

## Лабораторна робота № Т1

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА В'ЯЗКОСТІ ПОВІТРЯ КАПІЛЯРНИМ МЕТОДОМ

Мета роботи – вивчення внутрішнього тертя повітря як одного з явищ переносу в газах.

#### Теорія методу

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 спостерігається перенос імпульсу від молекул із шарів потоку, які рухаються швидше, до більш повільних. Наприклад, у випадку протікання рідини або газу прямолінійною циліндричною трубою (капіляром) за малих швидкостей потоку течія є ламінарною, тобто потік газу рухається окремими шарами, які переміщуються один відносно одного, не переміщуючись. 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 в разі зіткнення з іншими молекулами обмінюються імпульсами напрямленого руху. У випадку переходу молекули із шару з більшою швидкістю напрямленого руху в шар з меншою швидкістю ці молекули переносять в інший шар свій імпульс напрямленого руху, а у "більш швидкий" шар переходять молекули з меншим імпульсом. У результаті перший шар гальмується, а другий прискорюється. Дослід показує, що імпульс  $dP$ , що передається від шару до шару через поверхню  $S$ , пропорційний градієнту швидкості  $dV/dr$ , площі  $S$  та часу переносу  $dt$ :

$$dP = -\eta S (dV/dr) dt$$

У результаті між шарами виникає сила внутрішнього тертя:

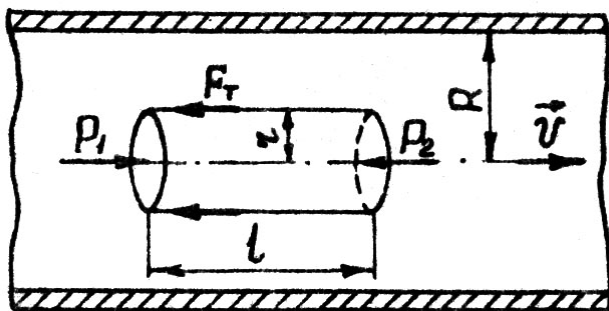
$$F_T = \left| \frac{dP}{dt} \right| = \eta \left| \frac{dV}{dr} \right| S, \quad (1.1)$$

де  $\eta$  - коефіцієнт в'язкості.

Для ідеального газу:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle V_T \rangle,$$

де  $\rho$  – густина газу;  $\langle \lambda \rangle$  - середня довжина вільного пробігу молекул;  $\langle V_T \rangle$  – середня швидкість теплового руху молекул,  $V_T = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ ;  $R$  – універсальна газова стала;  $\mu$  – молекулярна маса газу.



Виділимо в капілярі уявний циліндричний об'єм газу з радіусом  $r$  і довжиною  $l$ , як показано на рис. 1.1. Позначимо тиски на його торцях через  $P_1$  і  $P_2$ . При сталій течії сила тиску на циліндр  $F = (P_1 - P_2)\pi r^2$  зрівноважується силою внутрішнього тертя  $F_T$ , що діє на бічну поверхню циліндра з боку зовнішніх шарів газу:

Рис. 1.1

$$F - F_T = 0 \quad (1.2)$$

Сила внутрішнього тертя визначається за формулою Ньютона (1.1). Враховуючи, що  $S = 2\pi rl$ , а також, що швидкість  $V(r)$  зменшується при віддаленні від осі труби, тобто  $\frac{dV}{dr} < 0$ , можна записати:

$$F_T = -\eta \frac{dV}{dr} 2\pi rl \quad (1.3)$$

У цьому випадку умова стаціонарності (1.2) запишеться у вигляді:

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 + \eta \frac{dV}{dr} 2\pi rl = 0 \quad (1.4)$$

Інтегруючи цю рівність, отримаємо:

$$V(r) = -\frac{P_1 - P_2}{4\eta l} r^2 + C$$

де  $C$  – стала інтегрування, яка визначається граничними умовами задачі. При  $r = R$  швидкість газу повинна перетворитися на нуль, оскільки сила внутрішнього тертя об стінку капіляра гальмує прилеглий до неї шар газу.

Тоді

$$V(r) = \frac{P_1 - P_2}{4\eta l} (R^2 - r^2). \quad (1.5)$$

Підрахуємо об'ємну витрату газу  $Q$ , тобто об'єм, що протікає за одиницю часу через поперечний перерізі труби. Через кільцеву площадку з внутрішнім радіусом  $r$  і зовнішнім  $r + dr$  щосекунди протікає об'єм газу  $dQ = 2\pi r dr V(r)$ .

Тоді

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

або

$$Q = \pi \frac{P_1 - P_2}{8\eta l} R^4. \quad (1.6)$$

Формулу Пуазейля (1.6) можна використати для експериментального визначення коефіцієнта в'язкості газу, її було отримано в припущенні ламінарної течії газу або рідини. Однак із збільшенням швидкості потоку рух стає турбулентним і шари перемішуються. У процесі 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:

$$Re = \frac{\langle V \rangle R \rho}{\eta}, \quad (1.7)$$

де  $\langle V \rangle$  – середня швидкість потоку;  $\rho$  – густина рідини або газу.

У гладких циліндричних каналах перехід від ламінарної течії до турбулентної відбувається при  $Re \approx 1000$ . Тому при використанні формули Пуазейля необхідно забезпечити виконання умови  $Re < 1000$ . Крім того, експеримент необхідно ставити таким чином, щоб стисненням газу можна було б знехтувати. Це можливо у тому випадку, коли перепад тисків вздовж капіляра значно менший за самий тиск. У згаданій установці тиск газу дещо більший від атмосферного (103 см.вод.ст.), а перепад тисків становить  $\sim 10$  см.вод.ст.; тобто приблизно 1% атмосферного.

Формула (1.6) вірна для ділянки труби, в якій встановилась стаціонарна течія з квадратичним законом розподілу швидкостей (1.5) вздовж перерізу труби. 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;  $l$  – довжина капіляру.

### Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта в'язкості повітря використовується експериментальна установка ФПТ 1-1, загальний вигляд якої зображено на рис.1.2.

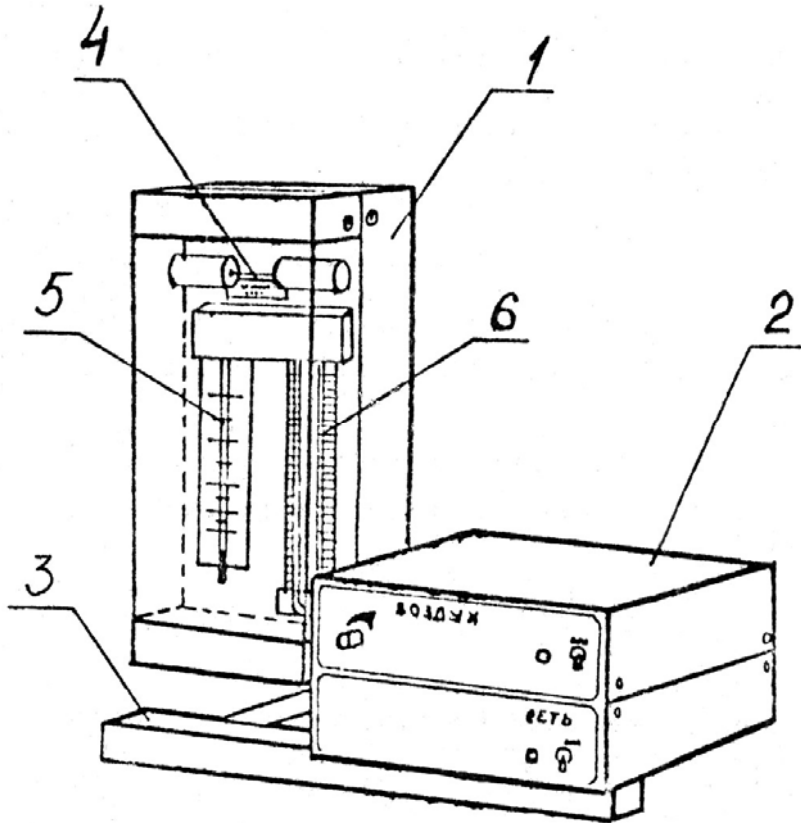


Рис. 1.2

Повітря у капіляр (4) нагнітається мікрокомпресором, розміщеним у блоці приладів (2). Об'ємна витрата повітря вимірюється реометром (5), а потрібне її значення встановлюється регулятором "ВОЗДУХ", який знаходиться на передній панелі блока приладів. Для вимірювання різниці тисків повітря на кінцях капіляра призначений U-подібний водяний манометр (6). Геометричні розміри капіляра – радіус  $R$  та довжина  $l$  – вказано на робочому місці. Крім уже згаданих, позиції на рис.1.2 означають: 1 - блок робочого елемента; 3 - стаяк.

### Порядок виконання роботи

1. Увімкнута установку тумблером "СЕТЬ".
2. За допомогою регулятора "ВОЗДУХ" встановити за показами реометра обране значення об'ємної витрати повітря  $Q$ .
3. Виміряти різницю тисків  $\Delta P$  у колінах манометра. Значення  $Q$  і  $\Delta P$  занести до табл. 1.1.
4. Повторити виміри за пп. 2-3 для 5 значень об'ємної витрати повітря.
5. Встановити регулятор витрати повітря на мінімум, після чого вимкнути установку тумблером "СЕТЬ".

Таблиця 1.1

Номер виміру	$Q, \text{ м}^2/\text{с}$	$\Delta P, \text{ Па}$	$\eta, \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с})$

### Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного режиму визначити за формулою Пуазейля коефіцієнт в'язкості повітря:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8 Q l}.$$

Знайти середнє значення коефіцієнта в'язкості.

2. За формулою  $V_T = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$ , обчислити середню швидкість теплового руху молекул повітря, враховуючи, що молярна маса повітря  $\mu = 29 \text{ кг/кмоль}$ , а універсальна газова стала  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$ .

3. За формулою  $\langle \lambda \rangle = \frac{3\eta}{\rho \langle V_T \rangle}$ , обчислити середню довжину вільного пробігу молекул. При цьому густину повітря знайти з табл. Д.1 для відомих значень температури і тиску в лабораторії під час виконання експерименту.

4. Оцінити похибку результатів вимірювань.

### 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. Поясніть фізичний зміст коефіцієнта в'язкості. В яких одиницях вимірюється ця величина (СИ)?
5. Запишіть формулу для коефіцієнта в'язкості ідеального газу.
6. Яка величина зветься середньою швидкістю теплового руху молекул ідеального газу? Від яких фізичних величин вона залежить?
7. Яка величина зветься 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 вздовж радіусу каналу при ламінарній течії?
11. Як оцінити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекули газу, використовуючи явище внутрішнього тертя у газах?
12. Чому при будівництві магістральних газопроводів використовують труби великого діаметра, а не збільшують тиск газу, який транспортується?

Таблиця Д.1

Залежність густини  $\rho$  повітря від тиску  $P$  і температури  $t$

$\begin{matrix} P, \text{кПа} \\ t, \text{C} \end{matrix}$	96	97	90	99	.100	101	101,3	102	103
14	1,165	1,177	1,189	1,201	1,213	1,225	1,229	1,238	1,250
16	1,157	1,169	1,181	1,193	1,205	1,217	1,221	1,229	1,241
18	1,149	1,161	1,173	1,185	1,200	1,209	1,212	1,221	1,232
20	1,141	1,153	1,165	1,177	1,188	1,200	1,204	1,212	1,224
22	1,133	1,145	1,157	1,169	1,180	1,192	1,196	1,204	1,216
24	1,126	1,137	1,149	1,161	1,172	1,184	1,188	1,196	1,208
26	1,118	1,130	1,141	1,153	1,165	1,176	1,180	1,188	1,200