Питомою (молярною) теплоємністю називають кількість теплоти, яку необхідно надати одиниці маси (одному молу) речовини, щоб підвищити її температуру на 1К. Між питомою c та молярною C теплоємностями існує проста математична залежність

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

де μ – молярна маса речовини.

Згідно першого закону термодинаміки

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

де δQ – кількість теплоти.

Елементарна робота розширення газу

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

Елементарний приріст внутрішньої енергії

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

Розв'язуючи конкретні задачі термодинаміки найчастіше розглядають ізотермічний, ізобаричний, ізохоричний і адіабатичний процеси. Перший закон термодинаміки у застосуванні до таких процесів має вигляд:

ізотермічний процес	$T = \text{const},$	$\delta Q = \delta A,$
ізохоричний процес	$V = \text{const},$	$\delta Q = dU,$
ізобаричний процес	$P = \text{const},$	$\delta Q = dU + \delta A,$
адіабатичний процес	$\delta Q = 0,$	$dU + \delta A = 0.$

Вираз роботи розширення ідеального для ізопроеців має вигляд:

ізотермічний процес	$T = \text{const}$	$A = \nu R T \ln \frac{V_2}{V_1},$
ізохоричний процес	$V = \text{const}$	$A = 0,$
ізобаричний процес	$P = \text{const},$	$A = p \Delta V,$
адіабатичний процес	$\delta Q = 0,$	$A = \nu C_V \Delta T,$

де ν – кількість речовини ($\nu = \frac{m}{\mu}$).

Теплоємність газів істотно залежить від характеру передачі теплоти. Розрізняють теплоємності при сталому об'ємі C_V та при сталому тиску C_P . Для ідеального газу.

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad (5)$$

$$C_p = \frac{i+2}{2} R. \quad (6)$$

Відношення теплоємностей C_V та C_p називається **коефіцієнтом Пуассона**

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}. \quad (7)$$

Визначення γ для повітря є метою даної роботи.

З використанням формул (5) і(6) коефіцієнт Пуассона можна виразити через число ступенів вільності

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

Перше рівняння системи рівнянь (9) є записом першого закону термодинаміки для адіабатного процесу, а друге – рівняння Менделєєва-Клапейрона.

$$\begin{cases} dU = -\delta A \\ PV = \frac{m}{\mu} RT. \end{cases} \quad (9)$$

З розв'язку (9) одержимо рівняння адіабати (рівняння Пуассона)

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

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 Π , 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

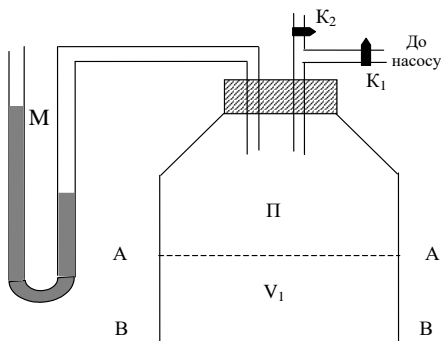


Рис.1

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.

У другій частині експерименту короточасно 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 дослідів 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 γ 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 γ

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

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 γ .
8. Визначити середнє значення γ .
9. Обчислити абсолютну і відносну похибки, записати кінцевий результат

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

Таблиця результатів вимірювань

 $\Delta h_{10} =$
 $\Delta h_{20} =$

№	h ₁ ,	h ₂ ,	γ,	Δγ,
СІ				
1				
2				
3				
4				
5				
Ср.				

Завдання 2

Для експериментального визначення коефіцієнта Пуассона $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ застосується установка ФПТ1-6 (рис.2), яка складається з: 1) блоку приладу БП-6 (поз.2), усередині якого знаходиться посудина з повітрям; 2) блоку манометра (поз.3); 3) стійки (поз.4). На лицьовій панелі блоку БП-6 розміщені

пристрої керування, 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.

Хід роботи

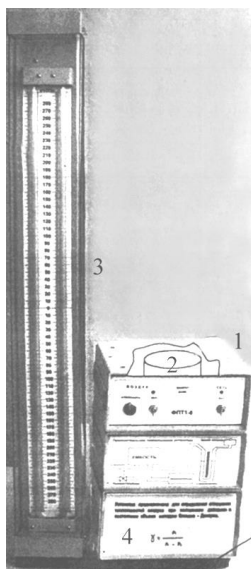


Рис. 2

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 γ .
10. Визначити середнє значення γ .
11. Обчислити абсолютну зі відносну похибки, записати кінцевий результат

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

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. Що називають питомою та молярною теплоємностями і який зв'язок між ними? Що таке C_p і C_V ? Чому для газів $C_p > C_V$?
6. Обчисліть γ для повітря, вважаючи його двоатомним газом. Порівняйте теоретичне значення γ з одержаним вами експериментальними даними. Зробіть висновок.
7. 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

(Теорія до даної роботи описана в конспекті лекцій §2.23)

Рідкий стан займає за своїми властивостями проміжне становище між газами і кристалами. Зокрема, рідина як і для кристалічне тіло, зберігає об'єм, але подібно до газів, не зберігає своєї форми.

Для кристалічного стану характерне упорядковане розташування частинок (атомів або молекул), а для газів – хаотичне. В розташуванні частинок рідини спостерігається так званий ближній порядок. Це означає, що по відношенню до довільної частинки

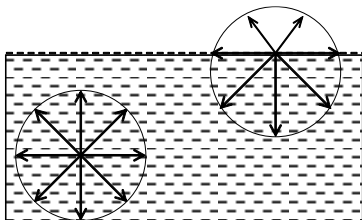


Рис. 1

розташування найближчих до неї сусідів упорядковане. В кристалічних тілах має місце дальній порядок – впорядковане розташування частинок по відношенню до довільної частинки спостерігається в межах значного об'єму.

Тепловий рух в рідинах має наступний характер: кожна молекула протягом деякого часу (час осілого життя) коливається біля положення рівноваги, після чого стрибкоподібно переходить до іншого положення на відстань порядку розмірів самої молекули. Таким чином, молекули лише повільно переміщуються всередині рідини, перебуваючи частину часу біля тимчасових положень рівноваги.

Сили взаємодій зменшуються із збільшенням віддалі між молекулами, тому кожна молекула рідини взаємодіє лише з молекулами, що входять в так звану сферу молекулярної дії.

Кожна молекула зазнає притягання зі сторони найближчих сусідів, що знаходяться в межах сфери молекулярної дії, центр якої співпадає з даною молекулою. Рівнодійна всіх сил для молекули, що знаходиться всередині рідини в середньому дорівнює нулю. Рівнодійна сил притягання, які діють на молекулу, що знаходиться в поверхневому шарі рідини, напрямлена всередину рідини (рис.1). Якщо на рідину не діють ніякі інші сили, то рівноважною виявиться така форма поверхні, для якої ці сили нормальні до поверхні. Тому крапля рідини, на яку не діють зовнішні сили, повинна під впливом сил молекулярного тиску прийняти сферичну форму. Краплини рідини, для яких роль сили тяжіння мала, дійсно приймають форму кульок.

Дія сил молекулярного тиску, завдяки якій рідина приймає сферичну форму, аналогічна дії, що виникла б, якщо поверхня рідини являла б собою розтягнуту плівку, що намагається скоротитись. Всі явища, які викликані існуванням сил молекулярного тиску, пояснюються шляхом розгляду властивостей такої розтягнутої плівки. Для того, щоб розтягнуту плівку втримати в рівновазі, до лінії її границі потрібно прикласти силу f , дотичну до поверхні рідини. Цю силу називають силою поверхневого натягу. Вона, очевидно, тим більша, чим більша довжина граничної плівки l

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

Коефіцієнт α , що залежить від природи рідини, називається коефіцієнтом поверхневого натягу. Із співвідношення (1) видно, що коефіцієнт поверхневого натягу α чисельно дорівнює силі, прикладеній до одиниці довжини краю поверхневої плівки рідини. З підвищенням температури α зменшується. При наближенні температури рідини до критичної коефіцієнт поверхневого натягу прямує до нуля. Це пояснюється тим, що в критичній точці 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. Ця сила P в момент відриву кільця 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 поверхня цієї плівки тягне кільце вниз з силою $\alpha \cdot \pi D$, внутрішня поверхня також тягне вниз з силою $\alpha \cdot \pi d$.

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:

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

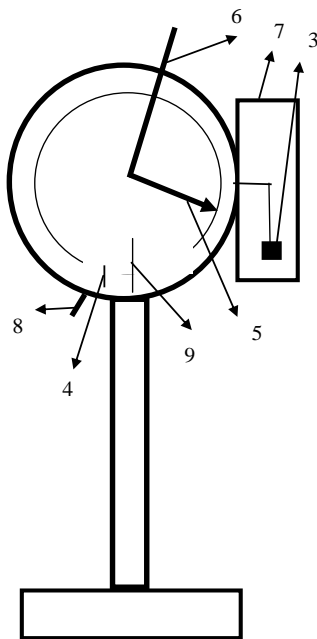


Рис 2

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 α .

Таблиця результатів вимірювань

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

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

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. Загальна фізика : навчальний посібник / ч. I, ч. II під редакцією Ковалець М. О., Олексина Д. І., Орленка В. Ф. Рівне : НУВГП, 2008 .
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. Частина 2 : конспект лекцій для студентів заочної форми навчання / Дубчак Д. І., Ковалець М. О., Орленко В. Ф., Никонюк Є. С., Шляховий В. Л. Рівне, 2002, 073-90.
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. 14th edition. Pearson Education Limited. 2016. 1600 p.

Додаток

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