

Українська державна академія залізничного транспорту

Кафедра фізики

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 28

**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ  
ТА СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ  
МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ**

**Роботу виконав:** студент(ка)

\_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по-батькові)

\_\_\_\_\_  
(курс, група)

„\_\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Роботу прийняв:**

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали викладача)

\_\_\_\_\_  
(посада)

**Оцінка:**

за знання теорії \_\_\_\_\_  
(оцінка, бал)

за провед. експер. \_\_\_\_\_  
(оцінка, бал)

підсумкова \_\_\_\_\_  
(оцінка, бал)

\_\_\_\_\_  
(дата і підпис викладача)

## Лабораторна робота № 28

## ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВНУТРІШНЬОГО ТЕРТЯ ТА СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ МОЛЕКУЛ ПОВІТРЯ

**Мета роботи:** вивчення явища в'язкості газів, визначення коефіцієнта в'язкості і обчислення густини повітря, середньої швидкості, середньої довжини вільного пробігу та ефективного діаметру його молекул.

**Прилади і матеріали:** лабораторна установка для визначення коефіцієнта в'язкості газів.

### Теоретичні відомості

Визначення коефіцієнту внутрішнього тертя (в'язкості) рідини або газу наведені в теоретичних відомостях до лабораторної роботи № 11 (стор. 28). Експериментальне визначення коефіцієнту в'язкості газу можливо здійснити за методом Пуазейля. Прибор, що використовується для цього, називається віскозиметром. Він являє собою наповнену водою посудину *A* з краном *K*, через який вода може витікати (рис.1). Посудина з'єднана трубкою з

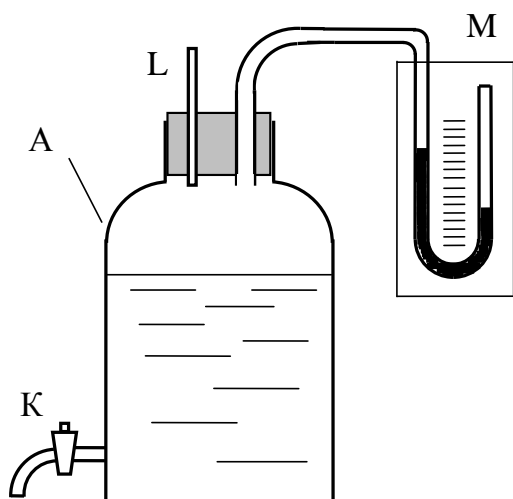


Рис. 1

манометром *M*, який показує різницю між внутрішнім та зовнішнім тисками повітря. Через капілярну трубку *L* молекули повітря можуть проходити всередину посудини.

Якщо відкрити кран *K*, вода почне витікати, тиск усередині посудини буде зменшуватись, а через капіляр *L* – всмоктуватись повітря. Через малу різницю тисків на кінцях капіляра повітря можна вважати нестисли-

вим, а його густину – незмінною. Тоді об'єм повітря, що пройшло за час  $t$  через капіляр, дорівнює об'єму рідини  $V$ , що витекла з посудини за цей час. Зв'язок параметрів віскозиметра з коефіцієнтом в'язкості газу описується у цьому випадку формулою Пуазейля:

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

де  $r$  і  $l$  – відповідно радіус та довжина капіляра,  $\Delta p$  – різниця тисків на його кінцях, яку показує манометр (вона виражається за формулою  $\Delta p = \rho_p g \Delta h$ , де  $\rho_p$  – густина рідини у манометрі,  $\Delta h$  – різниця її рівнів у колінах манометра,  $g$  – прискорення вільного падіння).

Кінетична теорія встановлює формулу для коефіцієнту в'язкості газу:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle v \rangle, \quad (2)$$

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

З формули (2) можна визначити  $\langle \lambda \rangle$ :

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

Таким чином, для визначення середньої довжини вільного пробігу молекул повітря  $\langle \lambda \rangle$  треба знати густину повітря  $\rho$  і середню швидкість його молекул  $\langle v \rangle$ .

Густину газу  $\rho$  можна знайти з рівняння Клапейрона–Менделєєва  $pV = \frac{m}{\mu} RT$ :

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \mu}{RT}, \quad (4)$$

де  $p$  – барометричний тиск,  $\mu$  – молярна маса газу,  $R$  – універ-

сальна газова стала,  $T$  – абсолютна температура.

Середня арифметична швидкість молекул газу визначається за формулою:

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

Обчисливши  $\eta$  за формулою (2),  $\rho$  – за формулою (4) і  $\langle v \rangle$  – за формулою (5), та підставивши одержані значення в формулу (3), можна визначити середню довжину вільного пробігу молекул повітря  $\langle \lambda \rangle$ .

За відомою середньою довжиною вільного пробігу молекул газу

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_{ef}^2 n} \quad (6)$$

можна знайти ефективний діаметр його молекул  $d_{ef}$  з формули:

$$d_{ef} = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2} \pi \langle \lambda \rangle n}}, \quad (7)$$

де  $n = \frac{p}{kT}$  – кількість молекул в одиниці об'єма,

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана,  $p$  і  $T$  – відповідно атмосферний тиск і температура в умовах дослідів.

### Послідовність виконання роботи

1. Накреслити таблицю вимірюваних величин за зразком, наведеним у табл. 28.1.
2. Підставити під кран  $K$  склянку, відкрити кран і почекати поки встановиться стаціонарна течія води з крану (при цьому різниця рівнів в манометрі не буде помітно змінюватися, а вода з крана капатиме рівномірно).

3. Записати різницю рівнів рідини в манометрі  $\Delta h$ , мм. Замість склянки підставити під кран мензурку і включити секундомір.
4. Почекати 1 хвилину ( $t = 60$  с), закрити кран  $K$  і записати об'єм води  $V$ , що витекла з посудини до мензурки ( $\text{м}^3$ ) за час досліду.
5. Перевести різницю рівнів рідини в манометрі  $\Delta h$  (мм) в різницю тисків  $\Delta p = \rho_p g \Delta h$  (Па), де  $\rho_p$  – густина рідини в манометрі,  $g = 9.8 \text{ м/с}^2$  – прискорення вільного падіння (в даній роботі в манометрі використовується вода, тому  $\rho_p = 10^3 \text{ кг/м}^3$ , а  $1 \text{ мм вод.ст.} = 9.8 \text{ Па}$ ).
6. Використовуючи барометр та термометр, визначити атмосферний тиск  $p$  і температуру повітря  $t^\circ\text{C}$  в лабораторії. Занести значення  $p$  (Па) і  $T = t + 273$  (К) у таблицю.
7. Обчислити коефіцієнт в'язкості повітря  $\eta$  за формулою (1). Радіус  $r$  та довжина капіляру  $l$  вказані на установці.
8. Обчислити густину повітря  $\rho$  за формулою (4) та середню арифметичну швидкість його молекул  $\langle v \rangle$  за формулою (5).
9. Обчислити середню довжину вільного пробігу молекул повітря  $\langle \lambda \rangle$  за формулою (3).
10. Обчислити кількість молекул в одиниці об'єма  $n = \frac{p}{kT}$  і за формулою (7) – ефективний діаметр молекул повітря  $d_{\text{ef}}$ .
11. Обчислити відносну та абсолютну похибки визначення  $\eta$  і  $\langle \lambda \rangle$ .
12. Проаналізувати результати і зробити висновки.
13. Підготувати відповіді на контрольні питання.

### Контрольні питання

1. Сформулюйте основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини.

2. Що називається термодинамічною системою? Наведіть приклади таких систем.
3. Навести приклади процесів, які приводять термодинамічну систему у рівноважний стан.
4. Запишіть рівняння для сили внутрішнього тертя у рідині та газі. Дайте означення коефіцієнта в'язкості. Якій він має фізичний зміст?
5. Поясніть молекулярно-кінетичний механізм в'язкості газів.
6. У чому полягає різниця механізмів внутрішнього тертя рідини та газу? Як залежать в'язкість рідини та в'язкість газу від температури?
7. У чому полягає метод експериментального визначення коефіцієнта в'язкості газів, використаний в даній роботі?
8. Виведіть формулу (2) для коефіцієнта в'язкості газів. Поясніть зміст величин, що входять у цю формулу.
9. Виведіть формулу (6) середньої довжини вільного пробігу молекул ідеального газу  $\langle \lambda \rangle$ .
10. Запишіть формулу середньої арифметичної швидкості молекул ідеального газу  $\langle v \rangle$ . Як вона залежить від температури?

### Звіт за виконану роботу

1. Робочі формули:

$$\eta = \frac{\pi r^4 \Delta p t}{8 V l} \text{ – коефіцієнта в'язкості газів;}$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \mu}{RT} \text{ – густина повітря;}$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \text{ – середня арифметична швидкість молекул повітря;}$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle} \text{ – середня довжина вільного пробігу}$$

молекул повітря;

$$n = \frac{p}{kT} - \text{кількість молекул в одиниці об'єма};$$

$$d_{ef} = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2} \pi \langle \lambda \rangle n}} - \text{ефективний діаметр молекули.}$$

1.1. Величини, що вимірюються:

$$\begin{aligned} \Delta h - \text{різниця рівнів рідини у манометрі,} & \quad [\Delta h] = \text{мм}, \\ & \quad \Delta(\Delta h) = 1 \text{ мм}; \\ t - \text{час витікання води з посудини,} & \quad [t] = \text{с}, \quad \Delta t = 1 \text{ с}; \\ T - \text{температура повітря в лабораторії,} & \quad [T] = \text{К}, \quad \Delta T = 1 \text{ К}; \\ V - \text{об'єм води, що витекла з посудини,} & \quad [V] = \text{м}^3, \\ & \quad \Delta V = 10^{-6} \text{ м}^3. \end{aligned}$$

1.2. Табличні величини:

$$\begin{aligned} \mu = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} - \text{молярна маса повітря,} & \\ & \quad \Delta M = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}; \\ R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} - \text{універсальна газова стала,} & \\ & \quad \Delta R = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}; \\ k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} - \text{стала Больцмана,} & \\ & \quad \Delta k = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/К}. \end{aligned}$$

1.3. Величини, що обчислюються:

$$\begin{aligned} \Delta p = 9800 \cdot \Delta h - \text{різниця тисків на кінцях капіляра,} & \quad [\Delta p] = \text{Па}; \\ \eta - \text{коефіцієнт в'язкості газів,} & \quad [\eta] = \text{Па} \cdot \text{с}; \\ \rho - \text{густина повітря,} & \quad [\rho] = \text{кг/м}^3; \\ \langle v \rangle - \text{середня арифметична швидкість} & \\ \text{молекул повітря,} & \quad [v] = \text{м/с}; \end{aligned}$$

$\langle \lambda \rangle$  – середня довжина вільного пробігу

молекул повітря,

$$[\lambda] = \text{м};$$

$n$  – кількість молекул в одиниці об'єма,  $[n] = \text{м}^{-3}$ ;

$d_{ef}$  – ефективний діаметр молекули,  $[d_{ef}] = \text{м}$ .

## 2. Результати експерименту:

Таблиця 28.1

$r$	$\Delta r$	$l$	$\Delta l$	$V$	$\Delta V$	$\Delta h$	$\Delta(\Delta h)$	$T$	$\Delta T$	$p$
м		м		м <sup>3</sup>		мм		К		Па

Результати експерименту підтверджую

(дата і підпис викладача)

## 3. Обробка результатів експерименту:

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

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p \mu}{RT} = \quad ;$$

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} = \quad ;$$

$$\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle v \rangle} = \quad ;$$

$$n = \frac{p}{kT} = \quad ;$$

$$d_{ef} = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2} \pi \langle \lambda \rangle n}} = \quad .$$



Визначення відносної та абсолютної похибок:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta\eta}{\eta} = 4 \cdot \frac{\Delta r}{r} + \frac{\Delta(\Delta h)}{\Delta h} + \frac{\Delta t}{t} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta V}{V} = \quad ;$$

$$\Delta\eta = \varepsilon_1 \cdot \eta = \quad ;$$

$$\varepsilon_{01} = \varepsilon_1 \cdot 100\% = \quad \%.$$

---

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta\lambda}{\langle\lambda\rangle} = \varepsilon_1 + \frac{\Delta h}{h} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta M}{M} \right) = \quad ;$$

$$\Delta\lambda = \varepsilon_2 \cdot \langle\lambda\rangle = \quad ;$$

$$\varepsilon_{02} = \varepsilon_2 \cdot 100\% = \quad \%.$$

4. Висновки: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_