

## Розділ 4

# ЯВИЩА ПЕРЕНЕСЕННЯ

У термодинамічно нерівноважних системах виникають особливі необоротні процеси, які називаються процесами перенесення. У результаті таких процесів відбувається просторове перенесення імпульсу, енергії, маси. До явищ перенесення належать: внутрішнє тертя (перенесення імпульсу), теплопровідність (перенесення енергії) і дифузія (перенесення маси).

### § 4.1. Середня кількість зіткнень і середня довжина вільного пробігу молекул

Молекули газу, перебуваючи у стані хаотичного теплового руху, безперервно стикаються одна з одною. Зіткненням молекул називається взаємодія між молекулами, внаслідок якого молекули змінюють напрямок свого руху.

Під час руху молекула стикатиметься з усіма молекулами газу, центри яких віддалені від траєкторії руху її центра на відстанях, що менші або дорівнюють  $d$  (рис. 4.1).

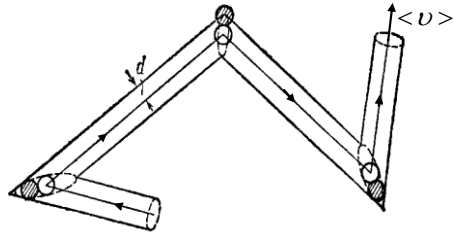


Рис. 4.1

За одиницю часу молекула зіткнеться з усіма молекулами, центри яких лежать у середині циліндра завдовжки  $\langle v \rangle$  і радіусом основи  $d$ . Якщо  $n$  – концентрація молекул, то середня кількість  $\langle z \rangle$  зіткнень молекули за одиницю часу дорівнюватиме

$$\langle z \rangle = \pi d^2 \langle v \rangle n.$$

## Явища перенесення

Якщо врахувати рух інших молекул, то в цю формулу увійде відносна швидкість молекул:  $\langle v_{\text{с.}} \rangle = \sqrt{2} \langle v \rangle$ .

Отже, середня кількість зіткнень за одиницю часу:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle = 16 r_0^2 n \sqrt{\frac{\pi RT}{\mu}},$$

де  $r_0$  – радіус молекули.

Припустимо, що між двома послідовними зіткненнями молекули рухаються прямолінійно та рівномірно і проходять при цьому деякі відстані  $\ell$ , що називаються *довжиною вільного пробігу*. Ці відстані можуть бути різними. Тому введемо поняття про **середню довжину вільного пробігу**  $\langle \ell \rangle$  – середню відстань, яку молекула проходить без зіткнення, тобто

$$\langle \ell \rangle = \frac{\ell_1 + \ell_2 + \ell_3 + \dots + \ell_m}{m},$$

де  $m$  – кількість зіткнень.

Середній шлях, який проходить молекула за одиницю часу, чисельно дорівнює середній арифметичній швидкості  $\langle v \rangle$ , і якщо за одиницю часу молекула стикається з іншими молекулами  $\langle z \rangle$  разів, то середня довжина вільного пробігу буде:

$$\langle \ell \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n} = \frac{1}{4 \sqrt{2} \pi r_0^2 n}.$$

$$\text{Оскільки } p = nkT, \text{ то } \langle \ell \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p}.$$

## § 4.2. Внутрішнє тертя (в'язкість)

Явище внутрішнього тертя пов'язане з виникненням сил тертя між

## Явища перенесення

шарами газу або рідини, що переміщуються паралельно один до одного з різними за величиною швидкостями. З боку шару, що рухається швидше, на шар, який рухається повільніше, діє прискорювальна сила. І навпаки, шар, що повільно рухається, гальмує шари газу, які рухаються швидше. Сили тертя, які при цьому виникають, напрямлені протилежно вздовж дотичної до поверхні зіткнення шарів.

З погляду молекулярно-кінетичної теорії газів причиною внутрішнього тертя є накладання впорядкованого руху шарів газу з різними швидкостями на хаотичний тепловий рух молекул, інтенсивність якого залежить від температури. Завдяки тепловому руху молекули переходять з шару, що рухається з впорядкованою швидкістю  $\vec{u}_2$ , у шар, який рухається зі швидкістю  $\vec{u}_1$ . При цьому молекули переносять імпульс  $m\vec{u}$  свого впорядкованого руху.

Розглянемо плоску поверхню  $S$ , паралельну до швидкості течії газу і перпендикулярну до осі

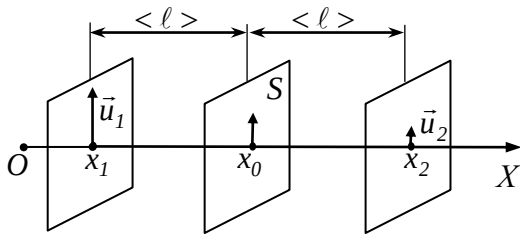


Рис.4.2

газу і перпендикулярну до осі  $OX$  (рис. 4.2). Нехай  $\vec{u}_1 > \vec{u}_2$ . Завдяки обміну молекулами між обома шарами газу (обмін відбувається завдяки тепловим рухам) ця різниця зменшується.

Величину зміни швидкості течії шарів на одиницю віддалі під час переходу від шару рідини до іншого шару в напрямку  $OX$ , перпендикулярному до напрямку руху шарів, визначає градієнт швидкості:

$$u_1 - u_2 = -2 \langle \ell \rangle \frac{du}{dx},$$

де

## Явища перенесення

$$\frac{du}{dx} = \lim_{x_1 \rightarrow x_2} \frac{u_1 - u_2}{x_1 - x_2}.$$

Знак “–” показує, що зростанню  $x$  відповідає спад  $u$ .

Сила внутрішнього тертя між шарами напрямлена протилежно до напрямку швидкості швидшого шару і становить

$$F = \eta \left| \frac{du}{dx} \right| S.$$

Це рівняння називається рівнянням внутрішнього тертя, або **законом Ньютона**.

*Сила внутрішнього тертя, що виникає у площині дотику двох шарів газу (рідини), що переміщаються один відносно одного, пропорційна до площі їх дотику  $S$  і градієнта швидкості  $\frac{du}{dx}$ .*

Коефіцієнт пропорційності  $\eta$  називається коефіцієнтом внутрішнього тертя, або динамічною в'язкістю:

$$\eta = \frac{1}{3} < \ell > < v > \rho, \quad [\eta] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{с}} = 1 \text{ Па} \cdot \text{с},$$

де  $< v >$  – середня арифметична швидкість теплового руху молекул;  $\rho$  – густина газу (рідини).

Коефіцієнт в'язкості числово дорівнює силі внутрішнього тертя, що діє на  $1 \text{ м}^2$  поверхні дотику шарів газу, що рухаються паралельно за градієнта швидкості  $1 \text{ с}^{-1}$ .

Поряд з динамічною в'язкістю використовується під час розрахунків також *кінематична в'язкість*  $\nu$ :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Розглянемо деякі методи визначення коефіцієнта в'язкості  $\eta$  рідини.

• **метод Стокса**

Метод Стокса ґрунтується на вимірюванні швидкості невеликих сферичних тіл, що рухаються в рідині. Під час руху в рідині тверде тіло покривається тонким нерухомим щодо тіла шаром рідини і сили внутрішнього тертя виникають між шарами рідини, а не між твердим тілом і рідиною. Отже, сила внутрішнього тертя не залежить від матеріалу твердого тіла, яке рухається у рідині, а залежить тільки від форми тіла і властивостей рідини.

Під час падіння тіла у в'язкій нерухомій рідині на тіло діють (рис. 4.3):

- сила тяжіння  $m\vec{g}$ , напрямлена вертикально вниз;
- виштовхувальна сила (сила Архімеда)  $\vec{F}_A$ , напрямлена вертикально вгору;
- сила тертя  $\vec{F}_T$ , напрямлена вертикально вгору.

Якщо тіло має форму кульки радіусом  $r$ , густиною тіла  $\rho_T$ , густиною рідини  $\rho_P$ , то

$$mg = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_T g; F_A = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_P g.$$

Сила тертя пропорційна до швидкості руху кульки  $v$  і визначається за законом Стокса:

$$F_T = 6\pi \eta r v.$$

На початковій ділянці рух кульки є прискорений, але із

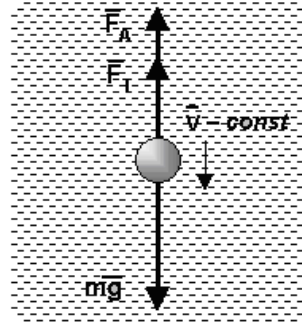


Рис. 4.3

## Явища перенесення

збільшенням швидкості зростає сила тертя і рівнодійна сил, що діють на кульку, дорівнює нулю, і кулька рухається рівномірно. Тому

$$mg = F_A + F_T$$

або

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_T g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_P g + 6\pi \eta r v.$$

З отриманого виразу визначимо коефіцієнт в'язкості:

$$\eta = \frac{2r^2(\rho_T - \rho_P)g}{9v}.$$

### • метод Пуазейля

Для визначення коефіцієнта в'язкості рідини використовують формулу Пуазейля для ламінарної течії по трубках (капілярах):

$$V = \frac{\pi \Delta p r^4 t}{8\eta L},$$

де  $L$  – довжина капіляра;  $r$  – радіус капіляра;  $\Delta p$  – різниця тисків на кінцях капіляра,  $V$  – об'єм рідини, яка витекла через капіляр за час  $t$ ;  $\eta$  – коефіцієнт в'язкості рідини. За відомих  $V$ ,  $r$ ,  $L$ ,  $\Delta p$  можна визначити  $\eta$ .

Однак значно зручніше користуватись формулою Пуазейля для визначення коефіцієнта в'язкості. Візьмемо дві рідини, коефіцієнт в'язкості однієї з яких відомий (позначимо його  $\eta_1$ ), а іншої – невідомий  $\eta_2$ , і виміряємо час витікання однакового об'єму рідин через один і той самий капіляр –  $t_1$  і  $t_2$ , відповідно.

Записавши формулу Пуазейля для кожної з рідин і поділивши один вираз на другий, отримаємо

## Явища перенесення

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{t_2 \Delta p_2}{t_1 \Delta p_1}.$$

Оскільки рідина витікає під дією сили тяжіння, то  $\frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$ .

Вираз для коефіцієнта в'язкості набуде такого вигляду:

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1}.$$

Отже, вимірявши час витікання рідин, а також використавши відомі значення  $\rho_1$  та  $\eta_1$  однієї з них, визначимо коефіцієнт в'язкості іншої.

### § 4.3. Теплопровідність

Теплопровідність є тоді, коли існує різниця температур, яка викликана будь-якими зовнішніми причинами. *Виникнення потоку тепла у газі називається **теплопровідністю***. Молекули газу у різних місцях його об'єму мають різні середні кінетичні енергії. Тому за хаотичного теплового руху молекул відбувається перенесення енергії. Молекули, що потрапили з нагрітих частин газу в холодніші частини, віддають надлишок своєї енергії навколишнім частинам. І навпаки, молекули, що повільно рухаються, потрапляючи з холодних частин в тепліші, збільшують свою енергію за рахунок зіткнень з молекулами, що мають більші швидкості.

Кількість теплоти  $Q_t$ , яка переноситься через поверхню  $S$ , перпендикулярна до напрямку  $OX$ , в якому зменшується температура:

$$Q_t = -\lambda \frac{dT}{dx} St.$$

Отриманий вираз називається законом ***теплопровідності Фур'є***.

## Явища перенесення

Знак “–” показує, що енергія переноситься у напрямку зменшення температури.

Коефіцієнт  $\lambda$  називається коефіцієнтом теплопровідності:

$$\lambda = \frac{1}{3} \langle v \rangle \ell \rho c_v, [\lambda] = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{мК}},$$

де  $\rho = n m_0$  – густина газу,  $n = \frac{N}{V}$  – концентрація молекул газу.

*Кількість теплоти  $Q_t$ , яка переноситься через поверхню  $S$ , перпендикулярну до напрямку  $OX$ , в якому зменшується температура, пропорційна до розміру цієї поверхні, проміжку часу  $t$  перенесення і градієнта температури  $\frac{dT}{dx}$ .*

Коефіцієнт теплопровідності числово дорівнює кількості теплоти, що переноситься через поверхню в  $1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$  за градієнта температури  $-1 \frac{\text{К}}{\text{м}}$ .

## § 4.4. Дифузія

Явище самовільного взаємопроникнення і перемішування частинок двох газів, рідин чи навіть твердих тіл, які дотикаються, називають дифузією. Дифузія призводить до обміну мас частинок, які дотикаються, і виникає та продовжується, поки існує градієнт густини. Явище дифузії описується **законом Фіка**:

$$M_t = -D_c \frac{d\rho}{dx} S t,$$

де  $D_c = \frac{1}{3} \langle v \rangle \ell$ ,  $[D_c] = 1 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ .

*Маса газу  $M$ , що переноситься завдяки дифузії через поверхню  $S$ , яка перпендикулярна до напрямку  $OX$ , в якому зменшується густина,*



## Явища перенесення

пропорційна до розміру цієї поверхні, проміжку часу  $t$ , перенесення і градієнта густини  $\frac{d\rho}{dx}$ .

Коефіцієнт самодифузії  $D_c$  числово дорівнює масі газу, що переноситься через поверхню  $S = 1 \text{ м}^2$  за  $1 \text{ с}$  за градієнта густини,  $\left| \frac{d\rho}{dx} \right| = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$

## Лабораторна робота № 23

# ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ ПОВІТРЯ ТА СЕРЕДНЬОЇ ДОВЖИНИ ВІЛЬНОГО ПРОБІГУ ЙОГО МОЛЕКУЛ

**Мета роботи** – визначити коефіцієнт в'язкості повітря і середню довжину вільного пробігу молекул повітря.

**Прилади і матеріали:** 1) манометр; 2) секундомір; 3) термометр; 4) барометр; 5) посудина з водою; 6) капіляр; 7) мензурка.

Під час підготовки до виконання роботи використати: § 4.1, § 4.2.

### Опис вимірювального пристрою

Сполучені між собою мікроманометр М-м і посудина з водою П з'єднані з атмосферою тонкою скляною трубкою (капіляром) К.

Якщо відкрити кран Кр, вода з посудини П витікатиме у мензурку М, об'єм повітря у посудині П зростатиме і тиск його стане меншим за атмосферний. Внаслідок цього на кінцях капіляра К виникне певна різниця тисків, яку вимірюють манометром (рис. 1).

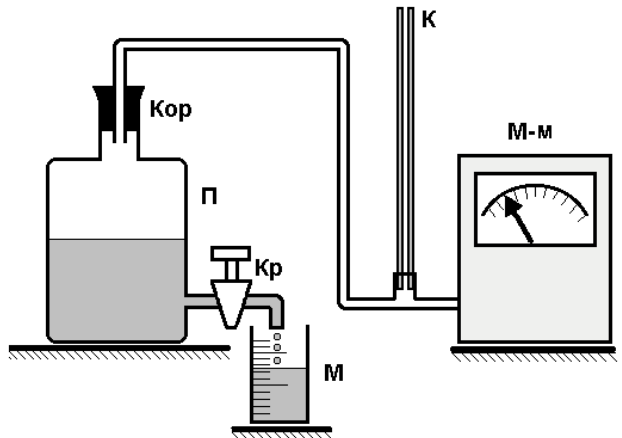


Рис. 1

### **Виведення розрахункових формул**

*Визначення коефіцієнта в'язкості повітря*

Використавши формулу Пуазейля:

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

одержимо

$$\eta = \frac{\pi \Delta p r^4 t}{8 V L}, \quad (2)$$

де  $L$  і  $r$  – відповідно довжина і радіус капіляра;  $\Delta p$  – різниця тисків на кінцях капіляра;  $t$  – час проходження повітря через капіляр;  $V$  – об'єм повітря, що пройшло через капіляр.

*Визначення середньої довжини вільного пробігу молекул повітря*

Коефіцієнт в'язкості повітря пов'язаний з густиною повітря  $\rho$ , середньою довжиною вільного пробігу молекул  $\langle \lambda \rangle$  і середньою арифметичною швидкістю молекул  $\langle v \rangle$  таким співвідношенням:

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

З рівняння Менделєєва–Клапейрона густину повітря можна виразити як

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

де  $\mu$  – молярна маса повітря;  $p$  і  $T$  – атмосферний тиск і температура повітря;  $R$  – універсальна газова стала.

Врахувавши, що

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

та підставивши (4) і (5) в (3), отримаємо:

### Явища перенесення

$$\eta = \frac{1}{3} \frac{\mu p}{RT} \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} <\lambda> = \frac{1}{3} p \sqrt{\frac{8\mu}{\pi RT}} <\lambda>. \quad (6)$$

З (6) матимемо

$$<\lambda> = \frac{3\eta}{p} \sqrt{\frac{\pi RT}{8\mu}}. \quad (7)$$

### Послідовність виконання роботи

1. Щільно закрити корком посудину П.
2. Незначно відкрити кран Кр і після встановлення постійної різниці тисків на кінцях капіляра (стрілка манометра перестане відхилятися) виміряти  $\Delta p$ ; результат записати в табл. 1.

*Шкала манометра, проградуйована в мм вод. ст.*

*(1 мм вод. ст. = 9,8 Па).*

3. Залишаючи положення крана незмінним, увімкнути секундомір і визначити проміжок часу  $t$  витікання  $(30 - 40) \text{ см}^3$  води. Результат записати у табл. 1.
4. Одночасно з вимкненням секундоміра закрити кран Кр, визначити об'єм води у мензурці і записати його у табл. 1. (Об'єм води, що витекла, дорівнює об'єму повітря  $V$ , яке увійшло в посудину через капіляр).
5. Обережно відкрити корок і злити воду з мензурки у посудину П.
6. Дії, зазначені в п.п. 1 – 5, повторити тричі.
7. Визначити температуру повітря  $T$ , атмосферний тиск  $p$  (1 мм рт. ст. = 133 Па) і записати у табл. 2.
8. За формулою (2) розрахувати величину  $\eta$ .
9. Використовуючи визначену в п. 8 величину  $\eta$ , за формулою (7) розрахувати величину  $<\lambda>$ .

## Явища перенесення

10. Визначити абсолютні та відносні похибки величин  $\eta$  і  $\langle \lambda \rangle$ .

Радіус капіляра –  $r = (0,33 \pm 0,005) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

довжина капіляра –  $L = (250 \pm 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

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

універсальна газова стала –  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ .

Таблиця 1

| №<br>з/п | $\Delta p$ ,<br>Па | $\Delta(\Delta p)$ ,<br>Па | $t$ ,<br>с | $\Delta t$ ,<br>с | $V$ ,<br>$10^{-6} \text{ м}^3$ | $\Delta V$ ,<br>$10^{-6} \text{ м}^3$ | $\eta$ ,<br>Па·с | $\delta\eta$ ,<br>% | $\Delta \eta$ ,<br>Па·с |
|----------|--------------------|----------------------------|------------|-------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------|---------------------|-------------------------|
| 1        |                    |                            |            |                   |                                |                                       |                  |                     |                         |
| 2        |                    |                            |            |                   |                                |                                       |                  |                     |                         |
| 3        |                    |                            |            |                   |                                |                                       |                  |                     |                         |
| Сер.     |                    |                            |            |                   |                                |                                       |                  |                     |                         |

Таблиця 2

| $T$ ,<br>К | $\Delta T$ ,<br>К | $p$ ,<br>Па | $\Delta p$ ,<br>Па | $\langle \lambda \rangle$ ,<br>$10^{-8} \text{ м}$ | $\delta \langle \lambda \rangle$ ,<br>% | $\Delta \langle \lambda \rangle$ ,<br>$10^{-8} \text{ м}$ |
|------------|-------------------|-------------|--------------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
|            | 0,5               |             | 50                 |                                                    |                                         |                                                           |

### Контрольні питання

1. Записати формулу для сили внутрішнього тертя у рідинах і газах.
2. Який фізичний зміст коефіцієнта в'язкості?
3. Записати формулу Пуазейля.
4. Що називається середньою довжиною вільного пробігу молекул?

## Лабораторна робота № 24

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ ТА ВЕЛИЧИНИ СИЛИ СТОКСА

**Мета роботи** – виміряти коефіцієнт в'язкості рідини методом Стокса і визначити величину сили Стокса.

**Прилади і матеріали:** 1) довга скляна посудина, наповнена досліджуваною рідиною; 2) свинцеві кульки; 3) секундомір; 4) мікрометр.

Під час підготовки до виконання роботи використати: § 4.2.

#### Опис вимірювального пристрою

Трубка з досліджуваною рідиною має дві позначки: верхню S і нижню F. (Рух кульки між позначками – рівномірний). Проміжок часу  $t$ , протягом якого кулька проходить відстань між позначками, визначають секундоміром; діаметр кульок  $d$  вимірюють мікрометром (рис. 1).

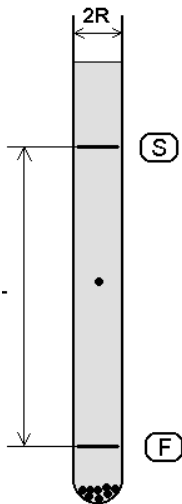


Рис. 1

#### Виведення розрахункових формул

Визначення коефіцієнта в'язкості методом Стокса за формулою

$$\eta = \frac{d^2(\rho_T - \rho_P)g}{18\nu} \quad (1)$$

вимагає падіння кульки в рідині безмежно великого об'єму. Якщо рух кульки відбувається в обмеженому

## Явища перенесення

об'ємі рідини, наприклад, у трубці діаметром  $D$ , що значно перевищує діаметр кульки  $d$ , у формулу (1) вноситься поправка і формула набуває такого вигляду:

$$\eta = \frac{d^2(\rho_T - \rho_P)g}{18\nu \frac{D + 2,4d}{D}}. \quad (2)$$

Оскільки рух кульки на відрізку між позначками S і F рівномірний, то її швидкість

$$v = \frac{L}{t}, \quad (3)$$

де  $t$  – час руху кульки на вказаному відрізку.

Враховуючи (3), формулу (2) і вираз для сили Стокса подамо у вигляді:

$$\eta = \frac{d^2(\rho_T - \rho_P)gt}{18L \frac{D + 2,4d}{D}}; \quad (4)$$

$$F_T = 3\pi\eta d \frac{L}{t}. \quad (5)$$

## Послідовність виконання роботи

### Завдання 1

1. Виміряти мікрометром діаметр кульки  $d$ .
2. Опустити кульку в рідину і за допомогою секундоміра визначити час  $t$  проходження кулькою відстані  $L$  між позначками S і F.
3. Вимірювання, зазначені в п.п. 1, 2, провести ще для трьох кульок; результати вимірювань занести в табл. 1.
4. За формулою (4) обчислити для кожної кульки величину  $\eta$ .
5. Розрахувати абсолютну і відносну похибки.

## Явища перенесення

### Завдання 2

1. Використовуючи визначене середнього значення  $\eta$ , обчислити за формулою (5) величину сили Стокса  $F_T$  для четвертої кульки та розрахувати величину сили Стокса  $F_T^*$  як різницю між силою тяжіння і виштовхувальною силою Архімеда, що діють на цю кульку:

$$F_T^* = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_T - \rho_P) g. \quad (6)$$

2. Оцінити розбіжність результатів у визначенні сили Стокса згідно з формулою

$$\delta F_T = \frac{F_T - F_T^*}{F_T} 100\%. \quad (7)$$

Густина досліджуваної рідини –  $\rho_P = 1,26 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

густина матеріалу кульки –  $\rho_T = 11,3 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

відстань між позначками на трубці –  $L = 650 \text{ мм}$ ;

внутрішній діаметр трубки –  $D = 25 \text{ мм}$ .

Таблиця 1

| №<br>кульки | $d$ ,<br>$10^{-3} \text{ м}$ | $t$ ,<br>$\text{с}$ | $\eta$ ,<br>$\text{Па}\cdot\text{с}$ | $\Delta\eta$ ,<br>$\text{Па}\cdot\text{с}$ | $\delta\eta$ ,<br>% | $F_T$ ,<br>$\text{Н}$ | $F_T^*$ ,<br>$\text{Н}$ |
|-------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1           |                              |                     |                                      |                                            |                     |                       |                         |
| 2           |                              |                     |                                      |                                            |                     |                       |                         |
| 3           |                              |                     |                                      |                                            |                     |                       |                         |
| 4           |                              |                     |                                      |                                            |                     |                       |                         |
| Сер.        |                              |                     |                                      |                                            |                     |                       |                         |



## Явища перенесення

### Контрольні питання

1. Що називається коефіцієнтом в'язкості?
2. Пояснити молекулярно-кінетичний механізм в'язкості у рідинах.
3. Що називається градієнтом швидкості?
4. Записати формулу для сили внутрішнього тертя у рідинах.
5. Записати формулу для сили Стокса.

## Лабораторна робота № 25

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ ЗА ДОПОМОГОЮ ВІСКОЗИМЕТРА

**Мета роботи** – визначити коефіцієнт в'язкості рідини.

**Прилади і матеріали:** 1) капілярний віскозиметр; 2) шприц; 3) секундомір; 4) мікрокомпресор; 5) вода; 6) досліджу-вана рідина.

Під час підготовки до виконання роботи використати: § 4.2.

#### Опис вимірювального пристрою

У цій роботі коефіцієнт в'язкості вимірюється за допомогою

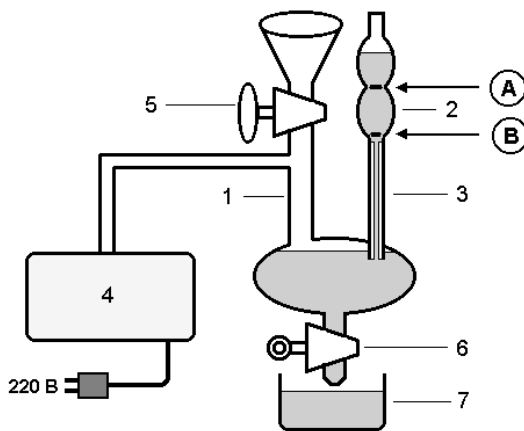


Рис.1

віскозиметра. Це U-подібна трубка з широким лівим коліном (1), праве коліно якої має вимірний резервуар (2) з капіляром (3). На резервуар нанесені дві позначки А і В, які обмежують певний об'єм рідини. Час витікання рідини вимірюють секундоміром. Рівень рі-

дини у резервуарі можна змінити мікрокомпресором (4). Систему від'єднують від атмосфери краном (5), а кран (6) слугує для зливу рідини у посудину (7) (рис. 1).

## Виведення розрахункової формули

У цій роботі використано порівняльний метод визначення коефіцієнта в'язкості рідини. Метод полягає у тому, що через один і той самий капіляр спочатку протікає рідина з відомими коефіцієнтом в'язкості і густиною, а потім – рідина з невідомим коефіцієнтом в'язкості і відомою густиною. Різниця тисків на кінцях капіляра  $\Delta p$  створюється стовпчиком самої рідини заввишки  $h$ . Тому для першої рідини

$$\Delta p_1 = p_1 g h, \quad (1)$$

а для другої

$$\Delta p_2 = p_2 g h. \quad (2)$$

Об'єми обох рідин беруть однаковими. Підставивши (1) і (2) у формулу Пуазейля

$$V = \frac{\pi \Delta p r^4 t}{8 \eta L},$$

отримаємо для цих рідин:

$$\eta_1 = \frac{\pi r^4 g h t_1}{8 V L}; \quad (3)$$

$$\eta_2 = \frac{\pi r^4 g h t_2}{8 V L}, \quad (4)$$

де  $t_1, t_2$  – час витікання першої і другої рідини відповідно.

Поділимо (4) на (3) і визначимо в'язкість досліджуваної рідини через в'язкість відомої рідини:

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1}. \quad (5)$$

### Послідовність виконання роботи

1. У початковому положенні обидва крани закриті (ручки кранів – горизонтальні).
2. Відкрити верхній кран (ручку верхнього крана встановити вертикально).
3. Набрати у шприц 20 мл рідини.
4. Підставити під патрубок для витікання рідини колбу з досліджуваною рідиною.
5. Ввести голку шприца у верхній лівий отвір (кінець голки повинен бути нижче за рівень патрубку для нагнітання повітря).
6. Ввести рідину зі шприца і закрити верхній кран.
7. Увімкнути мікрокомпресор і нагнітати повітря до того часу, поки рідина не увійде у верхній розширений об'єм правого коліна віскозиметра.
8. Вимкнути мікрокомпресор.
9. Відкрити нижній кран.
10. Увімкнути секундомір у момент проходження рівнем рідини позначки А та вимкнути секундомір у момент проходження позначки В. Результати вимірювань записати у табл. 1.
11. Злити рештки рідини у колбу.
12. Привести установку у початкове положення.
13. З кожною досліджуваною рідиною повторити виміри тричі.
14. За формулою (5) обчислити коефіцієнт в'язкості досліджуваної рідини.
15. Обчислити абсолютну і відносну похибки вимірювань.

В'язкість води –  $\eta_1 = 1,0019 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;

густина досліджуваної рідини –  $\rho_2 = 790 \text{ кг/м}^3$ ;

густина води –  $\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

## Явища перенесення

Таблиця 1

| №<br>з/п | $t_1, c$ | $\Delta t_1, c$ | $t_2, c$ | $\Delta t_2, c$ | $\eta_2, Pa \cdot c$ | $\Delta \eta_2, Pa \cdot c$ | $\delta \eta_2, \%$ |
|----------|----------|-----------------|----------|-----------------|----------------------|-----------------------------|---------------------|
| 1        |          |                 |          |                 |                      |                             |                     |
| 2        |          |                 |          |                 |                      |                             |                     |
| 3        |          |                 |          |                 |                      |                             |                     |
| Сер.     |          |                 |          |                 |                      |                             |                     |

### Контрольні питання

1. Записати формулу для сили внутрішнього тертя у рідинах.
2. Що називається коефіцієнтом в'язкості?
3. Пояснити молекулярно-кінетичний механізм в'язкості у рідинах.
4. Що називається градієнтом швидкості?
5. У яких одиницях вимірюється коефіцієнт в'язкості?

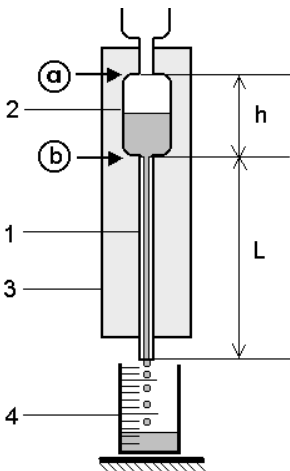
## Лабораторна робота № 26

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ РІДИНИ КАПІЛЯРНИМ МЕТОДОМ

**Мета роботи** – визначити коефіцієнт в'язкості рідини методом витікання з капіляра.

**Прилади і матеріали:** 1) прилад Арреніуса; 2) секундомір; 3) мензурка; 4) досліджувана рідина; 5) лінійка.

Під час підготовки до виконання роботи використати: § 4.2.



#### Опис вимірювального пристрою

Прилад Арреніуса (рис.1) складається з довгого капіляра 1 радіусом  $r$ , що має розширення у вигляді циліндричного резервуара 2. Розширення обмежене позначками а і б. Капіляр з резервуаром знаходиться у термостаті 3 (заповнена водою зовнішня скляна труба). Об'єм рідини, що витікла з капіляра, вимірюється мензуркою 4.

#### Виведення розрахункової формули

**Рис.1** Згідно з формулою Пуазейля, коефіцієнт в'язкості рідини, об'єм якої  $V$  витікає з капіляра за проміжок часу  $t$ , визначається за формулою

## Явища перенесення

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

де  $\Delta p$  – різниця тисків на кінцях капіляра;  $L$  і  $r$  – відповідно довжина і радіус капіляра.

Різниця тисків на кінцях капіляра створюється силою тяжіння, а середня величина  $\Delta p$  за зміни висоти стовпа води від  $(L+h)$  до  $L$  внаслідок витікання рідини визначається за формулою

$$\Delta p = \frac{\rho g (L+h) + \rho g L}{2} = \rho g \left( L + \frac{h}{2} \right), \quad (2)$$

де  $\rho$  – густина рідини;  $h$  – довжина резервуара.

Підставивши (2) в (1), одержимо розрахункову формулу

$$\eta = \frac{\pi \rho g r^4 t}{8VL} \left( L + \frac{h}{2} \right). \quad (3)$$

### Послідовність виконання роботи

1. Виміряти лінійкою довжину резервуара  $h$  (відстань між позначками  $a$  і  $b$ ).
2. Закрити нижній отвір капіляра і налити досліджувану рідину у верхній розширений отвір капіляра до верхньої позначки  $a$ .
3. Відкрити нижній отвір, одночасно увімкнувши секундомір. У момент досягнення рівнем рідини нижньої позначки  $b$  вимкнути секундомір, одночасно закрити нижній отвір.
4. Записати у табл. 1 час витікання рідини і об'єм рідини, що витекла.
5. Дії, зазначені в п.п. 1 – 4, повторити тричі.
6. За формулою (3) розрахувати коефіцієнт в'язкості.
7. Визначити абсолютну і відносну похибки.

Довжина капіляра –  $L = (0,60 \pm 0,0005) \text{ м}$ ;

радіус капіляра –  $r = (1,1 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

## Явища перенесення

густина рідини –  $\rho = (1 \pm 0,0005) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  .

Таблиця 1

| №<br>з/п | $h,$<br>$10^{-3} \text{ м}$ | $\Delta h,$<br>$10^{-3} \text{ м}$ | $t,$<br>$\text{с}$ | $\Delta t,$<br>$\text{с}$ | $V,$<br>$10^{-6} \text{ м}^3$ | $\Delta V,$<br>$10^{-6} \text{ м}^3$ | $\eta,$<br>$\text{Па} \cdot \text{с}$ | $\Delta \eta,$<br>$\text{Па} \cdot \text{с}$ | $\delta \eta,$<br>% |
|----------|-----------------------------|------------------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------|
| 1        |                             |                                    |                    |                           |                               |                                      |                                       |                                              |                     |
| 2        |                             |                                    |                    |                           |                               |                                      |                                       |                                              |                     |
| 3        |                             |                                    |                    |                           |                               |                                      |                                       |                                              |                     |
| Сер.     |                             |                                    |                    |                           |                               |                                      |                                       |                                              |                     |

### Контрольні питання

1. Що називається коефіцієнтом в'язкості?
2. Пояснити молекулярно-кінетичний механізм в'язкості у рідинах.
3. Що називається градієнтом швидкості?
4. Як залежить величина коефіцієнта в'язкості рідини від температури?
5. Записати формулу для сили в'язкості у рідинах.