

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЧЕРКАСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет комп'ютеризованих технологій машинобудування та дизайну

# **МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА**

## **ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ФІЗИКИ**

для здобувачів освітнього ступеня “бакалавр”  
з технічних спеціальностей

Черкаси 2022

УДК 539.1(076)  
ББК 22.36  
М 75

*Затверджено вченою радою ФКТМД,  
протокол № 11 від 24.05.2022 р.  
згідно з рішенням кафедри фундаментальних  
дисциплін та прикладного  
матеріалознавства,  
протокол № 7 від 28 квітня 2022 р.*

Упорядники:

Колінько С.О., к.ф.-м.н., доцент  
Бутенко Т.І., к.т.н., доцент  
Цибулін В.В.

Рецензент:

Бондаренко М.О., д.т.н., доцент

**Молекулярна фізика:** лабораторний практикум з фізики для  
М 75 здобувачів освітнього ступеня “бакалавр” з технічних спеціальностей.  
[Електронний ресурс] / [упоряд. : С.О. Колінько Т.І. Бутенко, В.В.  
Цибулін; М-во освіти і науки України, Черкас. держ. технол. ун-т. –  
Черкаси : ЧДТУ, 2022. – 63 с.

Дане видання призначене для самостійної підготовки студентів до виконання лабораторних робіт з молекулярної фізики. До кожної лабораторної роботи подано теоретичні відомості, порядок виконання робіт, рекомендації щодо обробки результатів вимірювань, контрольні запитання.

Для студентів інженерних спеціальностей.

Навчальне електронне видання  
**Молекулярна фізика:** лабораторний практикум  
з фізики:  
для здобувачів освітнього ступеня “бакалавр”  
з технічних спеціальностей

Упорядники:  
Колінько Сергій Олександрович,  
Бутенко Тетяна Іванівна,  
Цибулін Валентин Вікторович

*В авторській редакції.*

© С.О.Колінько, Т.І.Бутенко, В.В.Цибулін упорядкування, 2022

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Лабораторна робота № 111<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ ПОВІТРЯ, СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ І ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРА МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ КАПІЛЯРНИМ МЕТОДОМ</b> | 4  |
| Лабораторна робота № 112<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЛІНІЙНОГО РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ</b>                                                                                | 12 |
| Лабораторна робота № 113<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТОДОМ НАГРІТОЇ НИТКИ</b>                                                                         | 17 |
| Лабораторна робота № 114<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВЗАЄМНОЇ ДИФУЗІЇ ПОВІТРЯ І ВОДЯНОЇ ПАРИ</b>                                                                         | 22 |
| Лабораторна робота № 115<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ ЗА МЕТОДОМ СТОКСА</b>                                                                     | 27 |
| Лабораторна робота № 116<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ ПОСТІЙНОМУ ТИСКУ ДО ТЕПЛОЄМНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ ПОСТІЙНОМУ ОБ'ЄМІ</b>                          | 34 |
| Лабораторна робота № 118<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ</b>                                                                                                    | 48 |
| Лабораторна робота № 119<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ І ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРА МОЛЕКУЛИ ПОВІТРЯ</b>                                                  | 53 |
| Лабораторна робота № 120<br><b>ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ ПРИ ПОСТІЙНИХ ТИСКУ І ОБ'ЄМІ РЕЗОНАНСНИМ МЕТОДОМ</b>                                           | 57 |

## ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ ПОВІТРЯ, СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ І ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРА МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ КАПІЛЯРНИМ МЕТОДОМ

**Мета роботи** – з'ясувати закономірності, яким підлягають сили внутрішнього тертя; визначити експериментально коефіцієнт в'язкості повітря, середню довжину вільного пробігу і ефективний діаметр молекул повітря капілярним методом.

**Прилади і обладнання:** експериментальна установка ФПТ 1-1.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

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

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

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

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

У результаті між шарами виникає сила внутрішнього тертя, яка визначається за формулою І. Ньютона:

$$F_m = \left| \frac{dP}{dt} \right| = \eta \left| \frac{dv}{dr} \right| S, \quad (111.1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт пропорційності, який залежить від природи рідини або газу та їх температури. Його називають динамічним коефіцієнтом внутрішнього тертя або коефіцієнтом в'язкості чи просто в'язкістю;  $dv/dr$  – градієнт швидкості (чисельно дорівнює зміні швидкості на одиничній відстані по нормалі між шарами, що розглядаються);  $dr$  – відстань між шарами рідини або газу.

З формули (111.1) можна з'ясувати фізичний зміст коефіцієнта в'язкості:  $\eta = F$  при  $S = 1$  і  $dv/dr = 1$ , тобто коефіцієнт в'язкості чисельно дорівнює силі, що діє на одиницю площі рухомих шарів рідини або газу при градієнті швидкості, рівному одиниці. Одиницею в'язкості в СІ є паскаль – секунда (Па·с).

Встановлено, що з підвищенням температури в'язкість рідин значно зменшується, а в'язкість газів – збільшується.

Кінетична теорія газів, враховуючи розподіл швидкостей молекул повітря за законом Максвелла, встановлює зв'язок між коефіцієнтом внутрішнього тертя  $\eta$ , середньою довжиною вільного пробігу молекул  $\langle \lambda \rangle$ , середньою арифметичною швидкістю  $\langle u \rangle$  їх руху, та густиною газу у вигляді:

$$\eta = \frac{1}{2} \rho \langle \lambda \rangle \langle u \rangle. \quad (111.2)$$

Формула середньої арифметичної швидкості, що розрахована у відповідності до розподілу Максвелла:

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \quad (111.3)$$

де  $\mu$  – молярна маса повітря ( $\mu = 0,029 \text{ кг/моль}$ );  $R$  – універсальна газова стала ( $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{мольК}}$ );  $T$  – термодинамічна температура.

Відстань, яку проходить молекула між двома послідовними зіткненнями називається *довжиною вільного пробігу молекули*. Визначаємо середню довжину оскільки довжина пробігів окремих молекул різна через хаотичний рух. Процес зіткнення характеризують *ефективним діаметром молекули*, під яким розуміють мінімальну відстань, на яку наближаються центри двох молекул при зіткненні.

Середня довжина вільного пробігу  $\langle \lambda \rangle$  і ефективний діаметр  $d$  молекул повітря зв'язані співвідношенням

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n} = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi d^2 P}, \quad (111.4)$$

де  $n$  – концентрація молекул,  $P$  – тиск газу.

Із співвідношення (111.4) можна визначити ефективний діаметр молекул повітря при даній температурі і тиску, якщо відома  $\langle \lambda \rangle$ :

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2\pi P \langle \lambda \rangle}}}, \quad (111.5)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постійна Больцмана.

Розглянемо стаціонарний потік газу (повітря) у капілярі сталого перерізу, радіус якого  $R$ . Знайдемо закон зміни швидкостей із зміною відстані  $r$  від осі капіляра.

Виділимо в капілярі циліндричний об'єм газу радіуса  $r$  і завдовжки  $l$  (рис. 111.1). Вісь симетрії збігається з віссю капіляра. На основи циліндра діють сили, рівнодійна яких збігається з напрямом течії

$$F = (P_1 - P_2)\pi r^2. \quad (111.6)$$

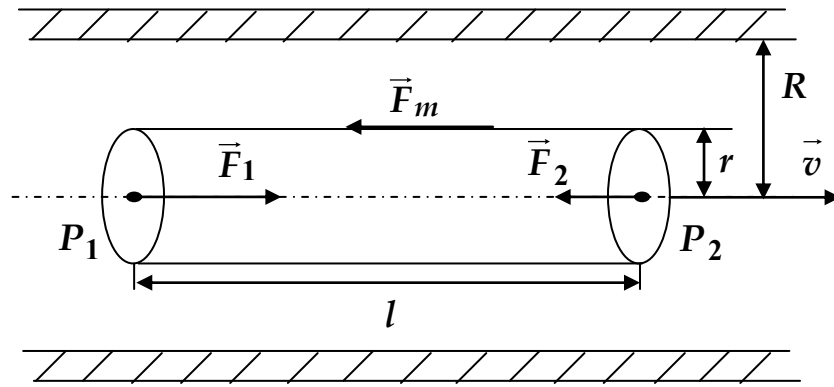


Рисунок 111.1.

На бічну поверхню циліндра діє сила тертя, яка на основі виразу (111.1) буде:

$$F_m = \eta S \frac{dv}{dr} = \eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr}, \quad (111.7)$$

де  $S = 2\pi r l$  – площа бічної поверхні циліндра.

Для стаціонарного потоку  $F = F_m$ , тобто

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 = \eta \cdot 2\pi r l \frac{dv}{dr}. \quad (111.8)$$

Оскільки швидкість руху рідини з віддаленням від осі труби зменшується, то  $\frac{dv}{dr} < 0$  і рівняння (111.8) перепишемо так:

$$(P_1 - P_2)r = -2\eta l \frac{dv}{dr}. \quad (111.9)$$

Звідси маємо:

$$dv = -\frac{P_1 - P_2}{2\eta l} r dr.$$

Інтегруємо цей вираз:

$$v = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} r^2 + C. \quad (111.10)$$

Сталу інтегрування визначаємо з граничних умов. Для  $r = R$   $v = 0$  (для шару повітря, який прилягає до стінок капіляра, має місце явище налипання і швидкість цього шару дорівнює нулю), тоді

$$C = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} R^2.$$

Вираз (111.10) набуває вигляду

$$v = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (111.11)$$

Максимальну швидкість має газ на осі капіляра, тобто

$$v_0 = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} R^2. \quad (111.12)$$

Враховуючи вираз (111.12), формулу (111.11) можна записати у вигляді:

$$v = v_0 \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right). \quad (111.13)$$

Отже, при віддаленні від осі капіляра швидкість  $v$  змінюється за параболічним законом.

Визначимо об'єм газу, що протікає через поперечний переріз капіляра за проміжок часу  $t$ . Уявно поперечний переріз капіляра поділимо на концентричні кільця, ширина яких  $dr$  (рис. 111.2). Площа кільця  $dS = 2\pi r dr$ .

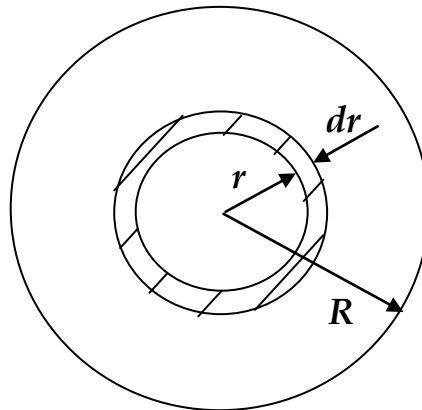


Рисунок 111.2.

За час  $t$  через таке кільце протікає об'єм газу

$$dV = v t dS = 2\pi r v t dr. \quad (111.14)$$

Враховуючи (111.11), вираз (111.14) перепишемо у вигляді

$$dV = \frac{(P_1 - P_2)\pi}{2\eta l} (R^2 - r^2) r dr. \quad (111.15)$$

Інтегруємо вираз (111.15):

$$V = \frac{(P_1 - P_2)\pi}{2\eta l} \int_0^R (R^2 - r^2) r dr = \frac{(P_1 - P_2)\pi}{2\eta l} \left( \frac{R^4}{2} - \frac{R^4}{4} \right),$$

а за одиницю часу:

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{\pi R^4}{8\eta l} (P_1 - P_2) = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8\eta l}, \quad (111.16)$$

де  $Q$  – об’ємна витрата газу, тобто об’єм, що протікає за одиницю часу через поперечний переріз труби.

Формулу (111.14) називають *формулою Пуазейля*. З цієї формули випливає, що об’єм газу, який протікає через капіляр при сталому перепаді тисків  $\Delta P$ , пропорційний четвертому степеню радіуса капіляра і обернено пропорційний довжині капіляра та в’язкості газу.

Формула справедлива тільки для ламінарних потоків газу. Ламінарним називають такий рух, при якому молекули газу рухаються вздовж неперервних ліній струменя. Однак із збільшенням швидкості потоку рух стає турбулентним і шари перемішуються. За турбулентного руху швидкість у кожній точці змінює значення і напрям, зберігається тільки середнє значення швидкості. Характер руху рідини або газу у трубі визначається безрозмірним числом Рейнольдса:

$$Re = \frac{\langle v \rangle R \rho}{\eta},$$

де  $\langle v \rangle$  – середня швидкість потоку;  $\rho$  – густина рідини або газу. У гладеньких циліндричних каналах перехід від ламінарної течії до турбулентної відбувається при  $Re \approx 1000$ . Тому в разі використання формули Пуазейля необхідно забезпечити умови  $Re < 1000$ . Крім того, експеримент необхідно ставити таким чином, щоб стисливістю газу можна було б знехтувати. Це можливо тоді, коли перепад тисків  $\Delta P$  вздовж капіляра значно менший від самого тиску. У даній установці тиск газу атмосферний, а перепад тисків становить приблизно 1% атмосферного ( $P_a$ ).

Формула (111.16) справедлива для ділянки капіляра, в якому встановилась стала течія з квадратичним законом розподілу швидкостей (111.13) через переріз капіляра. Така течія встановлюється на деякій відстані від входу в капіляр, тому для досягнення достатньої точності експерименту необхідно виконання умови  $R \ll l$ , де  $R$  – радіус капіляра;  $l$  – довжина капіляра.

Формулу Пуазейля (111.16) можна використати для експериментального визначення коефіцієнта в’язкості повітря:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8Ql} = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128Ql} = \frac{\pi d^4 \rho g \Delta h}{128Ql}; \quad (111.15)$$

де  $d$  – діаметр капіляра ( $r = \frac{d}{2}$ );  $\Delta P = \rho g \Delta h$  – різниця тисків на кінцях капіляра;  $\rho$  – густина води;  $\Delta h$  – різниця рівнів води в колінах манометра.

### ОПИС УСТАНОВКИ

Для визначення коефіцієнта в'язкості повітря призначена експериментальна установка ФПТ 1-1, загальний вигляд якої зображено на рис. 111.3.

Повітря у капіляр нагнітається мікрокомпресором, розміщеним у блоці приладів 1. Об'ємна витрата повітря вимірюється реометром 5, а потрібне її значення встановлюється регулятором “Воздух” 2, який знаходиться на передній панелі блоку приладів. Для вимірювання різниці тисків повітря на кінцях капіляра призначений U-подібний водяний манометр 6. Геометричні розміри капіляра: діаметр  $d = 1$  мм, довжина  $l = 100$  мм.

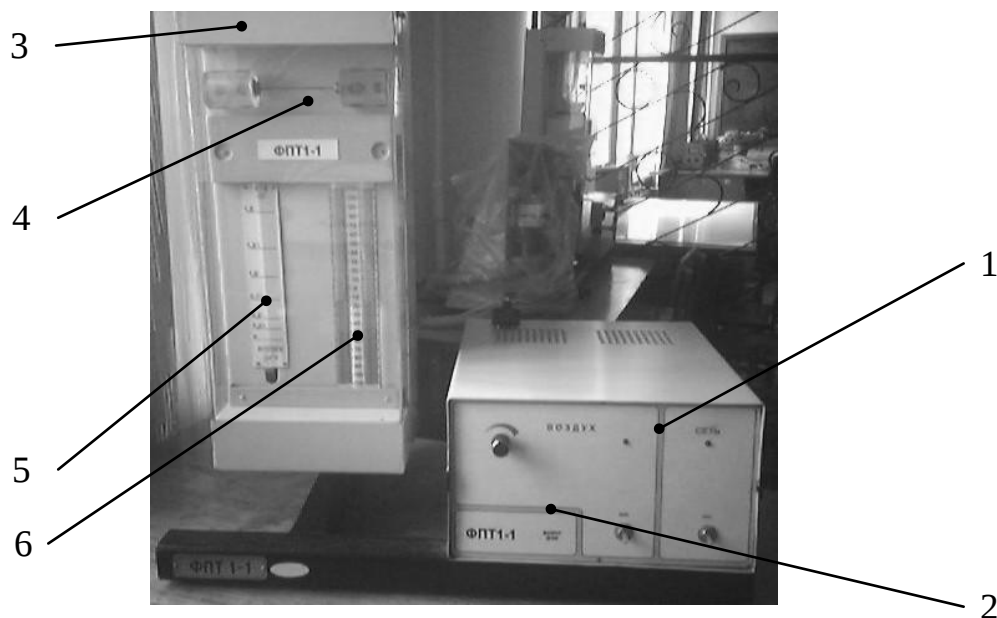


Рисунок 111.3 Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ-1:

1. блок приладів;
2. регулятор “Воздух”
3. блок робочого елемента;
4. капіляр;
5. реометр;
6. водяний манометр

### ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ

1. Увімкнути установку тумблером “Сеть”.
2. За допомогою регулятора “Воздух” встановити за показами реометра вибране значення об'ємної витрати повітря  $Q$ .
3. Виміряти різницю тисків  $\Delta P$  на кінцях капіляра. Значення  $Q$  і  $\Delta P$  занести до таблиці

| Номер<br>вимірювання | $Q, \text{ м}^3/\text{с}$ | $\Delta h, \text{ мм. вод. ст.}$ | $\eta, \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ | $\Delta \eta, \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$ |
|----------------------|---------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1                    |                           |                                  |                                              |                                                     |
| 2                    |                           |                                  |                                              |                                                     |
| 3                    |                           |                                  |                                              |                                                     |
| 4                    |                           |                                  |                                              |                                                     |
| 5                    |                           |                                  |                                              |                                                     |
| Ср.                  |                           |                                  |                                              |                                                     |

- Повторити вимірювання за пп. 2 – 3 для 5 значень об'ємної витрати повітря.
- Встановити регулятор витрати повітря на мінімум, після чого вимкнути установку тумблером “Сеть”.
- Для кожного режиму визначити за формулою (111.15) коефіцієнт в'язкості повітря. Знайти середнє значення коефіцієнта в'язкості повітря при кімнатній температурі.
- Точність вимірювання коефіцієнта в'язкості повітря визначити за

формулою 
$$E = \frac{\Delta \eta}{\eta_{\text{табл}}} \cdot 100\% = \frac{|\eta_{\text{ср}} - \eta_{\text{табл}}|}{\eta_{\text{табл}}} \cdot 100\%.$$
 Для повітря при

температурі  $18^\circ\text{C}$   $\eta_{\text{табл}} = 2,78 \cdot 10^{-5} \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}}.$

- За формулою (111.3) обчислити середню арифметичну швидкість теплового руху молекул повітря.
- За формулою  $\langle \lambda \rangle = \frac{2\eta}{\rho \langle u \rangle}$  (див. формулу (111.2)) обчислити середню

довжину вільного пробігу молекул повітря. При цьому густину повітря знайдемо з рівняння Менделєєва – Клайперона за відомими значеннями температури й тиску в лабораторії в процесі виконання експерименту

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

Звідси

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT}.$$

- За формулою (111.5) обчислити ефективний діаметр молекул повітря.
- Точність вимірювання ефективного діаметра молекул визначити за формулою

$$E = \frac{\Delta d}{d_{\text{табл}}} \cdot 100\% = \frac{|d_{\text{ср}} - d_{\text{табл}}|}{d_{\text{табл}}} \cdot 100\%.$$

Ефективний діаметр молекул повітря при даній температурі становить приблизно  $d_{\text{табл}} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$

## КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Розкажіть про явища переносу в газах.
2. Поясніть явище внутрішнього тертя в ідеальному газі з точки зору молекулярно-кінетичної теорії.
3. Напишіть і поясніть формулу Ньютона для внутрішнього тертя.
4. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості? В яких одиницях системи СІ вимірюється ця величина?
5. Запишіть формулу для коефіцієнта в'язкості ідеального газу.
6. Яка величина називається середньою арифметичною швидкістю теплового руху молекул ідеального газу? Від яких фізичних величин вона залежить?
7. Яка величина називається середньою довжиною вільного пробігу молекули? Від яких фізичних величин вона залежить?
8. У чому полягає капілярний метод визначення коефіцієнта в'язкості газів?
9. Виведіть формулу Пуазейля. За яких умов її можна застосовувати?
10. Як змінюється швидкість руху газу по радіусу каналу за ламінарного режиму течії?
11. Яка величина називається ефективним діаметром молекули? Від яких фізичних величин вона залежить?

## Лабораторна робота № 112

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ЛІНІЙНОГО РОЗШИРЕННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

**Мета роботи** – визначити коефіцієнт лінійного розширення твердих тіл.

**Прилади і обладнання:** прилад для визначення коефіцієнта лінійного розширення твердих тіл (ПРТТ); стержні: сталевий, латунний, алюмінієвий, металева пробірка, термометр.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Тепловий рух частинок твердого тіла, як конденсованого середовища, суттєво відрізняється від теплового руху в газі. Структурні частинки, з яких складається кристал (атоми, молекули або іони), зв'язані між собою силами взаємодії, що залежать від відстаней, здійснюють коливання навколо положень рівноваги, які збігаються з вузлами кристалічної ґратки. У речовин в твердому стані енергія теплового руху  $kT$  набагато менша, ніж потенціальна енергія взаємодії частинок між собою. З підвищенням температури зростає енергія теплових коливань частинок, а також відбувається теплове розширення – збільшення об'єму тіла.

Щоб пояснити теплове розширення твердих тіл, розглянемо криву залежності потенціальної енергії взаємодії частинок від відстані між ними (рис. 112.1).

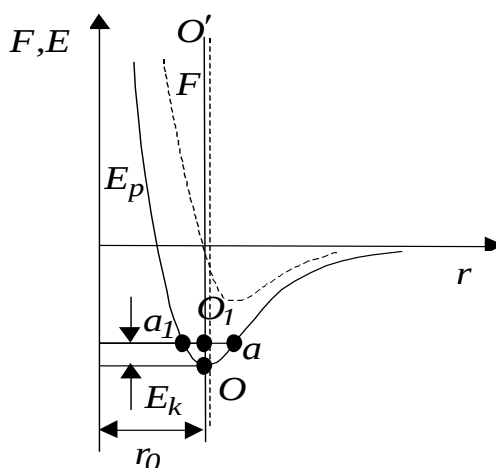


Рисунок 112.1.

Для порівняння на цьому рисунку пунктирною лінією зображена залежність результуючої сили взаємодії частинок від відстані. Якщо частинка крім потенціальної енергії має ще й деяку кінетичну енергію  $E_k$ , яка відповідає температурі  $T_1$ , то вона перебуватиме не в точці  $O$ , а дещо вище – в точці  $O_1$  на рівні  $a_1a$ . Точки перетину прямої  $a_1a$  з кривою енергії визначають крайні положення, які займає частинка при коливаннях. Причому в положенні

$a_1$  кінетична енергія частинки дорівнює потенціальній енергії відштовхування, а в положенні  $a$  – потенціальній енергії притягання. Внаслідок різної залежності сил притягання і відштовхування між частинками від відстані між ними крива потенціальної енергії несиметрична. Тому при русі вправо частинка зміщується на більшу відстань, ніж при русі вліво і, отже, коливання частинки є ангармонічними. Очевидно, що положення рівноваги частинки при даній температурі відповідає середині відрізка  $a_1a$ . Чим більша температура, тим вище піднесена на графіку частинка порівняно зі своїм найнижчим енергетичним положенням  $O$  і тим більше зміщене її середнє положення вправо від лінії  $OO'$  (лінія, що відповідає середнім положенням частинки, зображена на рис. 112.2 пунктиром).

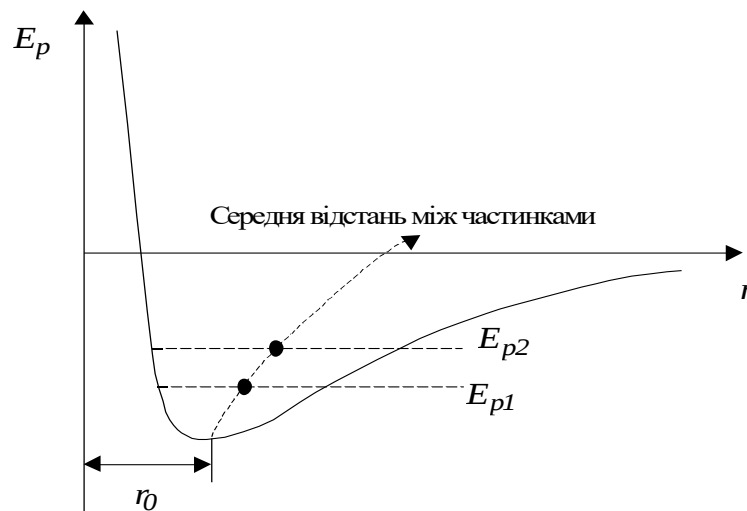


Рисунок 112.2.

Отже, із зростанням температури зростає середня відстань між частинками тіла і його об'єм збільшується. Якщо б частинки твердого тіла виконували гармонічні коливання, або, іншими словами, коли б крива енергії була симетричною, то тверді тіла б не розширювались при нагріванні.

При нагріванні тіла з початковою довжиною  $l$  його відносне видовження  $\frac{dl}{l}$  пропорційне зміні температури тіла  $dT$ :

$$\frac{dl}{l} = \alpha dT,$$

де  $dl$  – приріст довжини тіла;  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, який називається *істинним коефіцієнтом лінійного розширення* ( $\alpha \ll 1$ ).  $\alpha$  має різну величину для різних інтервалів температур і з підвищенням температури для більшості речовин зростає.

*Коефіцієнт лінійного розширення чисельно рівний відносному видовженню тіла при нагріванні його на один градус і виражається формулою*

$$\alpha = \frac{l_t - l_0}{l_0 \Delta t} = \frac{l_t - l_0}{l_0 (t - t_0)}, \quad (112.1)$$

де  $l_0$  – довжина тіла при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $l_t$  – довжина тіла при  $t\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha$  – середній коефіцієнт лінійного розширення в інтервалі температур  $\Delta t$ .

Користуватись формулою (112.1) для визначення  $\alpha$  на практиці незручно, бо експеримент ускладнюється підтриманням температури твердого тіла при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Тому вимірювши довжину тіла  $l_1$  і  $l_2$  при температурах відповідно  $t_1$  і  $t_2$  за допомогою (112.5) виводять таку робочу формулу для визначення  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_1 t_2 - l_2 t_1}, \quad (112.2)$$

де  $\Delta l = l_2 - l_1$ . Визначений за формулою (112.2) коефіцієнт слід вважати середнім, оскільки  $\alpha$  залежить від температури, і віднесенням до інтервалу температур  $\Delta t = t_2 - t_1$ .

Довжина тіла при будь-якій температурі може бути виражена через його довжину при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Із формули (112.1) випливає, що

$$l_t = l_0(1 + \alpha \Delta t), \quad (112.3)$$

де  $\Delta t = t - t_0 = t$ , оскільки  $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Разом з тим формулу (112.1) можна представити у вигляді

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t.$$

З цієї формули випливає *фізичний зміст*  $\alpha$ : коефіцієнтом лінійного розширення називається фізична величина, яка чисельно дорівнює видовженню  $\Delta l$  стержня довжиною  $l_0 = 1\text{ м}$ , взятого при температурі  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , при нагріванні його на один градус ( $\Delta t = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

В результаті розширення збільшується і об'єм тіла. Розглянемо тіло у вигляді куба з ребром  $l$ . Початковий його об'єм при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  буде  $V_0 = l_0^3$ . Очевидно, при температурі  $t$  об'єм тіла буде дорівнювати

$$V = l_0(1 + 3\alpha t)^3 = V_0(1 + \alpha t)^3.$$

Піднесемо  $(1 + \alpha t)$  до кубу і нехтуючи членами, які містять  $\alpha^2$  і  $\alpha^3$ , скільки вони мають малі значення, одержимо

$$V = V_0(1 + 3\alpha t) = V_0(1 + \beta t),$$

де  $\beta = 3\alpha$  – середній коефіцієнт об'ємного розширення. Істинний коефіцієнт об'ємного розширення дорівнює

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{dV}{dt}.$$

Для твердих тіл  $\beta$  – величина порядку  $10^{-5}\text{ К}^{-1}$ , а для газів –  $10^{-3}\text{ К}^{-1}$ .

Для анізотропних кристалів коефіцієнт лінійного розширення  $\alpha$  різний для різних напрямків, тому при зміні температури кристал не залишається подібним самому собі.

## ОПИС ПРИЛАДУ

У цій роботі необхідно визначити середній коефіцієнт лінійного розширення трьох стержневих зразків: сталюго, алюмінієвого і латунного в інтервалі температур від кімнатної  $t_1$  до температури кипіння води  $t_2$ .

Прилад для визначення коефіцієнта лінійного розширення металів (рис. 112.3) складається із корпусу 1, до якого кріпиться захисний корпус – кожух 2. Всередині кожуха 2 встановлений нагрівник. При проведенні дослідів у нагрівник через прокладку 3 вставляють металеву пробірку 4 зі стержнем. На корпусі приладу встановлений стояк з кронштейном для індикатора малих переміщень 5. На панелі корпусу розташовані лампа 6 і кнопковий вимикач 7. Штепсельна вилка служить для вмикання приладу в електричну мережу напругою 220 В.

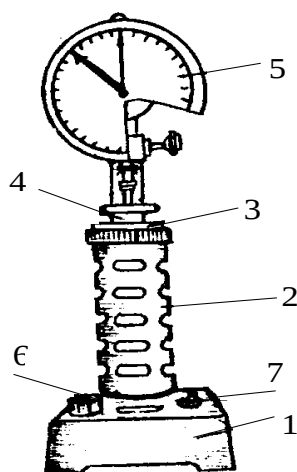


Рисунок 112.3.

## ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Виміряти штангенциркулем лінійні розміри трьох стержнів із різних металів.
2. Пробірку на 0,5 об'єму наповнити водою з крана і виміряти термометром її температуру  $t_1$ .
3. Опустити в пробірку один із зразків і ввести пробірку в нагрівач.
4. Встановити індикатор над пробіркою і опустити шток вимірювача в заглибину на торці стержня. Установити стрілку індикатора на нульову позначку.
5. Увімкнути живлення приладу.
6. При закипанні води в пробірці досліджуваний стержень набуває температури кипіння води  $t_2$ . Збільшення довжини стержня визначають за формулою  $l_2 - l_1 = cN$ , де  $c$  – ціна однієї поділки;  $N$  – кількість поділок, на які відхилилась стрілка індикатора від нульової позначки.
7. Довжину стержня  $l_2$ , після нагрівання його до температури  $t_2$ , визначають за формулою  $l_2 = l_1 + \Delta l = l_1 + cN$ .

8. Температуру кипіння  $t_2$  визначають за відповідною таблицею, враховуючи атмосферний тиск у момент проведення дослідів.
9. Для проведення дослідів з іншими зразками необхідно:
  - а) вимкнути живлення приладу; б) вийняти із приладу нагріту металеву пробірку із стержнем; в) витягнути стержень і вилити гарячу воду; г) охолодити пробірку водою з крана.
10. Повторити пп. 2 – 8 з другим, а потім з третім стержнем.
11. Дані вимірювань, обрахунків і табличні дані для  $\alpha$  різних матеріалів записати в таблицю

| Матеріал зразка | $l_1$ , мм | $l_2 - l_1$ , мм | $l_2$ , мм | $t_1$ , °C | $t_2$ , °C | $\alpha_{\text{експ.}}$ , К <sup>-1</sup> | $\alpha_{\text{табл.}}$ , К <sup>-1</sup> |
|-----------------|------------|------------------|------------|------------|------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Сталь           |            |                  |            |            |            |                                           |                                           |
| Алюміній        |            |                  |            |            |            |                                           |                                           |
| Латунь          |            |                  |            |            |            |                                           |                                           |

12. За формулою (112.2) розрахувати середній коефіцієнт лінійного розширення стержнів, виготовлених із різних матеріалів.
13. Точність вимірювання  $\alpha$  для всіх матеріалів визначити за формулою

$$E = \frac{|\alpha_{\text{експ.}} - \alpha_{\text{табл.}}|}{\alpha_{\text{табл.}}} \cdot 100\%.$$

14. Зробити висновок за результатами роботи.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть теплове розширення твердих тіл з точки зору молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.
2. Як змінюються сили взаємодії між молекулами твердого тіла при зміні відстані між ними?
3. Виведіть формулу (112.2).
4. Дайте визначення коефіцієнта лінійного розширення речовин.
5. Запишіть формули залежності довжини і об'єму тіл від температури.
6. Чи точно визначається коефіцієнт об'ємного розширення твердих тіл за формулою  $\beta = 3\alpha$  і як можна вивести її?
7. Яке практичне значення має лінійне розширення твердих тіл?
8. Чому звичайне скло розтріскується, коли його швидко переносять з гарячої води в холодну або навпаки, а кварцове ні?
9. В яких одиницях вимірюються  $\alpha$  і  $\beta$ ?

## Лабораторна робота №113

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МЕТОДОМ НАГРІТОЇ НИТКИ

**Мета роботи** – вивчення теплопровідності повітря, як одного з явищ переносу в газах.

**Прилади і обладнання:** установка ФПТ1-3.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Розповсюдження теплоти в газах здійснюється трьома способами: тепловим випромінюванням (перенос енергії електромагнітними хвилями), конвекцією (перенос енергії за рахунок переміщення шарів газу в просторі з областей з більш високою температурою в області з низькою температурою) і теплопровідністю.

Теплопровідність – це процес передачі теплоти від більш нагрітого шару газу до менш нагрітого за рахунок хаотичного теплового руху молекул. При теплопровідності здійснюється безпосередня передача енергії від молекул з більшою енергією до молекул з меншою енергією. Для стаціонарного процесу, при якому різниця температур у шарі газу не змінюється з часом, кількість теплоти  $\delta Q$ , що переноситься внаслідок теплопровідності за час  $dt$  через поверхню площею  $S$ , перпендикулярну до напрямку переносу енергії, у напрямку зменшення температури, визначається за законом Фур'є:

$$\delta Q = -\kappa \frac{dT}{dr} S dt, \quad (113.1)$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт теплопровідності;  $dT/dr$  – градієнт температури.

Для ідеального газу :

$$\kappa = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v_T \rangle C_V, \quad (113.2)$$

тут  $\rho$  – густина газу;  $\langle \lambda \rangle$  – середня довжина вільного пробігу молекули;  $\langle v_T \rangle$  – середня швидкість теплового руху молекул  $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$ ;  $C_V$  – питома теплоємність газу при постійному об'ємі.

Розглянемо два коаксіальних циліндри, простір між якими заповнений газом. Якщо внутрішній циліндр нагрівати, а температуру зовнішнього циліндра підтримувати постійною (нижче температури нагрівача), то в кільцевому шарі газу виникає радіальний потік теплоти, спрямований від внутрішнього циліндра до зовнішнього. При цьому температура шарів газу, що прилягають до стінок циліндрів, дорівнює температурі стінок. Виділимо в газі кільцевий шар радіусом  $r$ , товщиною  $dr$  і довжиною  $L$ . За законом Фур'є (113.1) тепловий потік  $q = \delta Q/dt$ , тобто кількість теплоти, що проходить через цей шар за одну секунду, можна записати у вигляді

$$q = -\lambda \frac{dT}{dr} S = -\lambda \frac{dT}{dr} 2\pi r L. \quad (113.3)$$

Розділяючи змінні, одержимо

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

Тоді

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

чи

$$\lambda \ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2\pi\lambda L}{q} (T_1 - T_2), \quad (113.4)$$

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

З рівняння (113.4) одержимо формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності газу:

$$\lambda = \frac{q \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi L (T_1 - T_2)}. \quad (113.5)$$

Формулу (113.5) одержали з припущення, що теплота переноситься від внутрішнього до зовнішнього циліндра тільки завдяки теплопровідності. Це припущення достатньо обґрунтовано, оскільки потік променистої енергії при невисоких температурах і малому діаметрі нагрівача складає незначну частину кількості теплоти, що переноситься, а конвекція усувається підбором діаметра зовнішнього циліндра і його вертикальним розташуванням в експериментальній установці.

Внутрішнім циліндром може служити тонкий дріт (нитка), звичайно вольфрамова, яка нагрівається електричним струмом. Тоді після встановлення стаціонарного режиму тепловий потік можна прийняти рівним потужності електричного струму, що протікає через дріт

$$Q = I_H U_H,$$

де  $I_H$  – струм через дріт;  $U_H$  – падіння напруги на дроті.

Якщо послідовно з дротом включити еталонний резистор опору  $R_P$ , то

$$I_H = \frac{U_P}{R_P},$$

І, остаточно,

$$q = \frac{U_P U_H}{R_P}, \quad (113.6)$$

де  $U_P$  – спад напруги на еталонному резисторі.

Використовуючи рівність (113.6) у формулі (113.5), одержимо

$$\aleph = \frac{U_P U_H \lambda n \frac{D}{d}}{2\pi L R_P \Delta T}, \quad (113.7)$$

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

Температуру трубки  $T_T$  можна прийняти рівною температурі навколишнього повітря.

Для обчислення різниці температур  $\Delta T$  у шарі газу напишемо формули для визначення опору дроту при температурі навколишнього повітря та у нагрітому стані:

$$R_{H.O.} = R_0(1 + \alpha t_0),$$

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

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

Виключивши з цих рівностей  $R_0$  знайдемо

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

$$\text{З огляду на те, що } R_H = \frac{U_H}{I_H}, \quad I_H = \frac{U_P}{R_P} \text{ і } R_{H.O.} = \frac{U_{H.O.}}{I_{H.O.}}, \quad I_{H.O.} = \frac{U_{P.O.}}{R_P},$$

одержимо

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_P} - \frac{U_{H.O.}}{U_{P.O.}}\right)(1 + \alpha t_0)}{\frac{U_{H.O.}}{U_{P.O.}} \alpha}, \quad (113.8)$$

де  $U_H$ ,  $U_{H.O.}$  – спад напруги на дроті відповідно в нагрітому стані і при температурі навколишнього повітря  $t_0$ ;  $U_P$ ,  $U_{P.O.}$  – спад напруги на еталонному резисторі відповідно при нагрітому дроті та при температурі навколишнього повітря  $t_0$

### ОПИС ПРИБЛАДУ

Для визначення коефіцієнта теплопровідності повітря призначена експериментальна установка ФПТ1-3, загальний вид якої показаний на рисунку 113.1.

Робочий елемент установки являє собою скляну трубку, заповнену повітрям, уздовж осі якої натягнутий вольфрамовий дріт 4. Температура трубки в ході експерименту підтримується постійною, завдяки примусовій циркуляції повітря між трубкою і кожухом блоку робочого елемента 3, що здійснюється за допомогою вентилятора, що знаходиться в блоці робочого елемента. Температура повітря в трубці вимірюється цифровим термометром 2. Значення спаду напруги на еталонному резисторі  $U_P$  і на дроті  $U_H$  вимірюються цифровим вольтметром. Значення напруги на дроті

встановлюється регулятором “Нагрівання”, що знаходиться на передній панелі блоку приладів 1. Геометричні розміри робочого елемента – діаметр трубки  $D$ , діаметр дроту  $d$ , довжина трубки  $L$ , температурний коефіцієнт опору матеріалу дроту  $\alpha$  вказані на робочому місці.

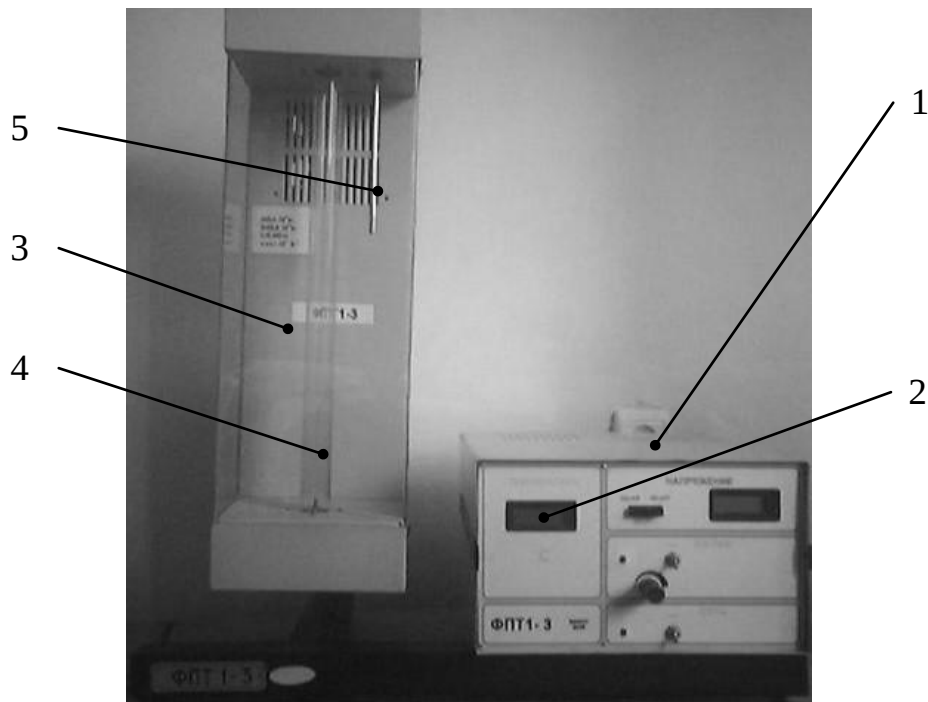


Рис.унок 113.1 Установка ФПТ1-3:

1. блок приладів БП-3;
2. цифровий термометр;
3. блок робочого елемента;
4. вольфрамовий дріт;
5. датчик температури (термопара)

### ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Включити установку тумблером “Мережа”. Включити тумблер “Нагрівання”.
2. Натиснути кнопку “ $U_p$ ”(режим виміру падіння напруги на еталонному резисторі) і за допомогою регулятора “Нагрівання” встановити падіння напруги не більш 0,06 В, при якому температура дроту залишається практично незмінною (“ненагріваючий” струм).
3. Натиснути кнопку “ $U_H$ ” (режим виміру падіння напруги на дроті) і зареєструвати значення напруги.
4. Повторити виміри по пп. 2-3 для 3-5 значень напруги  $U_{p.0}$ . Усі результати занести в таблицю 113.1
5. Натиснути кнопку “ $U_p$ ” і за допомогою регулятора “Нагрівання”, встановити падіння напруги на еталонному резисторі  $U_p$  в діапазоні 0,3...1,5 В.

6. Почекавши 2 хвилини, що необхідно для стабілізації теплового режиму робочого елемента, натиснути кнопку “ $U_H$ ” і визначити падіння напруги на дроті  $U_H$ .
7. Повторити виміри по пп. 5-6 для 3–5 значень падіння напруги  $U_P$ .  
Результати занести в таблицю:

| №<br>вим. | $U_P$<br>$B$ | $U_{H.O.}$<br>$B$ | $t_0, ^\circ C$ | $U_P$<br>$B$ | $U_H$<br>$B$ | $\Delta T$<br>$K$ | $\aleph$<br>$Вт/(м \cdot K)$ |
|-----------|--------------|-------------------|-----------------|--------------|--------------|-------------------|------------------------------|
|           |              |                   |                 |              |              |                   |                              |

8. Встановити ручку регулятора “Нагрівання” на мінімум. Відключити тумблер “Нагрівання”, після чого відключити установку тумблером “Мережа”.
9. Для кожного вимірювання за формулою (113.8) розрахувати різницю температур  $\Delta T$ , а за формулою (113.7) – коефіцієнт теплопровідності  $\aleph$  і занести отримані значення в таблицю.
10. Знайти середнє значення коефіцієнта теплопровідності повітря  $\langle \aleph \rangle$ .
11. Оцінити похибку результатів вимірювань.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

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

## Лабораторна робота № 114

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВЗАЄМНОЇ ДИФУЗІЇ ПОВІТРЯ І ВОДЯНОЇ ПАРИ

**Мета роботи** – вивчення дифузії як одного з явищ переносу; визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари за швидкістю випарюванні рідини з капіляра.

**Прилади та матеріали:** установка ФПТ1-4.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Дифузія – це процес вирівнювання концентрацій газів, що супроводжується переносом маси відповідного компонента газу з області з більшою в область з меншою концентрацією. Маса компонента газу, що переноситься внаслідок дифузії через поверхню площею  $S$ , перпендикулярну до осі  $Ox$ , за час  $t$ , визначається за законом Фіка:

$$M = -D \frac{d\rho}{dx} St, \quad (114.1)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $d\rho/dx$  – градієнт густини компонента газу.

Для ідеального газу

$$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v_T \rangle, \quad (114.2)$$

тут  $\langle \lambda \rangle$  – середня довжина вільного пробігу молекули;  $\langle v_T \rangle$  – середня швидкість теплового руху молекул,  $\langle v_T \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ .

Розглянемо частково заповнену водою вузьку трубку постійного перерізу  $S$ , відкриту з одного кінця, вісь  $X$  направимо уздовж осі трубки. На границі з водою ( $X=0$ ) парціальний тиск водяної пари  $P_n$  у трубці дорівнює тиску насиченого пару  $P_n$  при температурі досліду. Тиск водяної пари в трубці змінюється уздовж осі  $X$  від значення  $P_n$  до тиску  $P_1$  біля відкритого кінця трубки ( $X=h$ ), що визначається вологістю повітря в лабораторії, отже, уздовж осі трубки існує градієнт парціального тиску пару  $\frac{dP_n}{dx}$ , внаслідок чого в ній виникає дифузійний потік  $M$  пари, спрямований догори. Густину пари  $\rho_n$  можна виразити через її парціальний тиск, використовуючи рівняння стану ідеального газу:

$$\rho_n = \frac{m}{V} = \frac{P_n \mu_n}{RT}. \quad (114.3)$$

Підставляючи отримане співвідношення (114.3) у формулу закону Фіка (114.1), визначимо масу пари, що переноситься через площу поперечного перерізу трубки за одну секунду:

$$M_n = -D \frac{d\rho_n}{dx} S = -\frac{D\mu_n}{RT} \frac{dP_n}{dx} S. \quad (114.4)$$

Нехтуючи масою пари, що переноситься конвекційним потоком, який виникає в трубці, масу пари  $M_n$  можна виразити через швидкість зниження рівня рідини в капілярі:

$$M_n = \rho_p S \frac{\Delta h}{\Delta \tau}, \quad (114.5)$$

де  $\rho_p$  – густина рідини;  $\Delta h$  – зниження рівня рідини за час  $\Delta \tau$ .

Підставляючи отриманий вираз (114.5) у формулу (114.4), одержимо:

$$\rho_p \frac{\Delta h}{\Delta \tau} = -\frac{D\mu_n}{RT} \frac{dP_n}{dx}. \quad (114.6)$$

Розділяючи перемінні й інтегруючи цю рівність, одержимо:

$$\rho_p RT \frac{\Delta h}{\Delta \tau} \int_0^h dx = -D\mu_n \int_{P_n}^{P_1} dP_n,$$

чи

$$\rho_p RT \frac{\Delta h}{\Delta \tau} h = D\mu_n (P_n - P_1),$$

звідки

$$D = \frac{\rho_p RT h \frac{\Delta h}{\Delta \tau}}{\mu_n (P_n - P_1)}, \quad (114.7)$$

де  $D$  – коефіцієнт взаємної дифузії;  $\rho_p$  – густина рідини (води);  $R$  – універсальна газова стала,  $R=8,31$  Дж/(моль·К);  $h$  – відстань від поверхні води до верхнього краю трубки;  $T$  – температура води в капілярі і повітря в лабораторії;  $\Delta h$  – зниження рівня рідини за час  $\Delta \tau$ ;  $\mu_n$  – молярна маса води;  $P_n$  – тиск насиченої пари;  $P_1$  – тиск пари, що визначається вологістю повітря в лабораторії.

Формулу (114.7) можна використовувати для експериментального визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари, нехтуючи конвекційним потоком пари, що виникає в трубці. При врахуванні конвекційного потоку приходимо до більш точної формули для визначення коефіцієнта взаємної дифузії:

$$D = \frac{\rho_p RT h \frac{\Delta h}{\Delta \tau}}{\mu_p P_0 \lambda n \frac{P_0 - P_1}{P_0 - P_n}}, \quad (114.8)$$

де  $P_0$  – атмосферний тиск.

Необхідно відзначити, що за умови  $P_0 \gg P_n$  із рівняння (114.8) можна дуже просто одержати формулу (114.7).

## ОПИС УСТАНОВКИ

Для визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари призначена експериментальна установка ФПТ-1-4, загальний вигляд якої зображений на рисунку 114.1.

Основним елементом установки є мікроскоп 4, на предметному столику якого розташовано робочий елемент, що складається з вимірювача, до рухливої частини якого прикріплений корпус з оргскла. В отворі корпусу знаходиться скляна трубка (капіляр) з дистильованою водою.

Для підсвічування трубки при вимірах застосовується ліхтар, світло від якого передається до робочого елемента по світловоду з оргскла. Яскравість світіння лампи встановлюється регулятором “Підсвічування капіляра”, що знаходиться на передній панелі блоку приладів.

Час випарювання води у капілярі вимірюється секундоміром, розташованим у блоці приладів і реєструється на цифровому індикаторі “Час”. Секундомір запускається в хід при включенні живлення блоку приладів. Скидання на нуль значень на індикаторі відбувається натисканням кнопки “Останов”, після відпускання якої знову починається відлік часу.

Температура повітря в блоці робочого елемента вимірюється напівпровідником термометром і реєструється на цифровому індикаторі “Температура” блоку робочого пристрою.

Ціна поділки  $\alpha$  окулярної шкали мікроскопа зазначена на робочому місці.



Рисунок 114.1 Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-4

- 1- блок приладовий БП-4;
- 2- блок РЭ-4;
- 3- мікроскоп;
- 4- робочий елемент

## ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Зняти захисний кожух з мікроскопа і підвісити його на гвинтах задньої панелі. Тубус мікроскопа поставити в положення, при якому предметний столик з робочим елементом розташовується вертикально.
2. Переконавшись в тому, що регулятор підсвічування капіляра в положенні мінімальної яскравості, включити установку тумблером "Мережа".
3. Регулятором підвіски капіляра установити зручне для роботи освітлення. Засобами налаштування мікроскопа досягти чіткого зображення капіляра.
4. Перемістити капіляр обертанням гайки вимірювального пристрою, установити зображення верхнього краю трубки напроти нуля шкали окуляра мікроскопа. Зняти показання зі шкали, визначити рівень  $h_0$  верхнього кінця трубки.
5. Обертанням гайки вимірювального пристрою установити зображення меніска рідини напроти нульового розподілу шкали окуляра мікроскопа, попередньо отримати чітке зображення меніска. Знявши показання зі шкали вимірювального пристрою, визначити рівень  $h_p$  меніска рідини. Знайти значення  $h = h_p - h_0$ . Значення  $h_0, h_p, h$  занести в таблицю:
6. Установити зображення меніска в нижній частині окуляра мікроскопа, враховуючи, що при випарюванні рідини перевернуте зображення меніска переміщується вгору, записати положення меніска  $n$  за шкалою і почати відлік часу.
7. Спостерігаючи в мікроскоп за рухом меніска рідини, через кожні 5 поділок шкали окуляра занести в таблицю 114.1 значення  $n$  і час  $t$  випарювання рідини.
8. Зробити 8-10 вимірювань положення меніска. При виході зображення меніска з поля зору необхідно обертанням гайки вимірювального пристрою повернути зображення в початкове положення.
9. Виміряти температуру повітря в робочому елементі установки.
10. Установити регулятор підсвічування капіляра в положенні мінімальної яскравості, після чого виключити установку тумблером "Мережа". Тубус мікроскопа встановити у вертикальне положення.
11. Побудувати графік залежності числа поділок  $n$  окулярної шкали мікроскопа від часу  $t$ :  $n=f(t)$  і за нахилом отриманої усередненої прямої визначити середнє значення  $\frac{\Delta n}{\Delta t}$ . Помножити цю величину на ціну поділки  $\alpha$  окулярної шкали, знайти середнє значення швидкості випарювання рідини з капіляра  $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ .
12. Використати отримане значення  $\frac{\Delta h}{\Delta t}$  для обчислення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари за формулою (114.8) чи (114.7) (за вказівкою викладача), з огляду на те, що густина води  $\rho_p = 10^3 \text{ кг/м}^3$ , молярна маса води  $\mu = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$ . Тиск насиченої водяної пари визначити з таблиці

114.1, де наведена залежність тиску  $P_n$  і густини  $\rho$  насиченої водяної пари від температури, а тиск водяної пари  $P_1$  біля відкритого кінця трубки знайти за значенням відносної вологості  $\varphi$  (у відсотках) у приміщенні лабораторії:

$$P_1 = \frac{\varphi}{100} P_n.$$

13. Оцінити похибку результатів вимірювань.

Таблиця 114.1

| t, °C | $P_n$ кПа | $\rho$ , $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup> | t, °C | $P_n$ кПа | $\rho$ , $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup> |
|-------|-----------|--------------------------------------|-------|-----------|--------------------------------------|
| 15    | 1,704     | 12,84                                | 21    | 2,486     | 18,35                                |
| 16    | 1,817     | 13,65                                | 22    | 2,642     | 19,44                                |
| 17    | 1,937     | 14,50                                | 23    | 2,809     | 20,60                                |
| 18    | 2,062     | 15,39                                | 24    | 2,984     | 21,81                                |
| 19    | 2,196     | 16,32                                | 25    | 3,168     | 23,07                                |
| 20    | 2,337     | 17,32                                | 26    | 3,361     | 24,40                                |

Похибка визначення рівня робочої рідини відносно верхнього краю трубки не більш  $10^{-4}$  м. Похибка визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари не більш 30%. Діаметр капіляра 1,0 мм.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. У чому полягає явище дифузії? Яка величина переноситься при дифузії?
2. Напишіть формулу закону Фіка і поясніть фізичний зміст коефіцієнта дифузії.
3. Напишіть формулу для коефіцієнта дифузії ідеального газу.
4. Що таке парціальний тиск? Як можна визначити тиск суміші газів?
5. Що таке відносна вологість повітря? Як можна вимірити цю величину?
6. У чому полягає метод визначення коефіцієнта взаємної дифузії повітря і водяної пари за швидкістю випарювання рідини з капіляра?
7. Виведіть розрахункову формулу для визначення коефіцієнта взаємної дифузії.
8. Основні джерела похибок даного методу вимірювань.

## Лабораторна робота № 115

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ РІДИНИ ЗА МЕТОДОМ СТОКСА

**Мета роботи** – визначити коефіцієнт внутрішнього тертя (або в'язкості) рідини.

**Прилади і обладнання:** закріплений на підставці скляний циліндр; рідини, які мають велику в'язкість (гліцерин, касторове масло); свинцеві кульки діаметром 2–4 мм; мікрометр; масштабна лінійка; секундомір.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

*Внутрішнє тертя* виникає при переміщенні одних шарів реальної рідини відносно інших. *В'язкість* – це властивість реальних рідин чинити опір переміщенню однієї їх частини відносно іншої. В газах відстані між молекулами суттєво більші за радіус дії молекулярних сил, тому в'язкість газів є наслідком хаотичного (теплого) руху молекул, в результаті якого відбувається постійний обмін молекулами між шарами газу, що переміщуються один відносно одного. Це приводить до перенесення від шару до шару певної кількості руху (імпульсу), в результаті чого повільніші шари прискорюються, а більш швидкі сповільнюються. В рідинах, де відстань між молекулами набагато менша, ніж в газах, в'язкість обумовлена в першу чергу міжмолекулярною взаємодією, яка обмежує рухливість молекул. Таким чином, при відносному переміщенні шарів рідини виникають сили внутрішнього тертя, які направлені по дотичній до поверхні шарів.

Розглянемо рідину, яка рухається в напрямку осі  $x$  (рис. 115.1). Нехай шари рідини рухаються з різними швидкостями. На осі  $z$  візьмемо дві точки, які знаходяться на відстані  $dz$ . Швидкість потоку відрізняється в цих точках на величину  $dv$ . Відношення  $\frac{dv}{dz}$  характеризує зміну швидкості потоку на одиницю довжини в напрямку, перпендикулярному до руху шарів (в даному випадку в напрямку осі  $z$ ) і називається *градієнтом швидкості*.

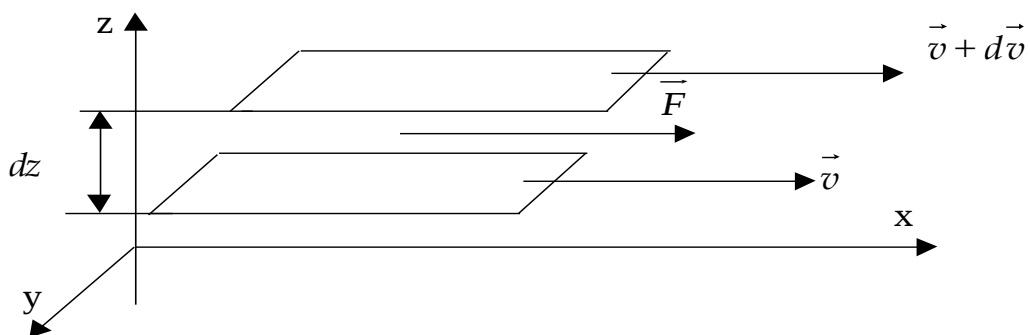


Рисунок 115.1.

І. Ньютон експериментальним шляхом встановив, що сила внутрішнього тертя між шарами рідини пропорційна градієнту швидкості  $\frac{dv}{dz}$  і площі шарів  $\Delta S$ , тобто

$$\Delta F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| \Delta S, \quad (115.1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт пропорційності, який характеризує властивості даної рідини і називається *коефіцієнтом внутрішнього тертя* або *коефіцієнтом динамічної в'язкості*.

Якщо в формулі (115.1) покласти чисельно  $\frac{dv}{dz} = 1$  і  $S = 1$ , то  $\eta = F$ , тобто *коефіцієнт внутрішнього тертя чисельно дорівнює силі внутрішнього тертя, що виникає на кожній одиниці площі поверхні дотичних шарів, які рухаються один відносно одного з градієнтом швидкості, що дорівнює одиниці (фізичний зміст  $\eta$ )*. Одиницею динамічної в'язкості в СІ є ньютон – секунда на квадратний метр ( $H \cdot c / m^2$ ).

Характерним для рідини є значна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості від температури. Ця залежність в'язкості рідини від температури визначається формулою Френкеля:

$$\eta = A e^{\frac{\varepsilon_0}{kT}}, \quad (115.2)$$

де  $A$  – коефіцієнт, який залежить від природи рідини.

Вираз (115.2) має зміст в інтервалі температур плавлення  $T_{пл}$  і кристалізації  $T_{кр}$  (рис. 115.2), вище якої рідина існувати не може. Формула (115.2) показує, що коефіцієнт в'язкості  $\eta$  рідини при збільшенні температури зменшується (рис. 115.2), в той час як для газів зростає пропорційно  $\sqrt{T}$ . Пояснюється це тим, що для газів в'язкість, в основному, визначається швидкістю хаотичного теплового руху молекул. На противагу цьому в рідинах в'язкість визначається рухомістю молекул, яка залежить від дії молекулярних сил.

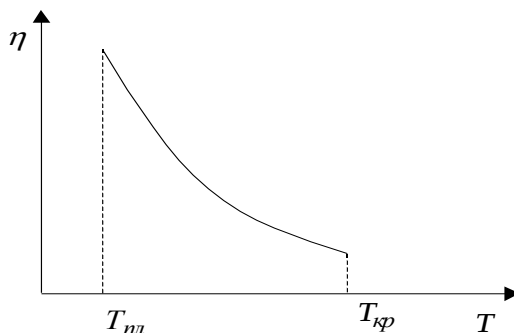


Рисунок 115.2

Для касторового масла, наприклад, коефіцієнт внутрішнього тертя при температурі  $20^{\circ}\text{C}$  дорівнює  $1,02 \frac{\text{H} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$ , а при температурі  $40^{\circ}\text{C}$  –  $0,224 \frac{\text{H} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$ .

Тому, записуючи значення коефіцієнта внутрішнього тертя, необхідно вказувати температуру рідини з точністю до  $0,5^{\circ}\text{C}$ , оскільки поблизу  $20^{\circ}\text{C}$  зміна на  $1^{\circ}\text{C}$  викликає зміну коефіцієнта внутрішнього тертя касторового масла на 6%.

В'язкість рідини залежить також від тиску. При малих тисках коефіцієнт внутрішнього тертя не залежить від тиску, але при тисках в тисячі й десятки тисяч атмосфер дуже зростає. Це зумовлено тим, що в сильно стиснутих рідинах із зростанням тиску поступальний рух молекул сповільнюється, молекули не можуть перейти на нове місце, а тому обмін імпульсом між шарами зменшується. Наприклад, в'язкість води при тиску 20000 атм збільшується в декілька мільйонів разів.

Під час руху тіл у рідинах і газах, крім сил тертя, виникають так звані сили опору середовища, які можуть значно перевищувати сили в'язкого тертя. Сумарну силу, зумовлену в'язким тертям і опором середовища, прийнято умовно називати *силою тертя*.

При невеликих швидкостях сила тертя пропорційна швидкості

$$F = -k_1 v. \quad (115.3)$$

Знак мінус вказує на те, що сила напрямлена протилежно до швидкості. При більших швидкостях лінійна залежність переходить у квадратичну

$$F = -k_2 v^2. \quad (115.4)$$

Швидкість, при якій залежність (115.3) переходить у (115.4) залежить від форми і розмірів тіла, а також від в'язких властивостей і густини середовища.

Якщо кулька повільно рухається в рідині, вона зустрічає опір, зумовлений в'язкістю рідини, причому в цьому випадку спостерігається не тертя кульки об рідину, а тертя між шарами рідини: кулька покривається тонким шаром рідини, який рухається зі швидкістю кульки, наступні більш віддалені від кульки шари рідини рухаються із швидкостями, які зменшуються. Стокс теоретично показав, що при падінні кульки у в'язких середовищах з невеликими швидкостями без завихрення при умові, що стінки посудини знаходяться далеко від кульки ( $R \gg r$ , де  $R$  – радіус поперечного перерізу циліндричної посудини,  $r$  – радіус кульки), сила тертя, яка діє на неї, визначається за формулою Стокса

$$F = 6\pi\eta r v, \quad (115.5)$$

де  $v$  – швидкість падіння кульки;  $r$  – радіус кульки.

## ТЕОРІЯ МЕТОДУ

У цій роботі коефіцієнт внутрішнього тертя рідини визначають за методом Стокса, у якому розглядають рівномірне падіння кульки в рідині.

На тверду кульку, що падає у в'язкій рідині діють три сили (рис.115.3): сила тяжіння  $\vec{mg}$ , виштовхувальна сила – сила Архімеда  $\vec{F}_A$  і сила тертя  $\vec{F}$ .

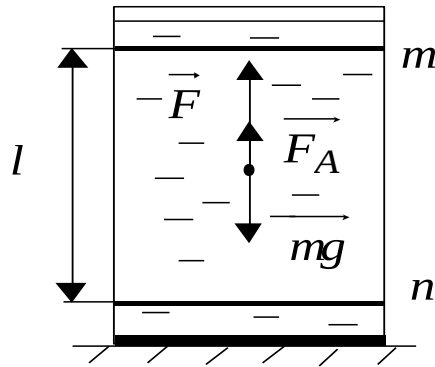


Рисунок 115.3.

Сила тяжіння визначається за формулою

$$mg = \rho Vg = \rho \frac{4}{3} \pi r^3 g ,$$

де  $\rho$  – густина матеріалу кульки;  $r$  – радіус кульки.

Виштовхувальна сила (сила Архімеда), яка напрямлена вертикально вгору, визначається за законом Архімеда

$$F_A = \rho_1 Vg = \rho_1 \frac{4}{3} \pi r^3 g ,$$

де  $\rho_1$  – густина рідини.

Сила тертя, яка напрямлена вертикально вгору, визначається за формулою (115.5).

При русі кульки швидкість її зростає, а отже зростає і сила тертя; при деякому значенні швидкості  $v_k$ , сили, які діють на кульку, зрівноважуються. Рух кульки стає рівномірним. З умови рівноваги всіх діючих на кульку сил

$$mg = F_A + F ,$$

або

$$\rho \frac{4}{3} \pi r^3 g = \rho_1 \frac{4}{3} \pi r^3 g + 6\pi\eta r v_k$$

слідє вираз для коефіцієнта внутрішнього тертя у вигляді

$$\eta = \frac{2}{9} g r^2 \frac{\rho - \rho_1}{v_k} . \quad (115.6)$$

Швидкість рівномірного руху  $v_k$  кульки знайдемо за формулою

$$v_k = \frac{l}{t}, \quad (115.7)$$

де  $l$  – шлях, пройдений кулькою при рівномірному русі (відстань між мітками  $m$  і  $n$  на циліндрі з рідиною).

Підставляючи значення для  $v_k$  із формули (115.7) у вираз (115.6), дістанемо формулу для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя

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

Враховуючи, що в досліді вимірюють діаметр кульки, а не її радіус, одержимо формулу для визначення  $\eta$  у вигляді

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho - \rho_1) d^2 t g}{l}. \quad (115.8)$$

Здійснити падіння кульки в безмежному середовищі практично неможливо, оскільки рідина завжди знаходиться в посудині, яка має стінки. Врахування наявності стінок, дна посудини і верхньої поверхні рідини при русі кульки вздовж осі циліндричної посудини приводить до наступного виразу для коефіцієнта в'язкості:

$$\eta = \frac{1}{18} g d^2 \frac{(\rho - \rho_1)}{v_k} \frac{1}{1 + 2,4 \frac{r}{R}} \frac{1}{1 + 3,3 \frac{r}{h}},$$

де  $R$  – радіус поперечного перерізу циліндричного посуду;  $h$  – висота стовпа рідини в ньому. Так як  $\frac{r}{h}$  для установки, що застосовується, дуже мале, то для обчислення коефіцієнта внутрішнього тертя можна скористатися більш простою розрахунковою формулою

$$\eta = \frac{1}{18} g d^2 \frac{(\rho - \rho_1) t}{l (1 + 2,4 \frac{d}{D})}. \quad (115.9)$$

### ОПИС УСТАНОВКИ

Установка для вимірювання  $\eta$  представляє собою скляний циліндр, на якому закріплена масштабна лінійка. На циліндрі закріплені також два тонких металевих кільця (мітки)  $m$  і  $n$  (рис. 115.3), відстань між якими  $l$ . Верхня мітка  $m$  виставляється на такій відстані від поверхні рідини, щоб подальший рух кульки можна було вважати рівномірним.

### ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. За допомогою масштабної лінійки виміряти відстань  $l$  між позначками  $m$  і  $n$ .

- Взяти для досліду чотири свинцеві кульки діаметром 2...4 мм. За допомогою мікрометра виміряти діаметр кульки не менше трьох разів. Після кожного виміру кульку виймати з мікрометра, а потім вставляти знову. Це робиться для того, щоб наступний вимір було зроблено в іншому напрямі.
- Опустити кульку в рідину через отвір в лійці, що знаходиться у верхній частині циліндра з рідиною.
- За допомогою секундоміра визначити час, за який кулька, рухаючись рівномірно, проходить відрізок  $l$  між двома металевими кільцями  $m$  і  $n$ . Око розмістити так, щоб уникнути паралакса.
- Дослід повторити ще тричі з іншими кульками і результати вимірювань записати у звітну таблицю.

| №<br>п/п | $l$ , м | $t$ , с | $d$ , м | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | $\rho_1$ , кг/м <sup>3</sup> | $t$ , °C | $D$ , м | $\eta, \frac{H \cdot c}{m^2}$ |
|----------|---------|---------|---------|----------------------------|------------------------------|----------|---------|-------------------------------|
| 1        |         |         |         |                            |                              |          |         |                               |
| 2        |         |         |         |                            |                              |          |         |                               |
| 3        |         |         |         |                            |                              |          |         |                               |
| Сер.     |         |         |         |                            |                              |          |         |                               |

- Записати в таблицю температуру рідини, вважаючи її рівною кімнатній температурі, густину досліджуваної рідини  $\rho_1$  та свинцевої кульки  $\rho$  з довідника.
- Виміряти внутрішній діаметр  $D$  скляного циліндра (якщо він не вказаний на робочому місці) і записати його в таблицю.
- За формулою (115.9) визначити коефіцієнт внутрішнього тертя у випадку падіння в рідині кожної кульки.
- Визначити середнє значення  $\eta$  для досліджуваної рідини.
- За формулою

$$\Delta \eta = \eta_{cp} E = \pm \eta_{cp} \left( \frac{\Delta \rho + \Delta \rho_1}{\rho - \rho_1} + 2 \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{2,4(D\Delta d + d\Delta D)}{\left(1 + 2,4 \frac{d}{D}\right) D^2} \right)$$

визначити середню абсолютну похибку вимірювання.

- Результати вимірювань записати у вигляді

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

- Точність вимірювання  $\eta$  для даної рідини визначити за формулою

$$E = \frac{\Delta \eta}{\eta_{табл.}} \cdot 100\% = \frac{|\eta_{cp} - \eta_{табл.}|}{\eta_{табл.}} \cdot 100\%.$$

13. Зробити висновок.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає фізична модель явища внутрішнього тертя в рідинах?
2. Записати і пояснити вираз для сили внутрішнього тертя.
3. Що називається коефіцієнтом внутрішнього тертя і який його фізичний зміст?
4. У яких одиницях вимірюється  $\eta$  в системі СІ ?
5. Чому, починаючи з деякого моменту часу, кулька рухається рівномірно ?
6. Чому верхнє кільце (мітка)  $m$  розташована дещо нижче поверхні рідини ?
7. Які сили діють на кульку, яка падає в рідині ?
8. Виведіть формулу (115.9).
9. Для чого необхідно, щоб кульки мали діаметр значно менший, ніж внутрішній діаметр циліндричного посуду ?
10. Як залежить в'язкість рідини від температури і тиску ?

## Лабораторна робота № 116

### ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ ПОСТІЙНОМУ ТИСКУ ДО ТЕПЛОЄМНОСТІ ПОВІТРЯ ПРИ ПОСТІЙНОМУ ОБ'ЄМІ

**Мета роботи** – вивчення процесів в ідеальних газах, визначення відношення теплоємностей  $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ .

**Прилади і обладнання:** установка ФПТ 1 – 6 (варіант А); скляний балон з трубками, водяний манометр, гумова груша (варіант В).

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Важливе значення при вивченні теплових властивостей речовин має поняття *теплоємності*. Теплоємність тіла чисельно дорівнює кількості теплоти, яку слід надати тілу для підвищення його температури на один кельвін.

Якщо тілу надано малу кількість теплоти  $\delta Q$ , яка викличе мале підвищення температури  $dT$ , то його теплоємність

$$C_0 = \frac{\delta Q}{dT}.$$

Теплоємність одиниці маси речовини називають *питомою теплоємністю*:

$$c = \frac{C_0}{m} = \frac{\delta Q}{mdT},$$

де  $m$  – маса речовини.

Питома теплоємність речовини  $c$  – таблична величина.

*Молярною теплоємністю* речовини називають кількість теплоти, яку слід надати одному молю речовини для підвищення його температури на один кельвін.

$$C = \frac{\delta Q}{\nu dT},$$

де  $\nu$  – число молів речовини.

Між молярною  $C$  і питомою  $c$  теплоємностями існує зв'язок:

$$C = \mu c,$$

де  $\mu$  – молярна маса речовини.

В одиницях СІ питома теплоємність вимірюється в  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ , молярна теплоємність –  $\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{K})$ .

Теплоємність речовини в різних процесах різна, тому її не можна вважати характеристикою тільки самої речовини. Найчастіше в термодинаміці доводиться мати справу з ізопроцесами в газах, при цьому розглядають теплоємність при ізобаричному процесі –  $C_P$ , теплоємність при ізохоричному процесі –  $C_V$ .

В основі розрахунку теплоємностей лежить *перший закон термодинаміки*: кількість теплоти  $\delta Q$ , яка надана системі, витрачається на збільшення внутрішньої енергії  $dU$  системи та на виконання системою роботи проти зовнішніх сил:

$$\delta Q = dU + \delta A, \quad (116.1)$$

де  $\delta Q$  і  $\delta A$  – елементарні кількості теплоти і роботи (це неповні диференціали).

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

$$dU = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R dT, \quad (116.2)$$

де  $i$  – число *ступенів свободи* молекули, під яким розуміють мінімальну кількість незалежних координат, що повністю визначають положення молекули у просторі:

$i = 3$  – для одноатомної;  $i = 5$  – для двоатомної;  $i = 6$  – для три – та багатоатомної молекули;  $R$  – універсальна газова стала ( $R = 8,31 \text{ Дж / (моль} \cdot \text{K)}$ ).

При розширенні газ виконує роботу

$$\delta A = p dV.$$

Якщо газ нагрівається при постійному об'ємі ( $V = \text{const}$ ), то  $\delta A = 0$ , і, згідно з (116.1) вся одержана газом теплота витрачається на збільшення його внутрішньої енергії

$$\delta Q = dU.$$

Отже, врахувавши (116.2), вираз для молярної теплоємності ідеального газу при постійному об'ємі можна записати у вигляді:

$$C_V = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT} = \frac{\nu \frac{i}{2} R dT}{\nu dT} = \frac{i}{2} R. \quad (116.3)$$

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

$$\delta Q_P = dU + p dV.$$

Розділимо обидві частини рівняння на  $\nu dT$ :

$$\frac{\delta Q_P}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT} + \frac{p dV}{\nu dT}.$$

Звідси маємо, що

$$C_P = C_V + \frac{p dV}{\nu dT}. \quad (116.4)$$

З рівняння стану ідеального газу (рівняння Менделєєва – Клапейрона) для одного моля

$$PV = \nu RT$$

знайдемо вираз для  $V$  і диференціюємо його по  $T$ :

$$V = \frac{\nu RT}{P}; \quad \frac{dV}{\nu dT} = \frac{R}{P}. \quad (116.5)$$

Підставивши (116.5) в (116.4), знайдемо

$$C_P = C_V + R. \quad (116.6)$$

Це співвідношення між молярними теплоємностями називається рівнянням Майєра.

Підставивши значення молярної теплоємності  $C_V$  з (116.3) у рівняння (116.6), одержимо значення молярної теплоємності у випадку нагрівання газу при постійному тиску:

$$C_P = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R.$$

Поряд з ізопроцесами, у газах розглядають також адіабатичний процес. *Адіабатичним* називається процес, який відбувається без теплообміну між системою і зовнішнім середовищем ( $\delta Q = 0$ ). Практично він може бути здійснений у системі, оточеній теплоізолюючою оболонкою, але оскільки для теплообміну потрібен деякий час, то адіабатичним можна вважати також процес, який відбувається так швидко, що система не встигає вступити у теплообмін із навколишнім середовищем.

Параметри ідеального газу при адіабатичному процесі зв'язані між собою співвідношенням

$$PV^\gamma = \text{const}. \quad (116.7)$$

Рівняння (116.7) називається рівнянням адіабати (рівняння Пуассона), а величина  $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$  - показником адіабати, або коефіцієнтом Пуассона.

Існують і інші форми запису рівняння адіабати:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const}; \quad T^\gamma P^{1-\gamma} = \text{const}. \quad (116.8)$$

Метод визначення показника адіабати, запропонований Клеманом і Дезормом (1819 р.), ґрунтується на дослідженні двох послідовних процесів – адіабатичного та ізохоричного. Ці процеси на діаграмі  $P-V$  (рис. 116.1) зображені кривими, відповідно, 1 – 2 та 2 – 3. Якщо у балон, з'єднаний з відкритим водяним манометром, накачати повітря і зачекати встановлення теплової рівноваги повітря в балоні з навколишнім середовищем, то в цьому початковому стані 1 газ має параметри  $P_1, V_1, T_1$ , причому температура газу в балоні дорівнює температурі навколишнього середовища  $T_1 = T_0$ , а тиск  $P_1 = P_0 + p'$ , трохи більший від атмосферного.

Якщо тепер на короткий час з'єднати балон з атмосферою, то станеться адіабатичне розширення повітря. При цьому повітря в балоні перейде в стан 2, його тиск знизиться до атмосферного  $P_2 = P_0$ . Маса повітря, що залишилась в балоні, яка в стані 1 займала частину об'єму балона, розширюючись, займе весь об'єм  $V_2$ , а температура повітря, що залишилось у балоні, знизиться до  $T_2$ .

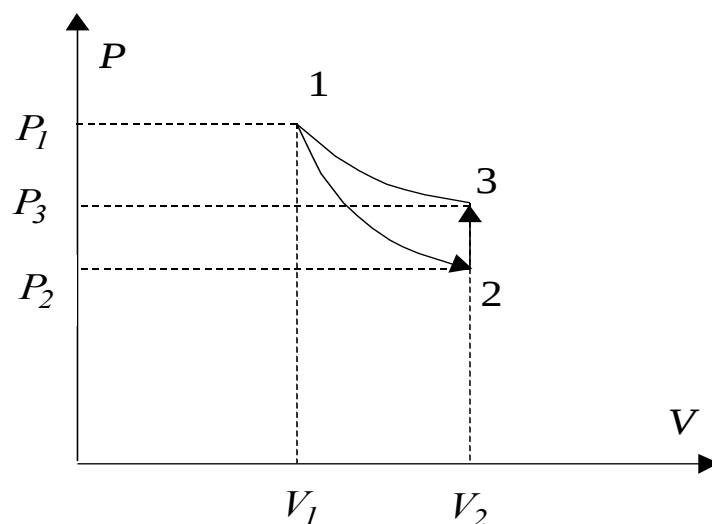


Рис. 116.1. Процеси зміни стану газу під час проведення дослідів

Оскільки процес 1 – 2 є адіабатичним, до нього можна застосувати рівняння Пуассона (116.8):

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

Звідси,

$$\left( \frac{P_0 + P'}{P_0} \right)^{\gamma-1} = \left( \frac{T_0}{T_2} \right)^\gamma. \quad (116.9)$$

Після короткочасного з'єднання балона з атмосферою охолоджене адіабатичним розширенням повітря в балоні буде нагріватись ( процес 2 – 3) до температури навколишнього середовища  $T_3 = T_0$  при постійному об'ємі  $V_3 = V_2$ . Нагрівання повітря у балоні приведе до зростання тиску:  $P_3 = P_2 + p''$ . Оскільки процес 2 – 3 є ізохоричним, для нього можна застосувати закон Шарля :

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

звідси

$$\frac{P_0 + p''}{P_0} = \frac{T_0}{T_2}. \quad (116.10)$$

З рівнянь (116.9) та (116.10) дістанемо:

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

Прологарифмуємо:

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

Оскільки надлишкові тиски  $p'$  та  $p''$  дуже малі порівняно з атмосферним тиском  $P_0$ , то можна скористатися співвідношенням  $\ln(1+x) \approx x$ , яке справедливе при  $x \ll 1$ .

Тоді

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

звідки

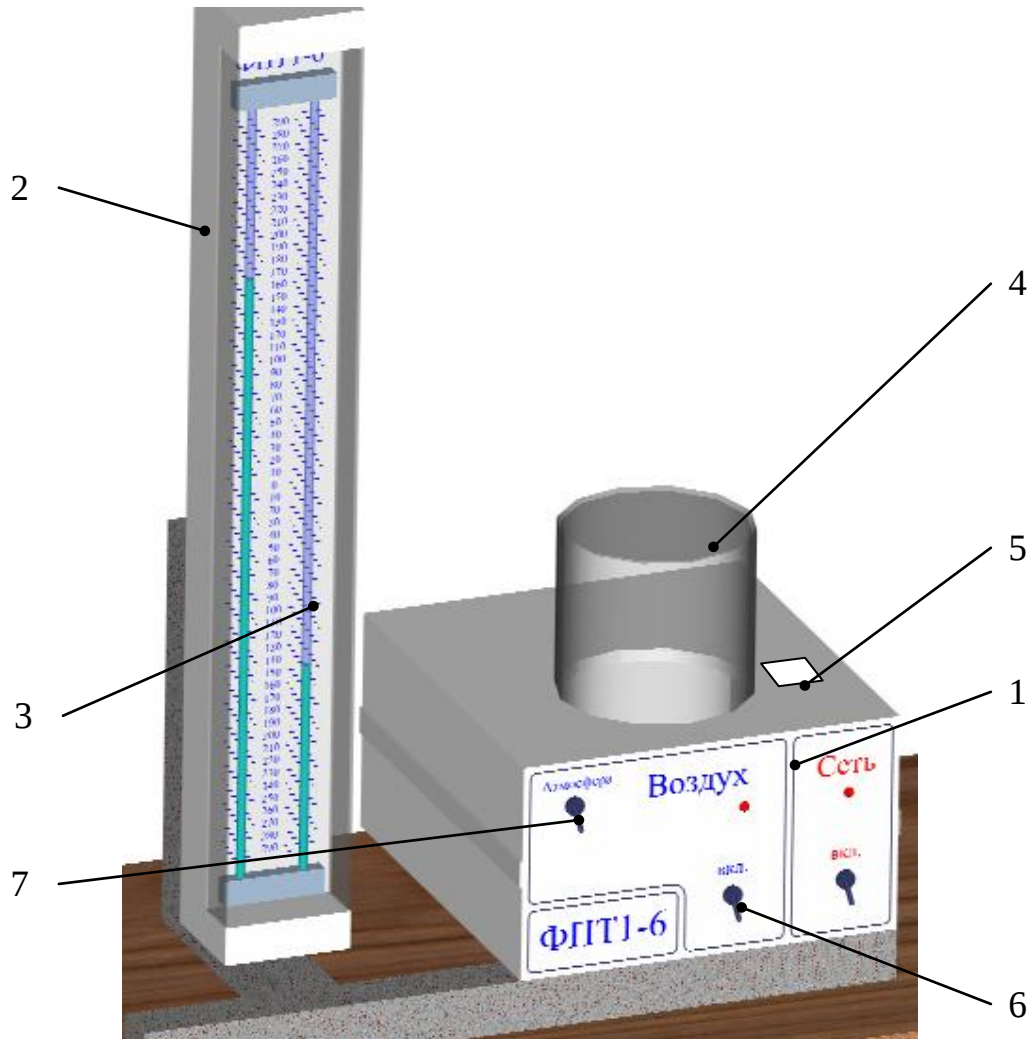
$$\gamma = \frac{p'}{p' - p''}. \quad (116.11)$$

Надлишкові тиски повітря  $p'$  та  $p''$  вимірюють за допомогою  $U$ -подібного манометра за різницею рівнів рідини з густиною  $\rho$ :

$$p'' = \rho g H; \quad p' = \rho g h. \quad (116.12)$$

З (116.11) та (116.12) дістанемо розрахункову формулу для визначення  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \quad (116.13)$$



**Рис. 116.2. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ 1 – 6:**

- 1 – блок робочого елемента; 2 – блок манометра; 3 – водяний манометр;
- 4 – колба; 5 – клапан; 6 – рукоятка ввімкнення мікрокомпресора;
- 7 – рукоятка напуску повітря в робочий об'єм

Установка складається із скляної колби 4, з'єднаної з відкритим водяним манометром 3. Повітря нагнітається в колбу мікрокомпресором розміщеним в блоці робочого елемента 1. Вмикається мікрокомпресор тумблером 6, який знаходиться на передній панелі блоку 1. Кран 7, рукоятка якого, виведена на передню панель блоку робочого елемента, дозволяє з'єднувати колбу з атмосферою при переведенні рукоятки в верхнє положення.

### ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Увімкнути установку тумблером “Сеть”.
2. Встановити рукоятку 7 в нижнє положення за відкрити клапан 5 і увімкнути подачу повітря у колбу тумблером 6.
3. За допомогою манометра 3 контролювати тиск у колбі. Коли різниця рівнів води у манометрі досягне 150...250 мм. вод. ст., вимкнути компресор та закрити клапан 5.
4. Зачекати 2...3 хв., доки температура повітря у колбі зрівняється з температурою навколишнього повітря  $T_0$ , у колбі при цьому встановиться сталий тиск  $P_1 = P_0 + \rho g H$ . Визначити різницю рівнів  $H$ , яка встановилася у колінах манометра, і одержане значення занести до табл. 116.1.
5. На короткий час з'єднати колбу з атмосферою, швидко переводячи рукоятку 7 у верхнє положення. Відразу після зрівняння тиску в колбі з атмосферним швидко перевести рукоятку 7 у нижнє положення
6. Через 2...3 хв., коли в колбі встановиться сталий тиск  $P_3 = P_0 + \rho g h$ , визначити різницю рівнів  $h$ , і одержане значення занести до табл. 116.1.
7. Повторити виміри за пп. 2–6 не менше 10 разів за різних значень величини  $H$ .
8. Вимкнути установку тумблером “Сеть”.

Таблиця 116.1

| Номер виміру     | $H$ , мм. вод. ст. | $h$ , мм. вод. ст. | $\gamma$ | $\Delta\gamma$ |
|------------------|--------------------|--------------------|----------|----------------|
| 1.               |                    |                    |          |                |
| ....             |                    |                    |          |                |
| 8.               |                    |                    |          |                |
| Середнє значення | x                  | x                  |          |                |

9. За формулою (116.13) визначити для кожного виміру  $\gamma$ .
10. Із одержаних значень  $\gamma$  обчислити його середнє значення.
11. Обчислити середню абсолютну похибку вимірювання за формулою

$$\Delta\gamma_{cp} = \pm\gamma_{cp}E = \pm\gamma_{cp} \left\{ \left| \left( \frac{1}{h_{1cp}} - \frac{1-h_{2cp}}{h_{1cp}-h_{2cp}} \right) \Delta h_{1cp} + \left| \frac{h_{1cp}-1}{h_{1cp}-h_{2cp}} \right| \Delta h_{2cp} \right| \right\}.$$

12. Остаточний результат записати у вигляді

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

13. Точність вимірювання визначити за формулою

$$E = \frac{\Delta\gamma}{\gamma_{табл.}} \cdot 100\% = \frac{|\gamma_{cp} - \gamma_{табл.}|}{\gamma_{табл.}} \cdot 100\%.$$

14. Зробити висновки за результатами роботи.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке ізопроцеси і якими законами вони описуються. Нарисуйте графіки цих процесів.
2. Сформулюйте перший закон термодинаміки. Запишіть цей закон для ізобаричного, ізохоричного, ізотермічного та адіабатичного процесів.
3. Дайте визначення питомої та молярної теплоємностей. В яких одиницях системи СІ вони вимірюються?
4. У чому особливість теплоємності газу? Виведіть формулу для молярних теплоємностей  $C_V$  та  $C_P$  ідеального газу.
5. Дайте визначення числа ступенів свободи молекули. Чому дорівнює  $i$  для 1-, 2-, 3- та багатоатомного ідеальних газів?
6. Який процес зветься адіабатичним? Запишіть рівняння Пуассона.
7. Розрахуйте теоретичне значення показника адіабати для 1-, 2- та 3- атомного ідеальних газів.
8. У чому полягає метод Клемана та Дезорма для визначення відношення  $\frac{C_P}{C_V}$ ?
9. Опишіть робочий цикл експериментальної установки за  $P - V$  діаграмою.
10. Виведіть розрахункову формулу для визначення  $\gamma$ .
11. Як і чому змінюється температура газу у колбі при проведенні досліду?
12. Як позначаються на результатах експерименту надто швидке та надто повільне переміщення рукоятки крана під час проведення досліду?

## ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ ВОДИ МЕТОДОМ ВІДРИВУ КІЛЕЦЬ

**Мета роботи** – визначити коефіцієнт поверхневого натягу води при кімнатній температурі і дослідити залежність його від температури.

**Прилади і матеріали:** посудина з водою, прилад для визначення коефіцієнта поверхневого натягу рідини, електроплитка, набір наважок, термометр.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

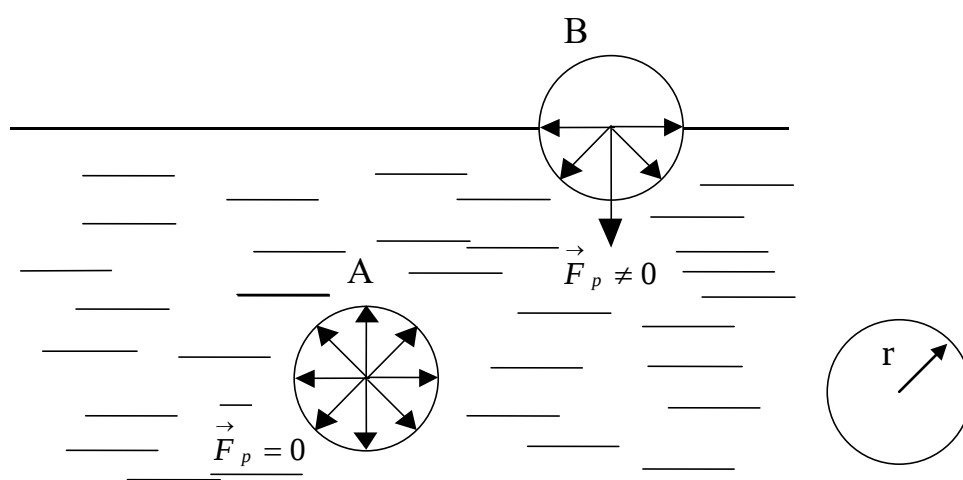


Рисунок 117.1.

Наявність у рідині вільної поверхні зумовлює існування особливих явищ, які називаються поверхневими. Вони виникають тому, що молекули всередині рідини і на її поверхні перебувають у неоднакових умовах. Розглянемо молекулу В, яка міститься на поверхні розділу двох середовищ (наприклад, рідина – повітря), і молекулу А всередині рідини (рис. 117.1).

Як відомо, сили притягання між молекулами із збільшенням відстані швидко зменшуються і, починаючи з деякої відстані  $r$ , силами притягання між молекулами можна знехтувати. Ця відстань  $r$  називається радіусом молекулярної дії, а сфера радіуса  $r$  називається сферою молекулярної дії. Кожна молекула взаємодіє з тими молекулами, які перебувають у межах сфери молекулярної дії, центр якої збігається з даною молекулою. Розглянемо молекулу А, що перебуває всередині рідини. З усіх сторін її оточує однакове число молекул, тому результуюча сил притягування, які діють на молекулу з боку інших молекул, в середньому рівна нулю. В інших умовах перебувають молекули, які лежать на поверхні рідини (наприклад, молекула В). У таких молекул сфера молекулярної дії тільки частково знаходиться в рідині. Оскільки густина пари або газу, з яким межує рідина, в багато разів менша, ніж густина рідини, то в тій частині сфери молекулярної дії, яка виступає з

рідини, буде значно менше молекул, ніж в іншій частині. В цьому разі сили притягування зі сторони сусідніх молекул не будуть взаємнокомпенсовані: їх рівнодійна не дорівнює нулю і напрямлена всередину рідини перпендикулярно до її поверхні.

Таким чином, поверхневий молекулярний шар рідини спричинює на всю рідину тиск, рівний сумі результуючих сил, що діють на одиницю поверхні. Цей тиск називається внутрішнім або молекулярним тиском. Сума сил притягання, що діють на контур, який обмежує поверхню рідини, називається силою поверхневого натягу. Направлена сила поверхневого натягу по дотичній до поверхні рідини і перпендикулярно до контуру, який її обмежує. Ця сила пропорційна числу молекул, що прилягають до контуру, яке в свою чергу пропорційне довжині контуру  $l$ . Тому

$$F = \alpha \cdot l, \quad (117.1)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, який називається коефіцієнтом поверхневого натягу. З (117.1)

$$\alpha = \frac{F}{l}. \quad (117.2)$$

*Коефіцієнт поверхневого натягу* рідини чисельно рівний силі поверхневого натягу, яка діє на одиницю довжини контуру, що обмежує поверхню рідини. В системі СІ  $\alpha$  вимірюється в Н/м. Він залежить від роду рідини, її густини і для більшості рідин зменшується при нагріванні.

Аналіз показує, що молекули поверхневого шару перебувають в особливому енергетичному стані порівняно з молекулами об'єму рідини. Щоб перемістити молекули з глибини рідини у поверхневий шар, необхідно виконати роботу по подоланню молекулярних сил. Ця робота виконується молекулою за рахунок запасу її кінетичної енергії теплового руху і йде на збільшення потенціальної енергії молекули. Отже, молекули в поверхневому шарі мають додаткову потенціальну енергію. Цей надлишок енергії молекул рідини, що містяться в поверхневому шарі, порівняно з енергією всередині об'єму рідини, називається поверхневою енергією. Оскільки положення рівноваги відповідає мінімуму потенціальної енергії, то рідина залишена сама на себе, буде набувати форми з мінімальною площею поверхні, тобто форму кулі. В земних умовах форма краплин відрізняється від сферичної тому, що діють сили земного тяжіння.

Очевидно, що поверхнева енергія пропорційна площі поверхні:

$$dU = \alpha dS,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт поверхневого натягу, який залежить від природи і стану як рідини, так і середовища, з яким стикається дана поверхня рідини.

Для збільшення площі поверхні рідини необхідно перевести молекули із глибинних шарів рідини на поверхню. Це приводить до зменшення середньої кінетичної енергії рідини в цілому, тобто рідина охолоджується. Навпаки, при зменшенні площі поверхні рідини поверхнева енергія зменшується і рідина нагрівається. Зміна температури викличе зміну коефіцієнта поверхневого натягу. Щоб внутрішня енергія рідини змінювалась тільки за рахунок

збільшення поверхневої енергії, процес повинен відбуватись ізотермічно. Та частина поверхневої потенціальної енергії рідини, яка може перейти в роботу по ізотермічному скороченню площі поверхні рідини називається вільною енергією.

Визначимо роботу, яка виконується при ізотермічному скороченні поверхні рідини. З цією метою візьмемо дріт'яну рамку з перемичкою CD, яка може переміщуватися по паралельних сторонах рамки (рис. 117.2). Після опускання рамки в мильний розчин вона затягнеться мильною плівкою. Якщо перемичка досить легка, то сили поверхневого натягу намагатимуться скоротити поверхню рідини і перемичка переміститься на відстань  $dl$ , при цьому виконується робота

$$dA = Fdl. \quad (117.3)$$

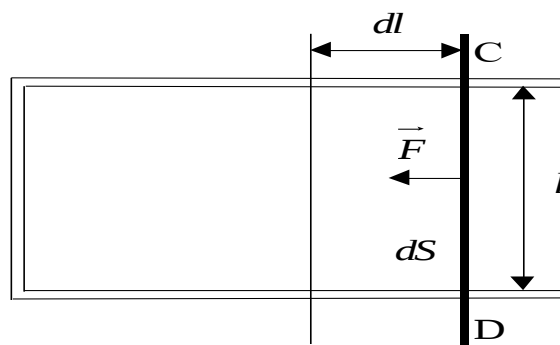


Рисунок 117.2.

Оскільки плівка має 2 поверхні, то сила поверхневого натягу

$$F = 2\alpha \cdot l. \quad (117.4)$$

Підставивши (117.4) в (117.3), дістанемо:

$$dA = 2\alpha \cdot ldl = \alpha dS$$

звідки

$$\alpha = \frac{dA}{dS}. \quad (117.6)$$

Отже, коефіцієнт поверхневого натягу можна визначити як роботу, що йде на ізотермічну зміну площі поверхні рідини на  $1 \text{ м}^2$ , або він чисельно дорівнює вільній енергії, яку має одиниця поверхні шару. Відповідно до цього  $\alpha$  можна вимірювати не тільки в Н/м, але і в Дж/м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт поверхневого натягу залежить від природи рідини і температури. Залежність  $\alpha(T)$  вперше дослідив Д. Менделєєв (1860 р.). Він встановив, що для кожної рідини існує критична температура  $T_{кр}$ , при якій поверхневий натяг дорівнює нулю, тобто зникають будь – які відмінності між рідиною та її насиченою парою. Для рідин ( як вода, спирт, ефір і багатьох рідкісних металів) коефіцієнт  $\alpha$  з підвищенням температури зменшується за лінійним законом.

Відомо багато емпіричних формул для визначення залежності  $\alpha(T)$ . Зокрема, за формулою Бачинського

$$\alpha = C(\rho_p - \rho_n)^4, \quad (117.7)$$

де  $C$  – стала для даної речовини;  $\rho_p$  і  $\rho_n$  – відповідно густина рідини і пари, які залежать від температури.

Характер залежності коефіцієнта  $\alpha$  від природи рідини наближено описується формулою Стефана:

$$\alpha = \frac{r}{N_A} \left( \rho \frac{N_A}{\mu} \right)^{\frac{3}{2}},$$

де  $\rho$  – густина;  $\mu$  – молярна маса;  $r$  – питома теплота випаровування;  $N_A$  – число Авогадро.

На поверхневий натяг рідини великий вплив мають домішки. Наприклад, мило, розчинене у воді, зменшує коефіцієнт поверхневого натягу з 0,075 до 0,045 Н/м. Речовини, які зменшують поверхневий натяг рідини, називають поверхнево – активними речовинами (ПАР). Щодо води ПАР є нафта, спирти, ефіри, мило, тощо.

З молекулярної точки зору вплив ПАР обумовлений тим, що сили притягування між молекулами самої рідини більші, ніж сили притягання між молекулами рідини і поверхнево – активними домішками. А тому розміщені в поверхневому шарі молекули рідини притягуються всередину рідини сильніше, ніж молекули домішки. В результаті цього молекули переміщуються з поверхневого шару всередину рідини, а молекули ПАР витискуються на поверхню.

Деякі речовини збільшують поверхневий натяг рідини тому, що молекули домішок взаємодіють з молекулами рідини сильніше, ніж молекули рідини між собою. Очевидно, молекули таких домішок будуть переміщуватись всередину рідини, а в поверхневому шарі залишаться в основному молекули рідини. Відносно води такими домішками є цукор і сіль.

Поверхня мильної води складатиметься переважно з молекул мила, поверхня водневого розчину спирту – з молекул спирту, а поверхня водневого розчину цукру у воді – переважно з молекул води.

Таким чином, зменшення вільної енергії поверхні рідини можна здійснити у два способи:

- 1) скороченням поверхні рідини;
- 2) введенням у рідину ПАР.

Поверхнево – активні речовини набули широкого застосування при бурінні гірських порід, різанні металів, флотаційних процесах, тощо. Адсорбуючись на поверхні гірської породи або металу, молекули ПАР проникають всередину мікротріщин і сприяють їх збільшенню, а тому руйнування твердих тіл відбувається при менших зовнішніх зусиллях.

В цій роботі коефіцієнт поверхневого натягу води визначається методом відриву кільця. В даній роботі використовуються два кільця. Метод відриву кільця полягає у визначенні величини сили, потрібної для відриву кільця, що

змочується водою, від її поверхні, і у вимірюванні зовнішнього і внутрішнього ободів кілець (плівка утворюється з обох боків кілець).

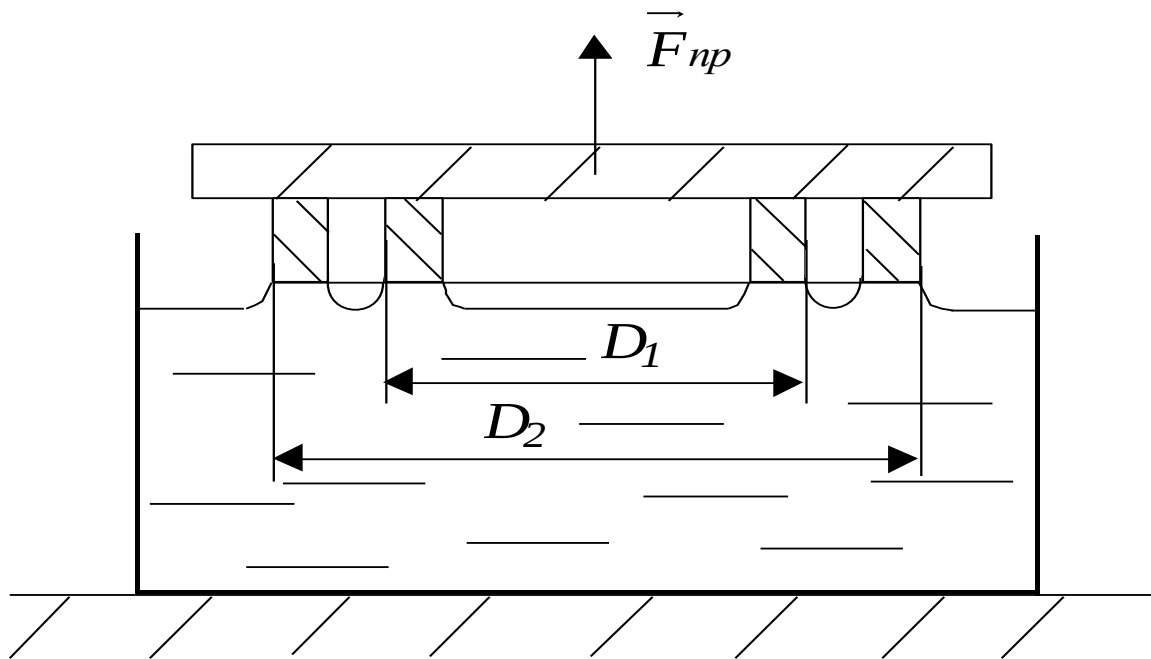


Рисунок 117.3

Якщо позначити зовнішній й внутрішній діаметри першого кільця відповідно через  $D_1$  і  $D_1 - 2d$ , а другого – відповідно  $D_2$  і  $D_2 - 2d$  (рис. 117.3), силу відриву кілець від поверхні води через  $F$ , а коефіцієнт поверхневого натягу води через  $\sigma$ , то можна записати:

$$\sigma = \frac{F}{l} = \frac{F}{l_1 + l_2 + l_3 + l_4} = \frac{F}{\pi D_1 + \pi(D_1 - 2d) + \pi D_2 + \pi(D_2 - 2d)}.$$

Звідки

$$\sigma = \frac{F}{2\pi[(D_1 + D_2) - 2d]}, \quad (117.8)$$

де  $d$  – товщина стінок кільця. Формула (117.8) – це розрахункова формула для визначення коефіцієнта поверхневого натягу води в нашій роботі.

### ОПИС УСТАНОВКИ

Прилад для визначення коефіцієнта поверхневого натягу води методом відриву кілець зображено на рис. 117.4. Він складається із спеціального стояка – штатива 1, на якому закріплена міліметрова шкала 2. На кронштейні 3 перед міліметровою шкалою 2 підвішена пружина 4 з двома кільцями 5. Кільця кріпляться до платформи 6 з стрілкою – показчиком (візіром) 7. На платформу кладуть різноважки для градування пружини. Вздовж стояка за допомогою гвинта 8 можна повільно переміщувати пружину з кільцями до її контакту з водою в посудині 9.

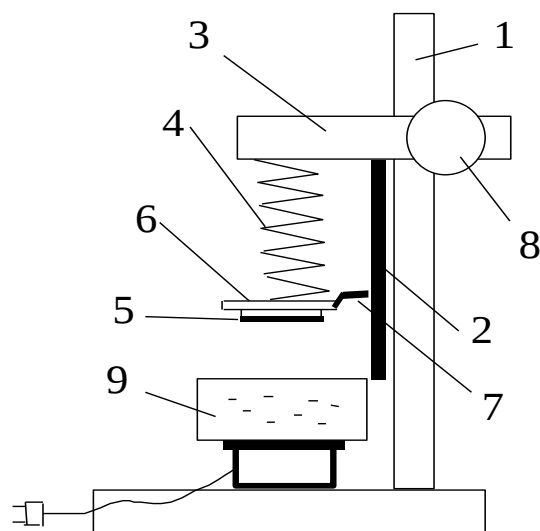


Рисунок 117.4.

### ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

Відмітити поділку  $l_0$  на шкалі 2, яка відповідає положенню візира при ненавантаженій платформі 6; очі спостерігача повинні знаходитись у площині диска.

- Послідовно навантажуючи платформу різноважками, записати відповідні положення візира 7:  $l_1, l_2, l_3, \dots$ . Визначити видовження пружини  $\Delta l_1 = l_1 - l_0, \Delta l_2 = l_2 - l_0, \Delta l_3 = l_3 - l_0$  та ін. при відповідних навантаженнях платформи.
- Результати вимірювань  $\Delta l$  при певних значеннях  $\overrightarrow{mg}$  записати в таблицю 117.1.

Таблиця 117.1.

| № | $mg, H$ | $\Delta l, мм$ | № | $mg, H$ | $\Delta l, мм$ |
|---|---------|----------------|---|---------|----------------|
| 1 |         |                | 4 |         |                |
| 2 |         |                | 5 |         |                |
| 3 |         |                | 6 |         |                |

Таблиця 117.2.

| № | $\Delta l'_{cp}, мм$ | $F, H$ | $t, ^\circ C$ | $\sigma, H/м$ | №   | $\Delta l'_{cp}, мм$ | $F, H$ | $t, ^\circ C$ | $\sigma, H/м$ |
|---|----------------------|--------|---------------|---------------|-----|----------------------|--------|---------------|---------------|
| 1 |                      |        |               |               | 4   |                      |        |               |               |
| 2 |                      |        |               |               | 5   |                      |        |               |               |
| 3 |                      |        |               |               | Ср. |                      |        |               |               |

3. Побудувати графік градування пружини  $\Delta l = f(mg)$ .
4. Налити в посудину свіжу воду і поставити її на платформу.
5. Термометром заміряти температуру води.
6. Гвинтом 9 поступово опустити пружину з кільцями до тих пір, поки кільця не торкнуться своєю основою поверхні води. Відмітити поділку  $l_0$  на шкалі, яка відповідає положенню візира до відривання кілець.
7. За допомогою гвинта 8 повільно підняти пружину з кільцями. Відмітити поділку  $l$  на шкалі, при якій кільця відірвуться від води. Знайти видовження пружини  $\Delta l' = l - l_0$ .
8. Дослід повторити тричі при даній температурі води і середнє значення  $\Delta l_{cp}$  записати в таблицю 117.2.
9. За середнім значенням  $\Delta l_{cp}$  та графіком градування пружини знайти силу поверхневого натягу води.
10. За формулою (117.8) визначити коефіцієнт поверхневого натягу води.
11. Поставити посудину з водою на електроплитку і включити її. Воду нагрівати до  $60^\circ \text{C}$ .
12. Пункти 7...11 проробити при різних значеннях температури води (через кожні  $10^\circ \text{C}$ ).
13. Результати всіх вимірювань і обчислень записати в таблицю 117.2.
14. Побудувати графік залежності  $\sigma = f(t^\circ)$  і зробити висновок.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чому за відсутності зовнішніх сил крапля води набуває форму кулі?
2. На що витрачається робота у разі збільшення площі поверхні рідини?
3. Чому робота по збільшенню площі поверхні пропорційна зміні площі поверхні?
4. Що називається коефіцієнтом поверхневого натягу, від чого він залежить і в яких одиницях вимірюється?
5. Коли величина поверхневого натягу рідини дорівнює нулеві?
6. Яка існує залежність між коефіцієнтом поверхневого натягу і температурою?
7. Які речовини називають поверхнево – активними (ПАР)?
8. Вивести формулу для визначення коефіцієнта поверхневого натягу методом відриву двох кілець.

## Лабораторна робота № 118

### ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ

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

**Прилади і обладнання:** експериментальна установка ФПТ 1-8.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

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

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT,$$

де  $k$  – стала Больцмана,  $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

Тоді середнє значення повної енергії частинок при коливальному русі в кристалічних решітках

$$\langle U_0 \rangle = 3kT.$$

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

$$U = \langle U_0 \rangle \cdot N_A = 3N_A kT = 3RT, \quad (118.1)$$

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

Для твердих тіл, внаслідок малого коефіцієнта теплового розширення, теплоємності при постійному тиску і постійному об'ємі практично не відрізняються. Тому, з огляду на (118.1), молярна теплоємність твердого тіла

$$\mu C = \mu C_V = \frac{dU}{dT} = 3R. \quad (118.2)$$

Підставляючи чисельне значення молярної газової сталої, одержимо:

$$\mu C = 25 \text{ Дж/(моль·К)}$$

Це рівність називається законом Дюлонга–Пті і виконується з досить значним наближенням для багатьох речовин при кімнатній температурі. Зі зниженням температури теплоємності усіх твердих тіл зменшуються, наближаючись до нуля при  $T \rightarrow 0$ .

Біля абсолютного нуля молярна теплоємність усіх тіл пропорційна  $T^3$ , і тільки при досить високій, характерній для кожної речовини температурі, починає виконуватися рівність (118.2). Ці особливості теплоємностей твердих тіл при низьких температурах можна пояснити за допомогою квантової теорії теплоємності, створеної Ейнштейном і Дебаєм.

Для експериментального визначення теплоємності досліджуване тіло поміщують у калориметр, що нагрівається електричним струмом. Якщо

температуру калориметра з досліджуваним зразком дуже повільно збільшити на  $\Delta T$ , то енергія електричного струму піде на нагрівання зразка і калориметра:

$$IU\tau = m_0c_0\Delta T + mc\Delta T + \Delta Q, \quad (118.3)$$

де  $I$  і  $U$  – струм і напруга нагрівача;  $\tau$  – час нагрівання;  $m_0$  і  $m$  – маси калориметра і досліджуваного зразка;  $c_0$  і  $c$  – питомі теплоємності калориметра і досліджуваного зразка;  $\Delta Q$  – втрати тепла в теплоізоляцію калориметра й у навколишній простір.

Для виключення з рівняння (118.3) кількості теплоти, яка витрачається на нагрівання калориметра, і втрати теплоти в навколишній простір, необхідно при тій же потужності нагрівача нагріти порожній калориметр (без зразка) від початкової температури  $T_0$  на ту ж різницю температур  $\Delta T$ . Втрати тепла в обох випадках будуть практично однаковими і дуже малими, якщо температура захисного кожуха калориметра в обох випадках постійна і дорівнює кімнатній;

$$IU\tau_0 = m_0c_0\Delta T + \Delta Q_0, \quad (118.4)$$

З рівнянь (118.3) і (118.4) випливає

$$IU(\tau - \tau_0) = mc\Delta T. \quad (118.5)$$

Рівняння (118.5) може бути використане для експериментального визначення питомої теплоємності матеріалу досліджуваного зразка. Змінюючи температуру калориметра, необхідно побудувати графік залежності різниці часу нагрівання від зміни температури досліджуваного зразка :

$(\tau - \tau_0) = f(\Delta T)$ , по кутовому коефіцієнту якого  $K_\alpha = \frac{mc}{IU}$  можна визначити питому теплоємність зразка.

## ОПИС УСТАНОВКИ

Для визначення теплоємності твердих тіл призначена експериментальна установка ФПТ1-8, загальний вигляд якої показаний на рис. 118.1.

Зразки нагріваються в калориметрі, схема якого наведена на рис. 118.2.

Калориметр являє собою латунний корпус з конічним отвором, куди поміщується досліджуваний зразок. На зовнішній поверхні корпуса в спеціальних пазах розміщується нагрівальна спіраль. Зовні корпус калориметра теплоізолюваний шарами азбесту і скловолокна і закритий алюмінієвим кожухом. Калориметр має теплоізолюючий корпус. Досліджувані зразки розташовані в гніздах у блоці робочого елемента 2. Після закінчення експерименту зразок можна виштовхнути з конічного отвору корпуса калориметра за допомогою гвинта. Для видалення нагрітого зразка з калориметра й установки зразка в нагрівач використовується рукоятка, яка розташована в спеціальному гнізді поруч з досліджуваними зразками.



Рисунок 118.1. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-8

- 1 – блок приладів;
- 2 – блок робочого елемента;
- 3 – нагрівач;
- 4 – досліджувані зразки

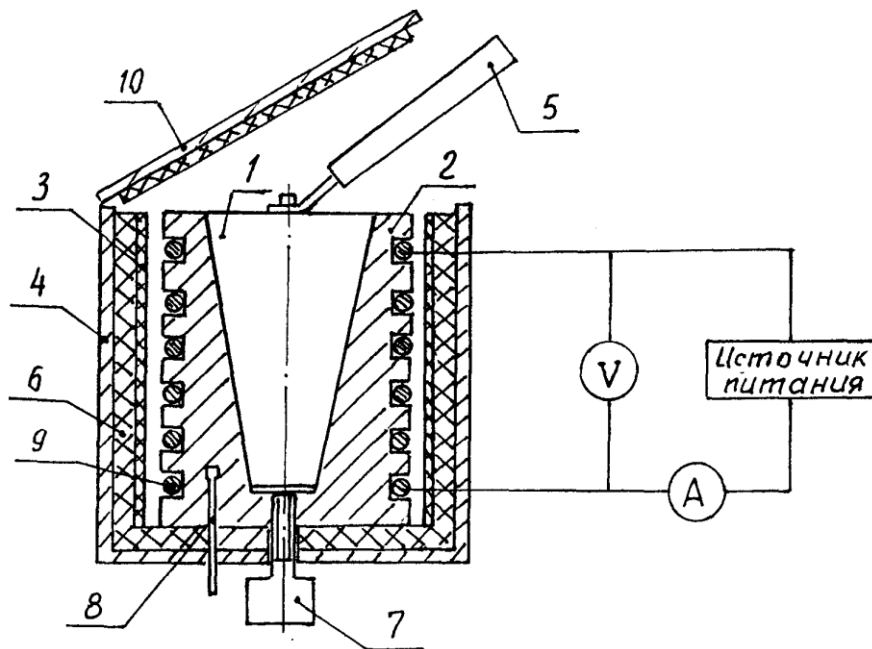


Рисунок 118.2. Схема калориметра

- 1 – зразок;
- 2 – корпус;
- 3 – азбест;
- 4 – кожух;
- 5 – рукоятка;
- 6 – скловолокно;
- 7 – гвинт;
- 8 – датчик температури;
- 9 – нагрівач;
- 10 – кришка

Температура калориметра вимірюється цифровим термометром, датчик якого знаходиться в корпусі калориметра. У блоці приладів 1 розташоване джерело живлення нагрівача, потужність якого встановлюється регулятором «Нагрівання». Напруга і струм у колі нагрівача вимірюється вольтметром і амперметром, розташованими на передній панелі блоку приладів. Час нагрівання калориметра вимірюється секундоміром, розташованим у блоці приладів. Секундомір приводиться в дію при включенні живлення блоку приладів.

Молярні маси матеріалу зразків наведені в таблиці 118.1

Таблиця 118.1

| № п/п | Матеріал зразка | Молярна маса, кг/моль |
|-------|-----------------|-----------------------|
| 1     | Дюраль          | $26,98 \cdot 10^{-3}$ |
| 2     | Латунь          | $63,57 \cdot 10^{-3}$ |
| 3     | Сталь           | $55,85 \cdot 10^{-3}$ |

#### ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Зняти кожух блоку робочого елемента установки і підвісити його на гвинтах задньої панелі. Увімкнути установку тумблером «Мережа».
2. Порожній калориметр щільно закрити кришкою. Увімкнути тумблер «Нагрівання». За допомогою регулятора «Нагрівання» установити необхідну напругу в колі.
3. При температурі калориметра  $t_0 = 25^\circ \text{C}$  почати відлік часу. Зробити 7-10 вимірів часу нагрівання порожнього калориметра з інтервалом  $1^\circ \text{C}$ . Результати занести в таблицю:

| № п/п | U, В | I, А | $\Delta T$ , К | $\tau_0$ , с | $\tau$ , с | $\tau - \tau_0$ , с | c Дж/(кг·К) | $\mu c$ , Дж/(моль·К) |
|-------|------|------|----------------|--------------|------------|---------------------|-------------|-----------------------|
| 1.    |      |      |                |              |            |                     |             |                       |

4. Вимкнути тумблер «Нагрівання», відкрити кришку й довести калориметр до початкової температури  $t_0$ .
5. Обертаючи гвинт вліво, помістити в калориметр один з досліджуваних зразків за вказівкою викладача. Щільно закрити кришку калориметра і почекати 3 хв для того, щоб температури калориметра і зразка зрівнялися.
6. Увімкнути нагрівач калориметра, установивши таку ж напругу в колі, як і при нагріванні порожнього калориметра.
7. Почати відлік часу при тій же початковій температурі  $t_0$ . Зробити 7-10 вимірів часу нагрівання калориметра зі зразком  $t$  через інтервал температури  $1^\circ \text{C}$ . Результати занести в таблицю.

8. Регулятор «Нагрівання» установити в крайнє ліве положення, виключити тумблер «Нагрівання», відкрити кришку калориметра. Для видалення зразка з калориметра гвинт обертати вправо, після чого за допомогою рукоятки вийняти нагрітий зразок.
9. Виключити установку тумблером “Мережа”.
10. Побудувати графік залежності різниці часу нагрівання калориметра зі зразком і порожнім калориметром від зміни температури калориметра  $(\tau - \tau_0) = f(\Delta T)$  і визначити кутовий коефіцієнт  $K_\alpha$ .
11. Використовуючи значення кутового коефіцієнта  $K_\alpha$ , визначити питому теплоємність зразка за формулою  $C = \frac{IU}{m} K_\alpha$ .
12. Використовуючи даної таблиці 118.1., визначити молярну теплоємність зразка.
13. Оцінити похибку результатів вимірювань.

### КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яка величина називається теплоємністю речовини, питомою і молярною теплоємністю? У яких одиницях СІ вони вимірюються?
2. Виведіть формулу для повної внутрішньої енергії твердого тіла.
3. В чому особливості теплоємностей твердих тіл? Виведіть формулу для молярної теплоємності твердого тіла.
4. Запишіть і поясніть закон Дюлонга-Пті.
5. Визначить, виходячи із закону Дюлонга-Пті, питомі теплоємності алюмінію  $_{23}\text{Al}^{27}$  і заліза  $_{26}\text{Fe}^{56}$ .
6. В чому полягає метод електричного нагрівання для визначення теплоємності твердих тіл?
7. Виведіть формулу для експериментального визначення теплоємності.
8. Чому під час експерименту нагрівання порожнього калориметра і калориметра зі зразком необхідно робити при одній і тій же потужності нагрівача?
9. Чим обмежена максимально припустима температура нагрівання калориметра?
10. Перелічіть основні джерела помилок даного методу вимірювань.

## Лабораторна робота № 119

### ВИЗНАЧЕННЯ СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ І ЕФЕКТИВНОГО ДІАМЕТРА МОЛЕКУЛИ ПОВІТРЯ

**Мета роботи** – обчислити довжину вільного пробігу й ефективний діаметр молекули азоту за динамічним коефіцієнтом внутрішнього тертя (в'язкості).

**Прилади і обладнання:** посудина з водою, капіляром і водяним манометром, мірний скляний стаканчик, термометр, барометр.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

За нормальних умов повітря можна розглядати як ідеальний газ: молекули рухаються хаотично, сили взаємодії між ними надзвичайно малі, а розміри молекул малі порівняно з відстанню між ними. За цих умов молекули мають рухатись рівномірно і прямолінійно. Відхилення від такого руху відбуваються під час зіткнення молекул між собою або із стінками посудини.

Відстань, яку проходить молекула між двома послідовними зіткненнями, називається *довжиною вільного пробігу молекули*. При обчисленнях використовують середню довжину вільного пробігу  $\langle \lambda \rangle$ , оскільки довжина вільного пробігу молекули внаслідок хаотичного руху є величиною не постійною. Процес зіткнення характеризують *ефективним діаметром молекули*  $d$ , під яким розуміють мінімальну відстань, на яку наближаються центри двох молекул при зіткненні.

Кінетична теорія газів встановлює зв'язок між коефіцієнтом внутрішнього тертя ідеальних газів  $\eta$ , середньою довжиною вільного пробігу молекул газу  $\langle \lambda \rangle$ , середньою арифметичною швидкістю  $\langle u \rangle$  їх руху та густиною газу у вигляді

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle u \rangle. \quad (119.1)$$

Більш точне виведення співвідношення (119.1) на основі розподілу швидкостей молекул за Максвеллом, дає інше значення коефіцієнта пропорційності:

$$\eta = \frac{1}{2} \rho \langle \lambda \rangle \langle u \rangle. \quad (119.2)$$

Із формули (119.2) дістанемо

$$\langle \lambda \rangle = \frac{2\eta}{\rho \langle u \rangle}. \quad (119.3)$$

Для вимірювання коефіцієнта внутрішнього тертя можна скористатись методом протікання газу через капілярну трубку. Об'єм газу, який протікає через вузьку трубку з круглим внутрішнім перерізом за час  $\tau$ , визначається за формулою Пуазейля

$$V = \frac{1}{8} \frac{\pi \cdot r^4 \Delta P \tau}{\eta l}, \quad (119.4)$$

де  $r$  – радіус капіляра,  $l$  – довжина капіляра,  $\Delta P$  – різниця тисків на кінцях капіляра, що зумовлює протікання газу.

З цієї формули випливає, що об'єм газу, який протікає через трубку, пропорційний четвертій степені радіуса поперечного перерізу капіляра і обернено пропорційний довжині капіляра та в'язкості газу. Формула справедлива тільки для *ламінарних потоків* газу. Ламінарним називають такий потік, при якому частинки газу рухаються шарами без їх перемішування. Швидкості частинок у будь-якому перерізі паралельні між собою.

Із рівняння (109.4) знаходимо співвідношення для визначення коефіцієнта внутрішнього тертя

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \Delta P \tau}{8lV}. \quad (119.5)$$

Для визначення густини газу скористаємось рівнянням Менделєєва-Клапейрона

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

Звідси

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P\mu}{RT}. \quad (119.6)$$

Формула середньої арифметичної швидкості, що обчислена за розподілом Максвелла:

$$\langle u \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}. \quad (119.7)$$

Підставляючи значення для  $\eta$ ,  $\rho$  і  $\langle u \rangle$  з формул (119.5), (119.6) і (119.7) в формулу (119.3), одержимо розрахункову формулу для визначення середньої довжини вільного пробігу молекул повітря (воно на  $\sim 78\%$  складається з молекул азоту)

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\pi r^4 \Delta P \tau \sqrt{2RT}}{8l \cdot P \cdot V \sqrt{2\mu}}, \quad (119.8)$$

де  $T$  – абсолютна температура;  $R$  – універсальна газова стала ( $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ );

$\mu$  – молярна маса повітря ( $\mu = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ );  $P$  – тиск повітря (визначається за показами барометра);  $\tau$  – час протікання повітря через капіляр.

Середня довжина вільного пробігу  $\langle \lambda \rangle$  і ефективний діаметр молекул  $d$  повітря зв'язані співвідношенням

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}, \quad (119.9)$$

де  $n$  – число молекул в одиниці об'єму за даних умов.

Із співвідношення (119.9) можна визначити ефективний діаметр молекул газу при даній температурі, якщо відомі  $\langle \lambda \rangle$  і  $n$ . Число молекул в одиниці об'єму визначають із рівняння стану ідеального газу

$$P = nkT. \quad (119.10)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$  – постійна Больцмана. Із рівнянь (119.9) і (119.10) одержуємо розрахункову формулу для визначення ефективного діаметру молекул азоту

$$d = \sqrt{\frac{kT}{\sqrt{2\pi P \langle \lambda \rangle}}}. \quad (119.10)$$

### ОПИС УСТАНОВКИ

Установка для виконання роботи (рис. 119.1) складається із скляної посудини 1, яка має кран 2. Зверху посудина закрита пробкою 3, в яку поміщена лійка з краном 4 для наливання води в посудину. В пробку вставлена також поліхлорвінілова трубка 5, яка під'єднана одним своїм розгалудженням до одного з кінців капіляра 6, радіус і довжина якого вказані на робочому місці, а другим – до одного із колін U – подібного водяного манометра 7. Другий кінець капіляра сполучений з атмосферою.

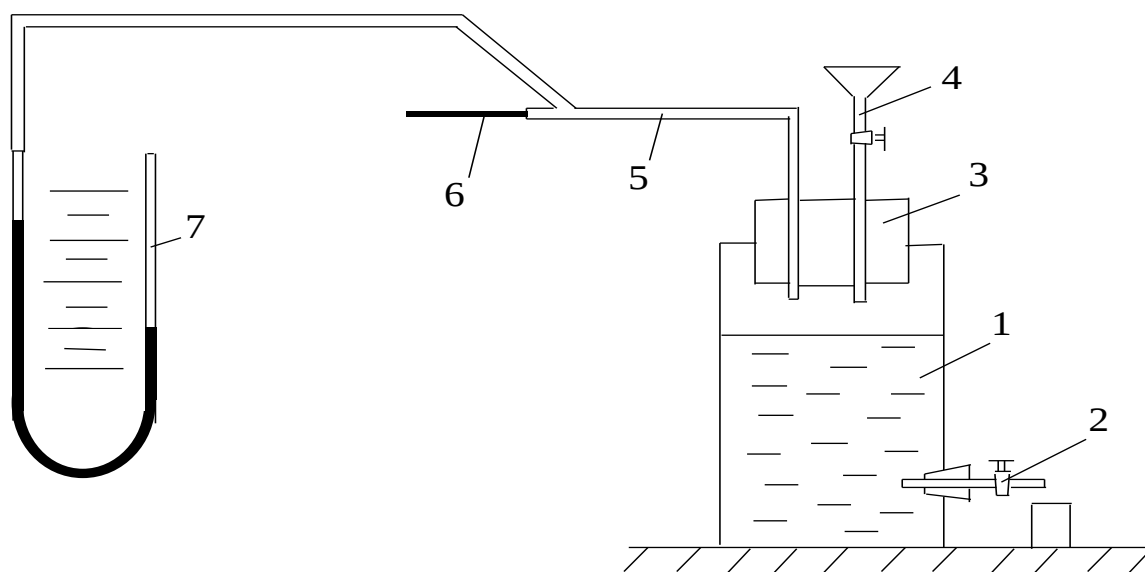


Рисунок 119.1.

Коли відкрити кран 2, вода почне витікати з посудини, а різниця тисків на кінцях капіляра – зростати. Починаючи з моменту припинення зростання різниці тисків на кінцях капіляра, процес протікання повітря через капіляр стає стаціонарним і вода починає витікати краплями. Об'єм газу, який протікає через капіляр рівний об'єму рідини, що витікає з крану 2.

Різниця тисків на кінцях капіляра визначається за формулою

$$\Delta P = \rho g \Delta h, \quad (119.11)$$

де  $\rho$  – густина води ( $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ );  $g$  – прискорення вільного падіння;  $\Delta h$  – різниця рівнів води в колінах манометра.

## ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Відкрити кран 2 і дочекатися, коли вода почне витікати з посудини краплями, підставити мірний стаканчик і заміряти секундоміром час, протягом якого в стаканчик витече  $50 \text{ см}^3$  води.
2. Виливаючи воду із стаканчика, виміри часу повторити ще двічі.
3. Різницю тисків повітря на кінцях капіляра під час витікання води визначити за формулою (119.11).
4. Температуру повітря виміряти кімнатним термометром, атмосферний тиск – барометром.
5. Значення радіуса і довжини капіляра записані на робочому місці.
6. Результати всіх вимірювань записати в таблицю.

| №   | $\tau, \text{с}$ | $\Delta h, \text{м}$ | $\Delta P, \text{Па}$ | $T, \text{К}$ | $P, \text{Па}$ | $V, \text{м}^3$    | $\langle \lambda \rangle, \text{м}$ | $d, \text{м}$ |
|-----|------------------|----------------------|-----------------------|---------------|----------------|--------------------|-------------------------------------|---------------|
| 1   |                  |                      |                       |               |                | $50 \cdot 10^{-6}$ |                                     |               |
| 2   |                  |                      |                       |               |                | $50 \cdot 10^{-6}$ |                                     |               |
| 3   |                  |                      |                       |               |                | $50 \cdot 10^{-6}$ |                                     |               |
| Ср. |                  |                      |                       |               |                |                    |                                     |               |

7. Визначити середню довжину вільного пробігу молекул повітря за формулою (119.8) за середніми значеннями часу протікання газу через капіляр та середнім значенням різниці тисків на кінцях капіляра.
8. За середнім значенням довжини вільного пробігу молекул повітря визначити середнє значення ефективного діаметра молекул азоту за формулою (119.10).
9. Точність вимірювання ефективного діаметра молекул азоту визначити за формулою

$$E = \frac{\Delta d}{d_{\text{табл}}} \cdot 100\% = \frac{|d_{\text{сер}} - d_{\text{табл}}|}{d_{\text{табл}}} \cdot 100\%.$$

### КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Які явища називають явищами переносу? Чому ці явища мають таку назву?
2. Що називається коефіцієнтом в'язкості, який його фізичний зміст?
3. Якою є формула коефіцієнта в'язкості згідно з кінетичною теорією газів?
4. Записати і дати пояснення формули Пуазейля?
5. Що називається довжиною вільного пробігу молекул?
6. Як залежить довжина вільного пробігу молекул від температури?
7. Запишіть формулу для визначення середньої арифметичної швидкості.
8. Виведіть формулу для визначення середньої довжини вільного пробігу молекул.
9. Що називається ефективним діаметром молекул і як він визначається в даній роботі?

## Лабораторна робота № 120

### ВИЗНАЧЕННЯ ВІДНОШЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТЕЙ ПОВІТРЯ ПРИ ПОСТІЙНИХ ТИСКУ І ОБ'ЄМІ РЕЗОНАНСНИМ МЕТОДОМ

**Мета роботи** – вивчення процесу поширення звукової хвилі, вимірювання швидкості звуку в повітрі при різних температурах і визначення відношення теплоємностей  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ .

**Прилади і обладнання:** експериментальна установка ФПТ 1-7.

#### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Пружними хвилями називаються механічні збурення (деформації), що розповсюджуються в пружному середовищі. Нехай уздовж однорідного циліндричного зразка з площею поперечного перерізу  $S$  розповсюджується пружна поздовжня хвиля. Отже, по зразку із швидкістю  $v$  розповсюджується відносна деформація  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$  (рис. 120.1). Виділивши деяку частину зразка, знайдемо густину недеформованого середовища:

$$\rho = \frac{m}{Sl}, \quad (120.1)$$

де  $l$  - довжина виділеної частини зразка.

Стисненню відповідає збільшення густини, отже, густина в області стиснення

$$\rho + \Delta\rho = \frac{m}{S(l - \Delta l)}. \quad (120.2)$$

враховуємо, що площа поперечного перетину  $S$  зразка не змінюється при розповсюдженні поздовжньої хвилі. У формулі (7.2) помножимо чисельник і знаменник на величину  $(l + \Delta l)$ :

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

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

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

Звідси, враховуючи формулу (7.1), маємо

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

або

$$\Delta\rho = \rho\varepsilon. \quad (120.3)$$

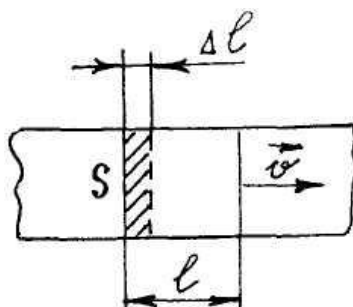


Рисунок 120.1. Схема розповсюдження збурення уздовж однорідного зразка

Розповсюдження збурень є рухом області стиснення із швидкістю  $v$  вздовж зразка. За проміжок часу  $dt$  через поперечний переріз дана область пройде ділянку стиснення завдовжки  $dx = vdt$ . Маса цієї ділянки  $\Delta m = \Delta \rho S dx$  або, враховуючи (120.3),  $\Delta m = \rho \varepsilon S v dt$ .

Маса  $dm$  рухається з швидкістю  $v$  і має імпульс  $v dm = \rho \varepsilon S v^2 dt$ . Ця зміна імпульсу маси  $dm$  (оскільки до проходження збурення ця маса покоїлася) за другим законом Ньютона рівна добутку діючої на неї сили пружності і часу її дії. Сила пружності за законом Гука рівна

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}, \quad (120.4)$$

одержуємо

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

де  $E$  – модуль Юнга.

Отже:

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

звідки

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

і швидкість розповсюдження подовжньої пружної хвилі

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (120.5)$$

Пружна хвиля поширюється в газі, що знаходиться в гладкій прямолінійній трубі з постійним поперечним перерізом. Враховуючи, що на відміну від твердих тіл, гази не чинять опору зсуву, в них можуть виникати тільки поздовжні хвилі, і, отже, швидкість розповсюдження пружної хвилі в газі можна обчислити по формулі (120.5). Визначимо величину  $E$  для газу. Якщо при дії сили  $F$  на деякий об'єм газу тиск в ньому отримає приріст  $\Delta P$  по відношенню до тиску газу  $P$  у незбуреному стані, то аналогічно з (120.4)

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

Якщо вважати зміни тиску  $dP$  і об'єму  $dV$  нескінченно малими, можна записати

$$E = - \frac{dP}{\left(\frac{dV}{V}\right)}, \quad (120.6)$$

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

Нехай в газі розповсюджується звукова хвиля, яка є пружною хвилею малої інтенсивності, здатною викликати відчуття звуку, з частотою від 16 до 20000 Гц. Коливання густини в звуковій хвилі відбуваються так швидко, що теплообмін між шарами газу, які мають різні температури, практично не відбувається. Тому процес розповсюдження звукової хвилі в газі можна вважати адіабатичним і до нього можна застосувати рівняння Пуассона

$$PV^\gamma = \text{const}.$$

Диференціюючи це рівняння, отримаємо

$$V^\gamma dP + \gamma PV^{\gamma-1} dV = 0,$$

звідки

$$\frac{dP}{\left(\frac{dV}{V}\right)} = -\gamma P. \quad (120.7)$$

З (120.6) і (120.7) знайдемо

$$E = \gamma P. \quad (120.8)$$

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

$$P = \frac{\rho RT}{\mu}.$$

Підставимо значення  $P$  в (120.8), і тоді

$$E = \gamma \rho \frac{RT}{\mu}. \quad (120.9)$$

Підставивши співвідношення (120.9) у формулу (120.5), матимемо формулу Лапласа для розрахунку швидкості звуку в газі:

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{\mu}}, \quad (120.10)$$

з якої слідує

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{v^2 \mu}{RT}. \quad (120.11)$$

Таким чином, для визначення відношення теплоємностей газу  $\gamma$  достатньо виміряти його температуру і швидкість розповсюдження звуку  $v$  в цьому газі.

Швидкість звуку при даній температурі може бути визначена резонансним методом. Під час розповсюдження хвилі вздовж закритого каналу, вона багато разів відбивається від торців, і звукові коливання в каналі - результат накладення цих відбитих хвиль. Якщо довжина каналу  $L$  рівна

цілому числу напівхвиль  $L = \frac{n\lambda}{2}$  ( $n$  - деяке ціле число,  $\lambda$  - довжина хвилі), то

хвиля, відбита від торця каналу, повернувшись до його початку і знову відбившись, співпадає по фазі з хвилею, що падає. Такі хвилі підсилюють одна одну, амплітуда коливань при цьому різко зростає, тобто спостерігається резонанс. При звукових коливаннях шари газу, прилеглі до торців каналу, не зсуваються. В цих місцях утворюються вузли зсуву, які повторюються через  $\lambda/2$  по всій довжині каналу. Між вузлами знаходяться максимуми зсуву (пучності).

Швидкість звуку  $v$  пов'язана з частотою коливань  $\nu$  і довжиною хвилі  $\lambda$  співвідношенням, з урахуванням якого умову резонансу можна записати у вигляді

$$2L\nu_0 = n\nu, \quad (120.12)$$

де  $\nu_0$  - резонансна частота.

Залежність (120.12) резонансної частоти від порядкового номера резонансу  $n$  може бути перевірений експериментально. Змінюючи частоту коливань при постійній довжині каналу, необхідно побудувати графік залежності  $\nu_0 = f(n)$ , по кутовому коефіцієнту якого  $K_\alpha = \frac{v}{2L}$  визначають швидкість звуку.

### ОПИС УСТАНОВКИ

Для визначення відношення теплоємностей повітря  $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$  резонансним методом використовується експериментальна установка ФПТ1-7, загальний вид якої показаний на рисунку 120.2.

Робочим елементом установки є скляна труба завдовжки  $L$ , на торцях якої розміщені телефон і мікрофон. Температуру повітря в трубі можна змінювати за допомогою нагрівальної спіралі, навитої на трубу. Потужність нагрівача встановлюється регулятором "Нагрів", що знаходиться на передній панелі блоку приладів 1. Температура повітря в трубі вимірюється напівпровідниковим термометром і реєструється на цифровому індикаторі "Температура". В блоці приладів розташований генератор звукових коливань, підключений до телефону, який збуджує звукові коливання в трубі. Частота коливань, задана звуковим генератором регулюється ручками "Грубо" і "Точно" і реєструється на цифровому індикаторі "Частота". Сигнал мікрофону вимірюється міліамперметром, чутливість якого регулюється ручкою

"Підсилення". Максимальні значення струму, зареєстровані міліамперметром під час плавної зміни частоти коливань, відповідають появі резонансу в каналі. Довжина труби  $L$  вказана на робочому місці.

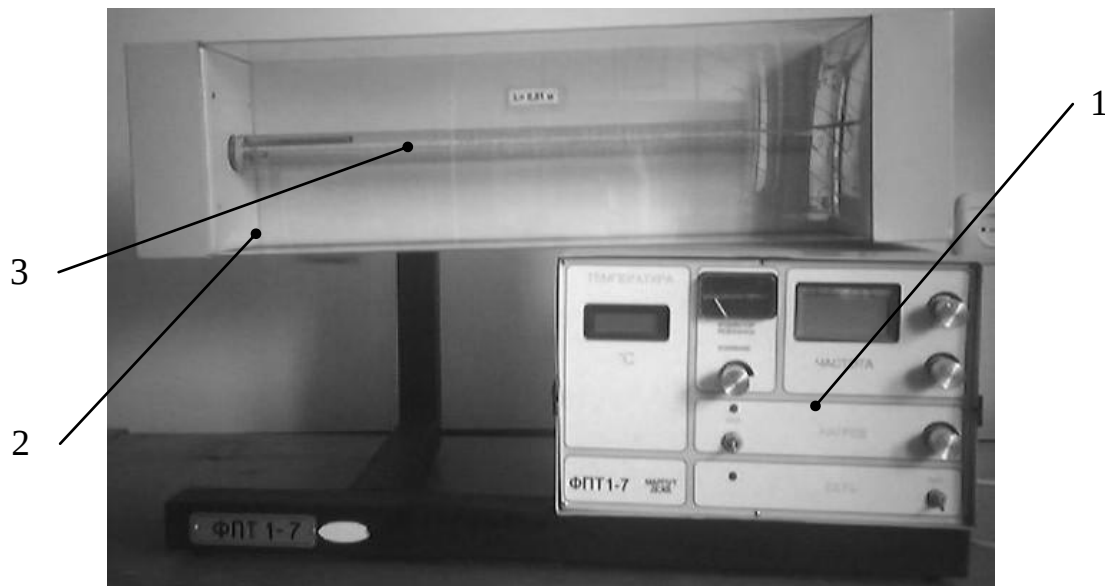


Рисунок 120.2. Загальний вигляд експериментальної установки ФПТ1-7:  
1 - блок приладів; 2 - блок робочого елемента; 3 - труба з нагрівачем

### ВИМІРЮВАННЯ ТА ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ

1. Включити установку тумблером "Мережа".
2. Ручки "Грубо" і "Точно" встановити в крайнє лівє положєння. Ручкою "Підсилення" відрегулювати чутливість міліамперметра (стрілка повинна бути приблизно на третині шкали).
3. Плавно збільшуючи за допомогою ручок "Грубо" і "Точно" частоту коливань, заданих звуковим генератором, визначити частоту 1-го резонансу по найбільшому відхиленню стрілки на шкалі міліамперметра. Результат вимірювань занести в таблицю.
4. Поступово збільшуючи ручкою "Підсилення" чутливість міліамперметра визначити частоту 2, 3 ... 7 резонансів. Проводячи вимірювання при зменшенні частоти, переконатися в повторюваності результатів. Результати вимірювань занести в таблицю:

| Номер резонансу | $t_1 = ^\circ \text{C}$ |           |          | $t_2 = ^\circ \text{C}$ |           |          | $t_3 = ^\circ \text{C}$ |           |          |
|-----------------|-------------------------|-----------|----------|-------------------------|-----------|----------|-------------------------|-----------|----------|
|                 | $\nu$ , Гц              | $v$ , м/с | $\gamma$ | $\nu$ , Гц              | $v$ , м/с | $\gamma$ | $\nu$ , Гц              | $v$ , м/с | $\gamma$ |

5. Включити тумблер "Нагрів" і регулятором температури нагріву досягти температури повітря в трубі  $t_2 = 40...45^\circ \text{C}$ . Після стабілізації температури провести вимірювання по пп. 2-4.
6. Збільшуючи нагрів довести температуру повітря в трубі  $t_3 = 55...60^\circ \text{C}$ . Після стабілізації температури провести вимірювання по пп. 2-4.

7. Регулятор температури нагріву вивести в крайнє ліве положення, вимкнути тумблер "Нагрів", ручки "Посилення", "Грубо" і "Точно" встановити в крайнє ліве положення, після чого вимкнути установку тумблером "Мережа".
8. Побудувати графік залежності резонансної частоти від номера резонансу  $\nu_0 = f(n)$  для кожної з температур і визначити кутові коефіцієнти  $K_\alpha$  для кожного графіка.
9. Для кожного значення температури повітря в трубі, використовуючи отримані кутові коефіцієнти  $K_\alpha$ , визначити швидкість звуку  $\nu$  по формулі  $\nu = 2LK_\alpha$  і відношення теплоємностей  $\gamma$  по формулі (120.11), враховуючи, що молярна маса повітря  $\mu = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль.
10. Оцінити похибку результатів вимірювань.

### КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ

1. Що таке пружна хвиля? Охарактеризуйте процес розповсюдження пружної хвилі в газі.
2. Виведіть формулу швидкості розповсюдження пружної хвилі.
3. Сформулюйте 1-й закон термодинаміки. Запишіть цей закон для ізобарного, ізохорного, ізотермічного і адіабатичного процесів.
4. Виведіть формулу Майєра.
5. Запишіть рівняння Пуассона.
6. Що таке адіабатичний процес? Чому процес розповсюдження звукової хвилі в газі - адіабатичний?
7. Що таке звукова хвиля? Виведіть формулу швидкості звуку в газі.
8. В чому полягає резонансний метод визначення швидкості звуку в газі?
9. Чому при розповсюдженні звуку в закритому каналі можуть утворюватися вузли і пучності? За яких умов вони утворюються?
10. Як змінюється швидкість звуку в повітрі при зміні його температури?

## ЛІТЕРАТУРА

1. Механіка. Молекулярна фізика та термодинаміка: Навч. посібник/ Упоряд. Т.Б.Ткаченко, М.І.Українець, В.В.Калінін, А.І.Рибалка, А.В.Безуглий, А.І.Козарь, С.І.Мельник, В.О.Маслова – Харків; ХТУРЕ, 2000 - 106 с.
2. Фізика. Механіка. Молекулярна фізика. Тестові завдання для студентів: Навчальний посібник. Львів: ЛДУБЖД, 2015. – 274 с.
3. Фізичні основи механіки. Збірник задач, запитань і відповідей: Навчальний посібник: ЛДУ БЖД. – Львів: НТШ. 2013 – 232 с.
4. Фізичний практикум. Частина і. Механіка, молекулярна фізика, електрика та магнетизм. Навчальний посібник / Боровий М.О., Лисов В.І., Козаченко В.В., Цареградська Т.Л., Овсієнко І.В., Жабітенко О.М. – К. , 2017. – 289 с. (*Механіка, молекулярна фізика*).
5. Трофимова Т.И. Курс физики: Учебн. пособие для вузов. – 7-е изд., стер. – М: Высш. шк., 2001. – 542 с.
6. Прямухін В.Є., Колінько С.О. Курс фізики. Механіка. Молекулярна фізика. Навчальний посібник / Під ред. д.т.н., проф. Ващенко В.А. – К.: ТОВ «Маклаут». 2008. – 148 с.