

## Лабораторна робота № ТЗ

### ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ПОВІТРЯ МЕТОДОМ НАГРІТОЇ НИТКИ

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

#### Теорія методу

Поширення теплоти в газах відбувається трьома способами: тепловим випромінюванням (перенос енергії електромагнітними хвилями), конвекцією (перенос енергії за рахунок переміщення шарів газу в просторі з областей з вищою температурою в області з нижчою температурою) та теплопровідністю.

**Теплопровідність** – це процес передачі теплоти від більш нагрітого шару газу до менш нагрітого за рахунок хаотичного теплового руху молекул. При теплопровідності відбувається безпосередня передача енергії від молекул, що мають більшу енергію, до молекул, що мають меншу енергію. Для стаціонарного процесу, за якого різниця температур у шарі газу не змінюється з часом, кількість теплоти  $dQ$ , що переноситься внаслідок теплопровідності за час  $dt$  через поверхню площею  $S$ , нормальну до напрямку переносу енергії, за напрямком зменшення температури, визначається **законом Фур'є**:

$$dQ = -\kappa \frac{dT}{dr} S dt \quad (2.1)$$

$\kappa$  – коефіцієнт теплопровідності;  $\frac{dT}{dr}$  – градієнт температури.

Для ідеального газу

$$\kappa = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle V_T \rangle C_V \quad (2.2)$$

де  $\rho$  – 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 за сталого об'єму.

Розглянемо два коаксіальні циліндри, простір між якими заповнений газом. Якщо внутрішній циліндр нагрівати, а температуру зовнішнього циліндра підтримувати сталою, але нижчою, ніж температура нагрівника, то в кільцевому шарі газу виникає радіальний потік теплоти, напрямлений від внутрішнього циліндра до зовнішнього. При цьому температури шарів газу, прилеглих до стінок циліндрів, дорівнюють температурам стінок. Виділимо в газі кільцевий шар радіусом  $r$ , товщиною  $dr$  і довжиною  $l$ . За законом Фур'є (3.1) тепловий потік  $q = dQ/dt$ ; тобто кількість теплоти, яка проходить через цей шар за одну секунду, можна записати у вигляді

$$q = -\kappa \frac{dT}{dr} S = -\kappa \frac{dT}{dr} 2\pi r l \quad (2.3)$$

Розділяючи змінні, дістанемо:

$$\frac{dr}{r} = -\frac{2\pi\kappa l}{q} dT$$

Тоді

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

або

$$\ln \frac{R_2}{R_1} = \frac{2\pi\chi L}{q} (T_1 - T_2), \quad (2.4)$$

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

З рівняння (2.4) отримаємо формулу для визначення коефіцієнта теплопровідності газу:

$$\kappa = \frac{q \ln \frac{R_2}{R_1}}{2\pi d(T_1 - T_2)} \quad (2.5)$$

Формулу (2.5) отримано в припущенні, що теплота переноситься від внутрішнього до зовнішнього циліндра тільки завдяки теплопровідності. Це припущення є достатньо обґрунтованим, оскільки потік променистої енергії за невисоких температур і малого діаметру нагрівника становить незначну частину кількості теплоти, що переноситься, а конвекція усувається підбором діаметра зовнішнього циліндра та його вертикальним розміщенням в експериментальній установці.

Внутрішнім циліндром може служити тонка дротинка, звичайно вольфрамова, яка нагрівається електричним струмом. Тоді після встановлення стаціонарного режиму тепловий потік можна прийняти рівним потужності електричного струму у дротині:  $q = I_H U_H$ , де  $I_H$  – струм через дротину;  $U_H$  – спад напруги на дротині.

Якщо послідовно з дротиною підключити еталонний резистор з опором  $R_p$ , тоді

$$I_H = \frac{U_p}{R_p} \text{ і маємо}$$

$$q = U_H U_p / R_p, \quad (2.6)$$

де  $U_p$  – спад напруги на еталонному резисторі.

Використовуючи вираз (3.6) у формулі (3.5), отримаємо:

$$\kappa = \frac{U_p U_H \ln \frac{D}{d}}{2\pi L R_p \Delta T}, \quad (2.7)$$

де  $D$  і  $d$  – діаметр відповідно зовнішнього циліндра і дротини;  $\Delta T = (T_H - T_T)$  – різниця температур дротини і зовнішнього циліндра (трубки).

Температуру трубки  $T_T$  можна прийняти такою, що дорівнює температурі навколишнього повітря.

Для обчислення різниці температур  $\Delta T$  у шарі газу запишемо формулу, що визначає опір дротини за температури навколишнього повітря і в нагрітому стані:

$$R_{HO} = R_O (1 + \alpha t_0); \quad R_H = R_O (1 + \alpha t);$$

де  $R_O$  – опір дротини при  $t = 0$  °C;  $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору матеріалу дротини.

Виключивши з цих рівнянь  $R_H$ , дістанемо:

$$\Delta T = t - t_0 = \frac{R_H - R_{HO}}{\alpha R_{HO}} (1 + \alpha t_0)$$

Зважаючи на те, що  $R_H = \frac{U_H}{I_H}$ ,  $I_H = \frac{U_P}{R_P}$ ,  $R_{HO} = \frac{U_{HO}}{I_{HO}}$ ,  $I_{HO} = \frac{U_{PO}}{R_P}$  отримаємо:

$$\Delta T = \frac{\left(\frac{U_H}{U_P} - \frac{U_{HO}}{U_{PO}}\right)(1 + \alpha t_0)}{\alpha \frac{U_{HO}}{U_{PO}}}, \quad (2.8)$$

де  $U_H$ ,  $U_{HO}$  – спад напруга на дротині відповідно в нагрітому стані і за температури навколишнього повітря  $t_0$ ;  $U_P$ ,  $U_{PO}$  – спад напруги на еталонному резисторі відповідно при нагрітій дротині і за температури навколишнього повітря  $t_0$ .

### Експериментальна установка

Для визначення коефіцієнта теплопровідності повітря призначена експериментальна установка ФПТ 1-3, загальний вигляд якої зображено на рис. 2.1.

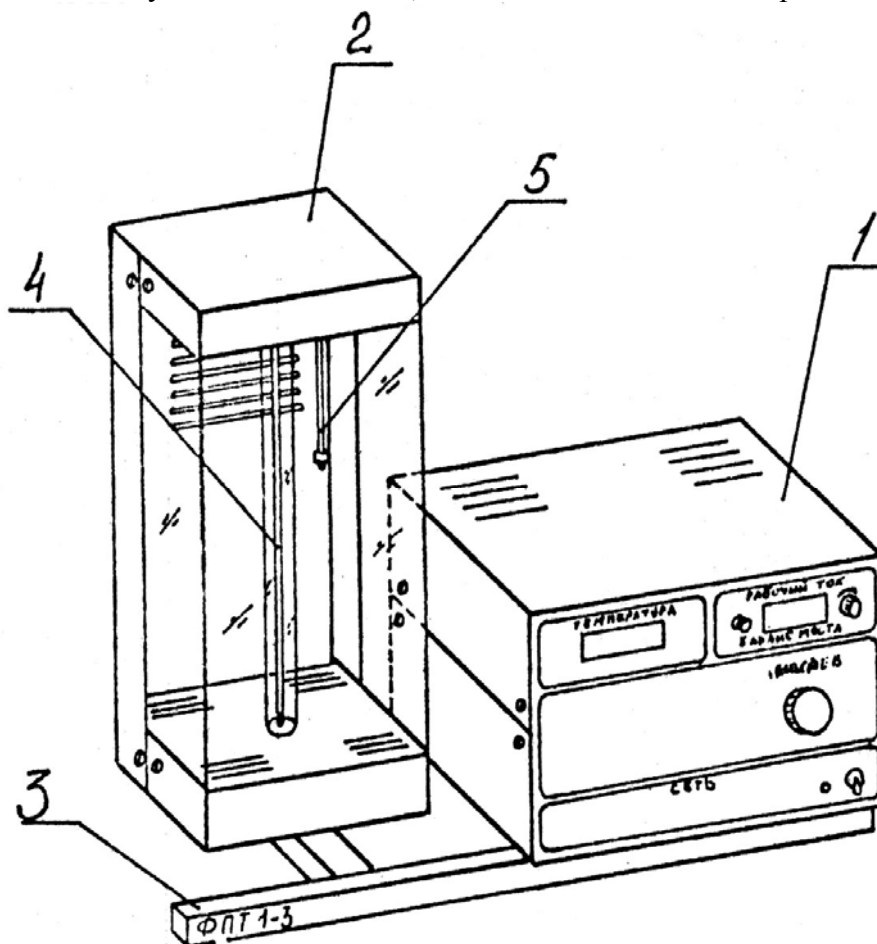


Рис. 2.1

Робочий елемент установки являв собою скляну трубку, заповнену повітрям, по осі якої натягнута вольфрамова дротина (4). Температура трубки в ході експерименту підтримується сталою завдяки примусовій циркуляції повітря між трубкою і кожухом (2), яка здійснюється за допомогою вентилятора, що знаходиться в блоці робочого елемента. Температура повітря в трубці вимірюється напівпровідниковим термометром (5) і реєструється на цифровому індикаторі блоку приладів (1) при натисканні кнопки "°C". Якщо відпустити кнопку "°C", на цифровому індикаторі можуть бути виміряні значення падінь напруги на еталонному резисторі  $U_P$ , і на дротині  $U_H$  при натисканні відповідної кнопки. Значення напруги на дротині встановлюється регулятором "НАГРЕВ", який знаходиться на передній панелі блоку приладів. Геометричні розміри робочого елемента: діаметр трубки  $D$ , діаметр дротини  $d$ , довжина трубки  $l$ , а також температурний коефіцієнт опору матеріалу дротини  $\alpha$ , вказані на робочому місці (позиція 3 на рис.2.1 означає стояк).

### Порядок виконання роботи

1. Ввімкнути установку тумблером "СЕТЬ".
2. Натиснути кнопку "  $U_P$  " (режим вимірювання спаду напруги на еталонному резисторі) і за допомогою регулятора "НАГРЕВ" встановити спад напруги  $U_{PO}$  не більш як 0,060 В, за якого температура дротини залишається практично незмінною ("ненагріваючий" струм).
3. Натиснути кнопку "  $U_H$  " (режим вимірювання спаду напруги на дротині) і зареєструвати значення напруги  $U_{HO}$ .
4. Натиснути кнопку "°C" (режим вимірювання температури) і виміряти температуру навколишнього повітря  $t_0$ , після чого відпустити кнопку "°C".
5. Повторити виміри за пп. 2-4 для 3-5 значень напруги  $U_{PO}$ . Усі результати занести до табл.3.1.
6. Натиснути кнопку "  $U_P$  " і за допомогою регулятора "НАГРЕВ" встановити спад напруги на еталонному резисторі в діапазоні 0,3...1,5 В.
7. Зачекавши 2 хв., що необхідно для стабілізації теплового режиму робочого елемента, натиснути кнопку "  $U_H$  " і визначити спад напруги на дротині  $U_H$ .
8. Повторити виміри за пп. 5-7 для 3-5 значень спаду напруги  $U_P$ . Результат занести до табл.3.1.
9. Встановити ручку регулятора "НАГРЕВ" на мінімум, після чого вимкнути установку тумблером "СЕТЬ".

Таблиця 2.1

№ виміру	$U_{PO}, \text{В}$	$U_{HO}, \text{В}$	$t_0, ^\circ\text{C}$	$U_P, \text{В}$	$U_H, \text{В}$	$\Delta T, \text{К}$	$\chi, \text{Вт}/(\text{м},\text{К})$
PSV							

## Обробка результатів вимірювань

1. Для кожного виміру за формулою (2.8) розрахувати різницю температур  $\Delta T$ , а за формулою (2.7) – коефіцієнт теплопровідності  $\kappa$  і занести отримані значення до табл.2.1.
2. Знайти середнє значення коефіцієнта теплопровідності повітря  $\langle \kappa \rangle$ .
3. Оцінити похибку результатів вимірювань.

## Контрольні запитання

1. Які способи передачі теплоти ви знаєте?
2. У чому полягає явище теплопровідності? Яка величина переноситься при теплопровідності?
3. Яку величину називають тепловим потоком? У яких одиницях СІ вона вимірюється?
4. Якою формулою визначається потік теплоти, що переноситься при теплопровідності?
5. Фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності. У яких одиницях СІ вимірюється ця величина?
6. Запишіть формулу 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 у схемі експериментальної установки.
11. Як визначається різниця температур дротини і зовнішньої трубки у даній роботі?
12. Як оцінити середню довжину вільного пробігу та ефективний діаметр молекули газу, використовуючи явище теплопровідності?