

Міністерство освіти і науки України

Національний університет водного
господарства та природокористування

Кафедра гідроенергетики, теплоенергетики та
гідравлічних машин

01-06-66М

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Термодинаміка та тепломасообмін»
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського)
рівня за освітньо-професійною програмою
«Будівництво та цивільна інженерія» спеціальності 192
«Будівництво та цивільна інженерія»
галузі знань 19 «Архітектура та будівництво»
усіх форм навчання

Рекомендовано науково-методичною
радою з якості ННІБА
Протокол № 2 від 05.11.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Термодинаміка та тепломасообмін» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Будівництво та цивільна інженерія» спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» галузі знань 19 «Архітектура та будівництво» усіх форм навчання [Електронне видання] / Куба В. В. – Рівне : НУВГП, 2024. – 36 с.

Укладач: Куба В. В.– старший викладач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Відповідальний за випуск –Рябенко О. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри гідроенергетики, теплоенергетики та гідравлічних машин.

Керівник групи забезпечення спеціальності Караван В. В.

Попередня версія МВ: 01-06-75М, 01-06-95М.

© В. В. Куба, 2024

© НУВГП, 2024

ЗМІСТ

Передмова	3
Лабораторна робота № 1	4
Лабораторна робота № 2	8
Лабораторна робота № 3	18
Лабораторна робота № 4	25
Додатки	33
Література	36

ПЕРЕДМОВА

У методичних вказівках наведені теоретичні основи, опис експериментальних установок, рекомендації та порядок проведення лабораторних робіт та обробки отриманих дослідних даних.

Термодинаміка є розділом фізики, що вивчає закономірності перетворення енергії в різних процесах, які супроводжується тепловими явищами, та властивості тіл, які приймають участь у цих перетвореннях.

На лабораторних заняттях студенти знайомляться з вимірювальною технікою, проводять дослідження, виконують обрахунки отриманих результатів досліджень.

Метою проведення лабораторних робіт є закріплення теоретичних знань процесів ідеального газу, витікання газів та парів, з теорії теплопровідності, конвекційного теплообміну, та розрахунку теплообмінних апаратів; ознайомлення з методами експериментального дослідження процесів теплообміну.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

Тема: ПЕРЕВІРКА РІВНЯННЯ СТАНУ ІДЕАЛЬНОГО ГАЗУ ТА ГАЗОВИХ ЗАКОНІВ

Мета роботи: Дослідним шляхом перевірити рівняння стану та закон Шарля для ідеального газу.

1.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Ідеальним називається газ в якому відсутні сили взаємодії між молекулами, самі молекули маючи масу не мають об'єму.

Термодинамічні параметри це величини, що описують робоче тіло з точки зору їх фізичних властивостей.

Абсолютний тиск це середній результат силової дії молекул на стінку посудини, що рівний силі, яка діє в напрямку нормалі на одиницю площі поверхні.

$$P = \frac{F}{A}, \quad (1.1)$$

де F – сила, H ; A – площа, m^2 ; P – вимірюється в $Pa=1H/m^2$.

Є також інші одиниці виміру тиску:

технічна атмосфера $1atm=735,6 \text{ мм.рт.ст.}=10 \text{ м.вод.ст.}=1 \text{ кгс/см}^2=98100 \text{ Па}$;

фізична атмосфера $1atm =760 \text{ мм.рт.ст.}= 10,333 \text{ м.вод.ст.}= 1,0333 \text{ кгс/см}^2=1,0132\text{бар}= 101325 \text{ Па}$;

Питомий об'єм – це об'єм одиниці маси речовини.

Абсолютна температура – термічний параметр, що характеризує ступінь нагрітості тіла. З точки зору молекулярно-кінетичної теорії температура є міра інтенсивності теплового руху молекул.

Рівняння котре зв'язує термічні параметри стану функціональною залежністю $f(P, v, T) = 0$ називається термічним рівнянням стану. Залежно від кількості газу розглядають рівняння стану:

- для одного кг (рівняння Клапейрона)

$$P \cdot \mathcal{G} = R \cdot T, \quad (1.2)$$

- для довільної маси газу

$$P \cdot V = m \cdot R \cdot T, \quad (1.3)$$

- для одного кмоль (рівняння Менделєєва-Клапейрона)

$$P \cdot \mathcal{G}_\mu = R_\mu \cdot T, \quad (1.4)$$

де V - об'єм, m^3 ; P - абсолютний тиск, $Па$; ρ - питомий об'єм, m^3/kg ; ρ_μ - мольний об'єм, $m^3/kмоль$; $R_\mu = 8314 \text{ Дж}/(kмоль \cdot K)$ - універсальна газова стала; m - маса газу, kg ; T - абсолютна температура, K ; R - питома газова стала, $Дж/(kg \cdot K)$;

$$R = \frac{R_\mu}{\mu}, \quad (1.5)$$

де μ - молекулярна маса газу, $kg/kмоль$.

Рівняння об'єднаного газового закону встановлює зв'язок між термічними параметрами стану у термодинамічному процесі та описується виразом

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \dots = \frac{P_n V_n}{T_n} \text{ або } \frac{PV}{T} = const \quad (1.6)$$

Часткові випадки об'єднаного газового закону:

для ізохорного процесу при $V = const$ - закон Шарля $\frac{P}{T} = const$;

для ізотермічного процесу при $T = const$ - закон Бойля-Маріотта $P \cdot V = const$;

для ізобарного процесу при $P = const$ - закон Гей-Люсака $\frac{V}{T} = const$.

1.2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

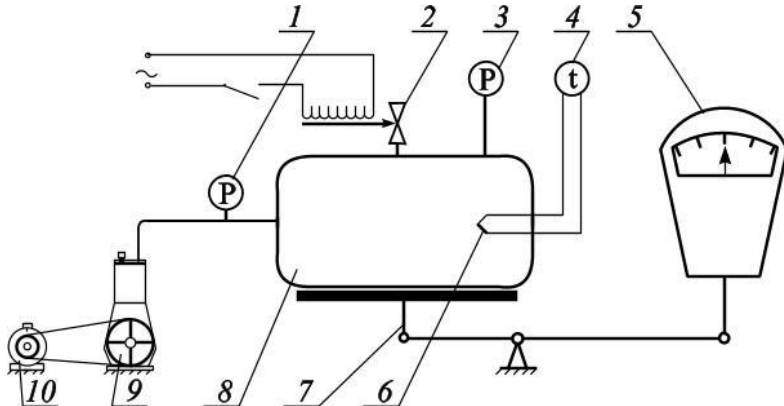


Рис. 1.1. Схема лабораторної установки

Установка складається з сталюого балона 8 об'ємом 40 л, котрий з'єднаний з вагами 5. Для заповнення балона використовується компресор 9, що приводиться в дію електродвигуном 10, а для випуску з балона стисненого повітря використовують електроклапан 2. Тиск повітря, котре подається компресором, контролюється манометром 1. Тиск та температура стисненого повітря у балоні фіксується приладами 3 та 4 на колових діаграмах. Прилад 4 з'єднаний з термопарою 6, яка міститься у балоні.

1.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Записати величину атмосферного тиску P_0 , температуру атмосферного повітря t_0 , початкові покази вагів G_0 та надлишкового тиску у балоні $P_{над 0}$.

2. Компресором накачати повітря у балон до заданого тиску в інтервалі 0,5-0,7 МПа..

3. Через кожні два градуси зниження температури повітря записати значення надлишкового тиску $P_{над,i}$, покази вагів G_i та температуру t_i .

4. Досліди проводити до припинення зниження температури.

5. Дослідні дані записати в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1

Дослідні та розрахункові данні

№ п/п	P_0 , мм.рт.ст.	$P_{над}$, ат	$P_{абс}$, Па	G , кг	t , °C	T , К	Δm , кг	ΔG , кг	δ_M , %	P/T , Па/К	$\delta_{Ш}$, %
0							-	-	-	-	-
1											
2											
...											
n											
ср.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

1.4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

1. Перевести всі значення тиску в однакову розмірність - Па.

2. Визначити абсолютний тиск повітря в балоні

$$P_{абс} = P_0 + P_{над}, Па \quad (1.7)$$

3. Із рівняння стану знайти масу повітря у балоні для i -тої точки ($i=0, 1, 2, 3$).

$$m_i = \frac{P_{абс_i} \cdot V}{R \cdot T_i}, \text{ кг} \quad (1.8)$$

де $V = 0,04 \text{ м}^3$ – об'єм балону, R – питома газова стала повітря.

4. Обчислити зміну маси повітря у балоні за розрахунками

$$\Delta m_i = m_i - m_0, \text{ кг} \quad (1.9)$$

та з досліду

$$\Delta G_i = (G_i - G_0) \cdot \xi, \text{ кг} \quad (1.10)$$

де ξ - поправковий коефіцієнт вагової системи.

5. Визначити складові закону Шарля P_i/T_i та середнє значення

$$\left(\frac{P}{T}\right)_{cp} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{T_i}\right)}{n}, \frac{\text{Па}}{\text{К}} \quad (1.11)$$

6. Визначити відносні похибки перевірки рівняння стану

$$\delta_{M_i} = \frac{|\Delta m_i - \Delta G_i|}{\Delta G_i} \cdot 100\%, \quad (1.12)$$

та закону Шарля

$$\delta_{u.i} = \left[\frac{\left(\frac{P_i}{T_i} - \left(\frac{P}{T}\right)_{cp}\right)}{\left(\frac{P}{T}\right)_{cp}} \right] \cdot 100\%. \quad (1.13)$$

7. Результати обчислень записати до таблиці 1.1 та зробити висновки.

1.5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ:

5.1. Що називається ідеальним газом?

5.2. Охарактеризуйте термічні параметри стану.

5.3. Запишіть рівняння стану ідеального газу для 1 кг, довільної маси та 1 кмоль.

5.4. Запишіть зв'язок між питоною газовою сталою та універсальною газовою сталою, вкажіть їх розмірності.

5.5. Назвіть часткові випадки об'єднаного газового закону.

5.6. Які одиниці вимірювання термічних параметрів.

5.7. Зв'язок між одиницями вимірювання тиску.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

Тема: ВИВЧЕННЯ ПРОЦЕСУ АДІАБАТНОГО ВИТІКАННЯ ГАЗУ ЧЕРЕЗ ЗВУЖУЮЧЕ СОПЛО

Мета роботи: Теоретично та експериментально визначити термодинамічні характеристики процесу витікання газу через звужуюче сопло.

2.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Термодинамічне дослідження процесів руху газу через канали має велике практичне значення. Положення теорії витікання газів дозволяють розрахувати проточну частину парових і газових турбін, реактивних двигунів, відцентрових та осьових компресорів та ін.

Витіканням називають прискорений рух робочого тіла (газ, рідина) по відносно коротких каналах особливої форми – соплах, в яких відбувається падіння тиску. Канали в яких швидкість руху робочого тіла зменшується, а тиск збільшується, називаються дифузорами. Сопла та дифузори бувають такими, що звужуються або розширюються.

Основними спрощеннями на яких будується термодинамічна теорія газового потоку є:

а) стаціонарність потоку, параметри потоку не змінюються з часом, звідси випливає постійність масової витрати газу ($G = const$);

б) відсутність тертя об стінки каналу та теплообміну з навколишнім середовищем, витікання адіабатне ($dq = 0$);

в) витікання рівномірне ($\frac{d\omega}{dz} = 0$) і змінюється лише по довжині каналу $\omega = \omega(x)$;

г) газ ідеальний і теплоємність його ідеальна $c_p = 0$ або $c_g = 0$;

г) потенціальна енергія не змінюється $g \cdot dz = 0$; $dl_{mex} = 0$, так як канал нерухомий.

Процеси витікання описуються за наступними рівняннями:

1. Рівняння нерозривності газового потоку має вигляд

$$G \cdot \varrho = F \cdot \omega, \quad (2.1)$$

де G - масова витрата газу, $\text{кг}/\text{с}$; F - площа поперечного перерізу каналу, м^2 ; ω - швидкість потоку, $\text{м}/\text{с}$; \mathcal{G} - питомий об'єм газу, $\text{м}^3/\text{кг}$.

2. Рівняння адіабати

$$p \cdot \mathcal{G}^k = \text{const}, \quad (2.2)$$

де p - тиск газу, Па ; k - показник адіабати.

3. Рівняння стану

$$p \cdot \mathcal{G} = R \cdot T, \quad (2.3)$$

де R - питома газова стала, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$; T - абсолютна температура газового потоку, К .

4. Рівняння I-го закону термодинаміки для потоку газу

$$dq = dh + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right), \quad (2.4)$$

де dh - зміна ентальпії потоку газу.

Так як витікання адіабатне, то в інтегральному вигляді рівняння I-го закону термодинаміки для потоку запишеться

$$h_1 - h_2 = \frac{\omega_2^2}{2} - \frac{\omega_1^2}{2}, \quad (2.5)$$

або

$$h_1 + \frac{\omega_1^2}{2} = h_2 + \frac{\omega_2^2}{2} = \dots = \text{const}. \quad (2.6)$$

З рівняння (7.6) видно, що зміна швидкості адіабатного витікання потоку відбувається за рахунок зміни ентальпії газу.

5. Рівняння Бернуллі для стисненого робочого тіла (без врахування тертя).

$$d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) = -\mathcal{G} \cdot dp. \quad (2.7)$$

Дане рівняння дозволяє зв'язати зміну швидкості потоку зі зміною тиску та показує, що з приростом тиску газу швидкість і кінетична енергія газу завжди зменшуються та навпаки, зі зменшенням тиску, швидкість і кінетична енергія газу зростають.

До задач термодинамічного аналізу витікання входить визначення швидкості та витрати газу на виході з сопла, а також площі вихідного перерізу та профілю сопла.

Значення швидкості адиабатного витікання ідеального газу можна знайти за формулою, м/с

$$\omega_2 = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot (p_1 \cdot \mathcal{G}_1 - p_2 \cdot \mathcal{G}_2)} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot \mathcal{G}_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (2.8)$$

де p_1, \mathcal{G}_1 - тиск та питомий об'єм потоку на вході в сопло; p_2, \mathcal{G}_2 - тиск та питомий об'єм потоку на виході з сопла.

Швидкість адиабатного витікання можна знайти з рівняння (2.5):

$$\omega_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2) + \omega_1^2}, \quad (2.9)$$

де h_1, h_2 - ентальпії потоку на вході та виході з сопла, Дж/кг.

В багатьох випадках $\omega_2 \ll \omega_1$, то швидкістю потоку на вході в сопло ω_1 можна нехтувати. Тоді:

$$\omega_2 = \sqrt{2 \cdot (h_1 - h_2)}. \quad (2.10)$$

Секундна витрата потоку газу через сопло (кг/с) площею вихідного перерізу F_2 можна визначити на основі рівняння (2.1) підставивши в нього ω_2 з (2.8) і \mathcal{G}_2 із рівняння адиабати $p_1 \cdot \mathcal{G}_1^k = p_2 \cdot \mathcal{G}_2^k$. Тоді:

$$G_2 = F_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{\mathcal{G}_1} \cdot \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (2.11)$$

де F_2 - площа вихідного перерізу сопла, м².

При експериментальному дослідженні витікання газу через звукоутворююче сопло було встановлено, що неможливо отримати тиск газу у вихідному перерізі нижче деякого критичного значення. Цьому критичному значенню тиску відповідає максимальна витрата газу через сопло. Відношення критичного тиску до тиску на вході в сопло може бути визначено за формулою:

$$\frac{p_{кр}}{p_1} = \beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}. \quad (2.12)$$

Це означає, що критичне відношення тисків залежить тільки від виду газу і для конкретного газу є постійним.

Для двоатомних газів і повітря ($k = 1,4$) $\beta_{кр} = 0,528$. Для одноатомних газів ($k = 1,67$) $\beta_{кр} = 0,487$. Для трьох та багатоатомних газів ($k = 1,29$) $\beta_{кр} = 0,547$. Якщо тиск середовища за соплом знижувати до тиску меншого за $p_{кр}$ то це не вплине на тиск газу в перерізі звужуючого сопла p_2 . Воно буде залишатись постійним і рівним $p_{кр}$. Витрата газу також буде сталою $G_{\max} = G_{кр}$, а швидкість витікання з звужуючого сопла при $p_2 = p_{кр}$ також буде сталою та рівною місцевій швидкості звуку.

$$\omega_{кр} = a_{кр} = \sqrt{k \cdot R \cdot T_{кр}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot R \cdot T_1}, \quad (2.13)$$

де $T_{кр}$ - абсолютна температура потоку газу на виході зі звужуючого сопла (в “критичному” перерізі).

За рахунок в'язкості робочого тіла дійсний процес витікання завжди супроводжується тертям між робочим тілом і поверхнею сопла, а також завихренням у самому потоці. Наявність тертя потребує затрати частини енергії потоку на його подолання. В наслідок цього дійсна швидкість витікання ω_{2o} буде менша теоретичної ω_2 , причому

$$\omega_{2o} = \varphi \cdot \omega_2, \quad (2.14)$$

де φ - коефіцієнт швидкості сопла, який залежить від профілю сопла та чистоти обробки його поверхні, $\varphi = 0,95 \dots 0,98$.

Втрати питомої енергії на тертя, яка перетворюється в питому теплоту та підвищенням питомої ентальпії потоку на виході з сопла будуть:

$$h_c = \frac{\omega_1^2}{2} - \frac{\omega_{2o}^2}{2} = (1 - \varphi^2) \cdot \frac{\omega_2^2}{2} = \xi \cdot h_0, \quad (2.15)$$

де $\xi = (1 - \varphi^2)$ - коефіцієнт втрати питомої енергії; h_0 - теоретичний питомий теплоперепад, Дж/кг.

З вище сказаного, маємо наступне, що дійсний питомий теплоперепад h_δ буде менший h_0 на величину h_c , а саме

$$h_\delta = h_0 - h_c. \quad (2.16)$$

Якщо значення h_c відкласти вгору по адіабаті 1-2 (рис. 2.1) і провести горизонталь до перетину з ізобарою p_2 , отримаємо точку 2_δ , що характеризує стан робочого тіла за соплом при дійсному процесі витікання, а штрихова крива 1- 2_δ умовно зобразить необоротний, адіабатний процес витікання. Цей процес також рахується адіабатним, так як він як і раніше протікає без зовнішнього теплообміну, а теплота, що виділилась при терті, поглинається потоком. В наслідок цього питома ентропія процесу збільшується ($s_{2\delta} > s_2$).

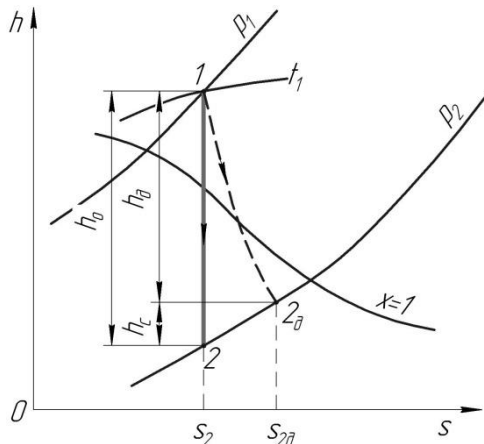


Рис. 2.1. Оборотний (1-2) і необоротний (1- 2_δ) процеси адіабатного витікання робочого тіла.

2.2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

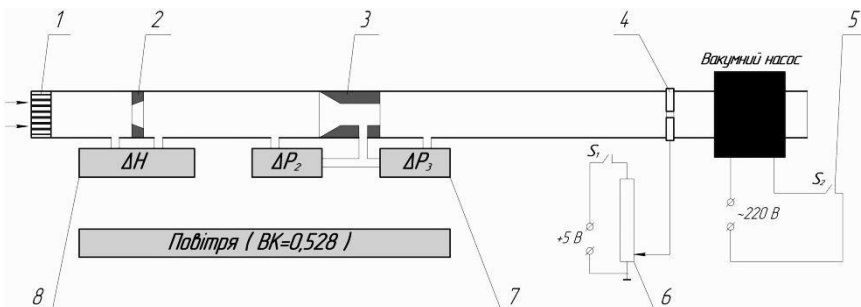


Рис. 2.2. Схема лабораторної установки

Лабораторна установка складається з ЕОМ і робочої ділянки. Робоча ділянка установки (рис. 2.2) являє собою трубку, в яку вставлено досліджуване звужуюче сопло 3 з вихідним діаметром $d = 1,5 \pm 0,05$ мм. Потік газу (повітря, вуглекислий газ CO_2 або гелій He) через сопло створюється за допомогою вакуумного насосу. Тиск газу на вході рівний атмосферному $p_1 = B$. Витрата газу G та швидкість витікання W регулюються вентилем 4. Робочі режими визначаються величиною розрідження за соплом Δp_3 , яка відображається на цифровому індикаторі пульта керування 7 і дублюється на екрані монітору.

Витрата газу вимірюється за допомогою мірної шайби 2 діаметром $d_{ui} = 5 \pm 0,1$ мм. Перепад тиску на шайбі ΔH відображається на пульті керування 8 і дублюється на екрані монітору. В досліді також реєструються на пульті керування 7 і дублюється на екрані монітору розрідження Δp_2 у вихідному перерізі сопла. Клас точності всіх приладів приймаємо рівним 1,0. Коефіцієнт витрати мірної шайби $\mu_{ui} = 0,95$ (визначається таруванням).

2.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Після запуску робочої програми, на комп'ютерному моніторі відображається тема лабораторної роботи і Ви вступаєте в діалог з

комп'ютером. В процесі діалогу Вам запропоновано три варіанти експерименту: на повітрі, CO_2 та He .

1. Записати величину атмосферного тиску B , температуру атмосферного повітря t .

2. Після вибору одного з варіантів на екрані монітору висвічується схема експериментальної установки з відображенням руху газу в робочій ділянці, положення регулюючого вентиля 4 та індикація показів вимірювальних приладів 7, 8 (ΔH , Δp_2 , Δp_3). До початку експерименту потік газу відсутній. Регулюючий вентиль 4 повністю закритий, і всі прилади показують «нуль» ($\Delta H = 0$, $\Delta p_2 = 0$, $\Delta p_3 = 0$).

3. Включити тумблер живлення вимірювальних приладів та тумблер 5 вакуумного насосу.

4. За допомогою змінного резистора 6 поступово відкрити вентиль 4 та встановити мінімальне розрідження $\Delta p_3 = 0,1 \text{ атм}$ (1-й дослід).

5. Під час витікання газу, зняти покази перепаду тиску на шайбі ΔH та розрідження у вихідному перерізі сопла Δp_2 і за соплом Δp_3 .

6. Дослід проводити при значеннях $\Delta p_3 = 0,2, 0,3, \dots 0,9 \text{ атм}$.

7. Всі результати вимірювань (ΔH , Δp_2 , Δp_3) записати в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1

Дослідні та розрахункові данні

Газ	№ досліджу	Дослідні дані					Розрахункові дані		
		B , мм.рт.ст.	t_1 , °C	Δp_3 , атм	Δp_2 , атм	ΔH , Па	p_1 , Па	p_3 , Па	p_2 , Па
	1			0,1					
	2			0,2					
					
	9			0,9					

Продовження табл. 2.1

№ дослі- ду	Розрахункові дані							
	β ,	G_o , кг/с	G_m , кг/с	μ_c ,	T_2 , К	W_o , м/с	W_m , м/с	$\frac{p_2}{p_1}$
1								
2								
...								
9								

2.4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

1. Перевести всі значення тиску в однакову розмірність, Па.

2. Визначити абсолютний тиск перед соплом p_1 , у вихідному перетині сопла p_2 і за соплом p_3 , Па

$$p_1 = B; \quad (2.17)$$

$$p_{2.x} = B - \Delta p_{2.x}; \quad (2.18)$$

$$p_{3.x} = B - \Delta p_{3.x}, \quad (2.19)$$

де x – номер досліджу.

3. Обрахувати відношення тисків:

$$\beta_x = \frac{p_{3.x}}{p_1}. \quad (2.20)$$

4. Визначити дійсну масову витрату газу, кг/с

$$G_{o.x} = \mu_u \cdot F_u \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_u \cdot \Delta H_x}, \quad (2.21)$$

де ΔH_x - вимірний перепад тиску на мірній шайбі в x - досліджу, Па; $\mu_u = 0,95$ - коефіцієнт витрати мірної шайби; ρ_u - густина газу перед мірною шайбою, кг/м³,

$$\rho_u = \frac{p_1}{R \cdot T_1}, \quad (2.22)$$

де R - питома газова стала газу, $\frac{Дж}{кг \cdot К}$; T_1 - абсолютна температура газу перед шайбою, $К$; F_u - площа поперечного перерізу отвору мірної шайби, $м^2$,

$$F_u = \frac{\pi \cdot d_u^2}{4}, \quad (2.23)$$

де $d_u = 0,005$ м - діаметр отвору мірної шайби.

5. Визначити теоретичну масову витрату газу, $кг/с$

Якщо $\beta_x > \beta_\kappa$ теоретична масова витрата газу визначається за формулою:

$$G_{m.x} = F_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[\beta_x^{\frac{2}{k}} - \beta_x^{\frac{k+1}{k}} \right]}. \quad (2.24)$$

Якщо $\beta_x < \beta_\kappa$ теоретична масова витрата газу визначається за формулою:

$$G_{m.x} = F_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{p_1^2}{R \cdot T_1}}, \quad (2.25)$$

де k - показник адіабати газу; β_κ - коефіцієнт відношення критичного тиску газу до початкового тиску, (див. формулу 2.12); F_2 - площа поперечного перерізу звужуючого сопла, $м^2$,

$$F_2 = \frac{\pi \cdot d_c^2}{4}, \quad (2.26)$$

де $d_c = 0,0015$ м - діаметр звужуючого сопла.

6. Визначити коефіцієнт витрати сопла

$$\mu_{c.x} = \frac{G_{d.x}}{G_{m.x}}. \quad (2.27)$$

7. Визначити дійсну швидкість газу у вихідному перерізі сопла, $м/с$

$$w_{\partial.x} = \frac{G_{\partial.x} \cdot R \cdot T_{2.x}}{F_2 \cdot p_{2.x}}, \quad (2.28)$$

або

$$w_{\partial.x} = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_1 - T_{2.x})}, \quad (2.29)$$

де $T_{2.x}$ - дійсна, абсолютна температура газу у вихідному перерізі сопла в x - досліді, K .

Прирівнявши рівняння (2.28) і (2.29) отримаємо формулу знаходження дійсної температури газу у вихідному перерізі сопла, K

$$T_{2.x} = -A_x^2 \pm A_x \cdot \sqrt{A_x^2 + 2 \cdot T_1}, \quad (2.30)$$

$$\text{де} \quad A_x = \sqrt{c_p} \cdot \frac{F_2}{G_{\partial.x}} \cdot \frac{p_{2.x}}{R}. \quad (2.31)$$

де $c_p = \frac{k}{k-1} \cdot R$ - питома, ізобарна теплоємність газу, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$.

8. Визначити теоретичну швидкість витікання газу у вихідному перерізі сопла, $м/с$

Якщо $\beta_x > \beta_k$ теоретична швидкість витікання газу визначається за формулою:

$$w_{m.x} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_1 \cdot \left[1 - \beta_x^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (2.32)$$

Якщо $\beta_x < \beta_k$ теоретична швидкість витікання газу визначається за формулою:

$$w_{m.x} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot R \cdot T_1}, \quad (2.33)$$

9. Побудувати графіки залежності $w_{\partial} = f(\beta)$ і $G_{\partial} = f(\beta)$, а також $\frac{p_2}{p_1} = f(\beta)$, за допомогою яких знайти критичне відношення тисків β_k за дослідними даними. Найдене значення β_k порівняти зі значенням, що розраховане в п. 5.

10. Результати обчислень записати у таблицю 2.1 та зробити висновки.

5. Контрольні питання

5.1. Записати рівняння першого закону термодинаміки для потоку газу.

5.2. Які канали називаються соплами, а які – дифузорами?

5.3. Чому витікання газу із сопла можна рахувати адіабатним?

5.4. Які режими витікання газу із сопла Вам відомі?

5.5. Що таке критична швидкість витікання та критичне відношення тисків?

5.6. Який процес називається дроселюванням?

5.7. Як змінюється температура ідеального і реальних газів при дроселюванні?

5.8. Що називається температурою інверсії?

5.9. Які параметри впливають на значення коефіцієнта витрати сопла?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

Тема: ***ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ПЛАСТИНИ***

Мета роботи: Визначити коефіцієнт теплопровідності фторопластових зразків методом плоского шару в залежності від температури.

3.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Теплота внаслідок теплопровідності передається при мікрорусі елементарних частинок тіла.

Дослідження теплопровідності може бути зведено до вивчення просторово-часових змін величин, які характеризують теплообмін. Сукупність значень температур у всіх точках будь-якого тіла в даний момент часу називається температурним полем даного тіла. Температурне поле в декартовій системі координат задається рівнянням виду

$$t = f(x, y, z, \tau). \quad (3.1)$$

Сукупність точок тіла, що мають однакову температуру, утворюють ізотермічну поверхню. Границя відношення зміни температури Δt до відстані Δn по нормалі між відповідними ізотермічними поверхнями при умові, що $\Delta n \rightarrow 0$ називається температурним градієнтом:

$$\text{grad}t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{\partial t}{\partial n}. \quad (3.2)$$

Кількісна оцінка теплоти, що проходить всередині тіла внаслідок теплопровідності базується на основі закону теплопровідності Фур'є:

$$dQ = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF \quad \text{або} \quad q = -\lambda \cdot \text{grad}t, \quad (3.3)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності, $Bm/(M \cdot K)$.

Для розв'язку задач теплопровідності необхідно знати просторово-часове розподілення температури. Таке розподілення описується диференціальним рівнянням теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial n} = a \cdot \nabla^2 t + \frac{q_v}{C_p \cdot \rho}. \quad (3.4)$$

Використаємо диференціальне рівняння теплопровідності в поєднанні з умовами однозначності до задачі про однорізне температурне поле. Прикладом може бути плоска стінка.

Плоскою називають стінку, товщина якої δ значно менша двох інших розмірів. Якщо вважати, що матеріал стінки має ізотропні і однорідні властивості, то $\lambda(t) = \text{const}$.

Для плоскої стінки в стаціонарному режимі теплообміну температурне поле залежить тільки від однієї координати і задача є одномірною. Диференціальне рівняння теплопровідності має вигляд:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{d^2 t}{dx^2} = 0. \quad (3.5)$$

Після подвійного інтегрування отримаємо рівняння температурного поля:

$$t(x) = t_{cm1} - \frac{t_{cm1} - t_{cm2}}{\delta} \cdot x. \quad (3.6)$$

Густину теплового потоку можна визначити з виразу

$$q = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{cm1} - t_{cm2}). \quad (3.7)$$

При необхідності визначення коефіцієнта теплопровідності за вимірними величинами можна використати вираз

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{t_{cm1} - t_{cm2}}. \quad (3.8)$$

В даному випадку отримане значення λ необхідно віднести до середньої температури $\bar{t} = \frac{t_{cm1} + t_{cm2}}{2}$.

3.2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальна установка складається з ЕОМ і робочої ділянки.

Робоча ділянка (рис. 3.1) складається з двох фторопластових зразків 12, виготовлених у формі дисків товщиною $\delta=5$ мм і діаметром $d=140$ мм. Зразки розміщені між нагрівником 10, висотою $h_n=12$ мм і діаметром $d_n=146$ мм, та холодильником 11, який охолоджується водою.

Тепловий потік створюється нагрівником з електричним опором $R=41$ Ом, проходить через фторопластові зразки і вноситься водою, яка проходить через спіральні канавки холодильника. Для зменшення втрат тепла в навколишнє середовище через торцеві поверхні, встановлений теплоізоляційний кожух 13, який виготовлений з азбоцементу ($\lambda_k=0,08$ Вт/(м·К)). Кожух висотою $h_k=22$ мм виготовлений у вигляді полого циліндру із внутрішнім діаметром $d_n=146$ мм і зовнішнім $d_k=190$ мм. Температура на внутрішній (гарячій) поверхні вимірюється термопарами 3, 4, 5, 6, на зовнішній (холодній) – термопарами 1, 2. Термопара 7 встановлена на зовнішній поверхні теплоізоляційного кожуха для визначення радіальних теплових втрат.

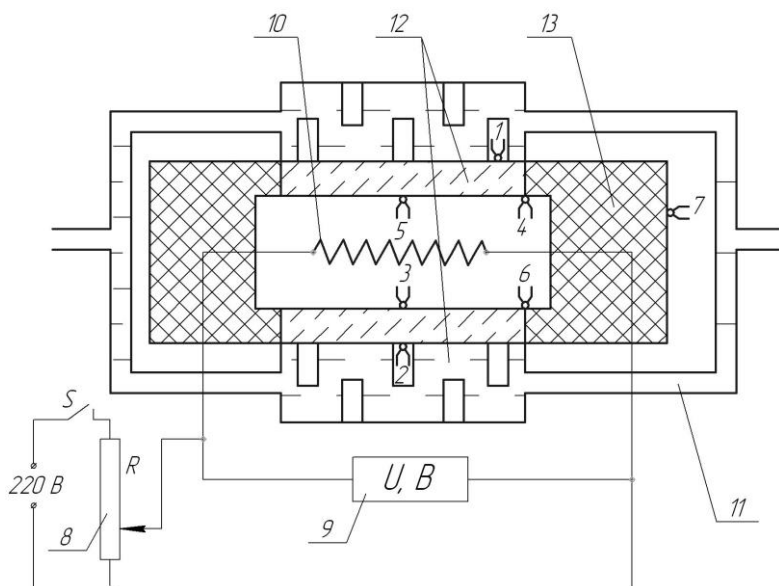


Рис. 3.1 – Схема робочої ділянки установки:
 1-7 – термопари; 8 – реостат; 9 – вольтметр; 10 – нагрівник;
 11 – холодильник; 12 – фторопластові зразки; 13 – теплоізоляційний кожух.

3.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Після запуску робочої програми, на комп'ютерному моніторі відображається тема лабораторної роботи і Ви вступаєте в діалог з комп'ютером. В процесі діалогу виконується наступна послідовність дій.

1 Вибирається температурний режим роботи установки: задається за допомогою клавіатури температура гарячої поверхні пластини t_2 в межах від 50 до 100 °С.

2 На пульті установки послідовно вмикаються тумблери живлення індикаторних приладів, що рееструють напругу на електронагрівнику і на термо-ЕРС температурних датчиках, і тумблер вмикання нагріву.

3 Плавним обертанням ручки реостата встановлюється потрібна напруга на нагрівнику. Напруга U і t_2 залежать одна від одної відповідно до графіка, на якому робоча зона заштрихована (рис. 1.2).

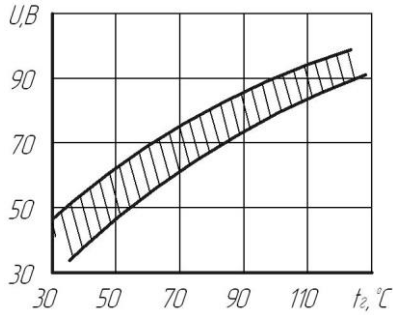


Рис. 3.2 – Робоча зона

4 Визначаються значення термо-ЕРС семи температурних давачів, які разом із значенням напруги U заносяться в табл. 3.1.

5 Дослід виконується п'ять разів при різних температурних режимах роботи установки (при різних значеннях t_r і U).

6 По закінченню експерименту проводиться переведення всіх регулюючих органів у вихідне положення.

Таблиця 3.1

Результати дослідів і розрахунків

№	U	Покази термопар						
		E_1/t_1	E_2/t_2	E_3/t_3	E_4/t_4	E_5/t_5	E_6/t_6	E_7/t_7
	B	$mB/^\circ C$	$mB/^\circ C$	$mB/^\circ C$	$mB/^\circ C$	$mB/^\circ C$	$mB/^\circ C$	$mB/^\circ C$
1								
...								
5								

№	t_2	t_x	t	λ_j	λ_o	b
	$^\circ C/K$	$^\circ C/K$	$^\circ C/K$	$Bm/(M \cdot K)$	$Bm/(M \cdot K)$	$1/K$
1						
...						
5						

3.4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

1 Покази термоЕРС кожного температурного датчика переводяться в градуси Цельсія за залежністю:

$$t_i = E_i / 0,0695. \quad (3.9)$$

2 Визначаються середні температури внутрішньої (гарячої) і зовнішньої (холодної) поверхонь зразків:

$$t_z = t_{cm1} = \sum_{i=3}^6 \frac{t_i}{4}, \quad (3.10)$$

$$t_x = t_{cm2} = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (3.11)$$

де i – номер термопари.

3 Тепловий потік, який створюється нагрівачем визначаємо за формулою:

$$Q = \frac{U^2}{R}. \quad (3.12)$$

4 Тепловий потік, який пройшов через зразки за рахунок теплопровідності визначимо за співвідношенням:

$$Q_\lambda = Q - Q_k, \quad (3.13)$$

де Q_k - втрати тепла через ізоляційний кожух:

$$Q_k = k \cdot (t_z - t_7). \quad (3.14)$$

В цій формулі k характеризує теплопровідність кожуха.

$$k = \frac{5 \cdot \pi \cdot \lambda_\kappa}{2} \cdot \left(\frac{d_n + d_\kappa}{d_\kappa - d_n} \right) \cdot (h_n + h_\kappa), \quad [k] = 1 \text{ Bm} / \text{K}. \quad (3.15)$$

5 Теплопровідність фторопласта визначається з формули:

$$\lambda = \frac{Q_\lambda \cdot \delta}{2 \cdot F \cdot (T_{cm1} - T_{cm2})}, \quad (3.16)$$

де F – площа поверхні одного зразка, m^2 .

Значення коефіцієнта теплопровідності залежить від температури матеріалу, тому отримане значення λ за формулою (3.16) відноситься до середньої температури досліджуваного зразка –

$$t = \frac{t_z + t_x}{2}.$$

6 Для інших режимів роботи проводяться аналогічні розрахунки, в результаті чого отримуємо декілька значень λ_j для відповідних середніх температур t_j , де j – номер режиму роботи установки. За

отриманими значеннями необхідно отримати аналітичну залежність теплопровідності від температури у вигляді $\lambda = \lambda_o \cdot (1 + b \cdot \bar{t})$.

7 Для визначення постійних λ_o і b необхідно скласти і розв'язати системи рівнянь для п'яти режимів роботи установки:

$$\begin{cases} \lambda_j = \lambda_o \cdot (1 + b \cdot \bar{t}_j) \\ \lambda_{j+1} = \lambda_o \cdot (1 + b \cdot \bar{t}_{j+1}) \end{cases} \quad (3.17)$$

Середні значення постійних λ_o і b визначаються за залежностями:

$$(\lambda_o)_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^{j-1} \lambda_o}{j-1}, \quad [(\lambda_o)_{cp}] = 1 \frac{Bm}{M \cdot K}, \quad (3.18)$$

$$b_{cp} = \frac{\sum_{j=1}^{j-1} b}{j-1}, \quad [b_{cp}] = 1 \frac{1}{K}. \quad (3.19)$$

9 Отримані результати розрахунку занести в таблицю 3.1.

3.5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ:

1. Що називається теплопровідністю?
2. Яку стінку можна вважати плоскою?
3. Температурне поле. Стаціонарне і нестаціонарне.
4. Градієнт температури.
5. Закон Фур'є.
6. Коефіцієнт теплопровідності.
7. Диференційне рівняння теплопровідності.
8. Умови однозначності.
9. Рівняння температурного поля для плоскої стінки.
10. Густина теплового потоку в плоскій стінці.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4

Тема: ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ПРИ ВИМУШЕНОМУ РУСІ ПОВІТРЯ В ТРУБІ

Мета: Експериментально визначити локальні і середні по довжині труби значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеному русі повітря в трубі на різних швидкостях руху і порівняти результати дослідів з відомими критеріальними залежностями.

4.1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Робочі процеси в різних теплообмінних апаратах, як правило, засновані на конвекційному теплообміні між твердою поверхнею тіла і рідиною (або газом), яка його омиває. Інтенсивність теплообміну залежить в першу чергу від різниці температур рідини і поверхні (температурного напору), а також визначається гідродинамічними умовами обтікання поверхні і теплофізичними властивостями рідини.

Для розрахунку теплового потоку використовують формулу Ньютона-Ріхмана, згідно якої густина теплового потоку q пропорційна температурному напору:

$$q = \alpha \cdot (t_p - t_{cm}), \quad (4.1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $Bm/(m^2 \cdot K)$;

t_p і t_{cm} – температура рідини і температура поверхні теплообміну (стінки) відповідно.

Сучасні методи розрахунку конвекційного теплообміну при вимушеному русі ґрунтуються на теорії пограничного шару.

В безпосередній близькості біля стінки теплота передається тільки теплопровідністю. Тоді у відповідності з гіпотезою Фур'є

$$q = -\lambda_p \cdot \frac{\partial t}{\partial n}, \quad (4.2)$$

де λ_p – теплопровідність рідини;

Якщо прийняти в першому наближенні

$$\frac{\partial t}{\partial n} \approx -\frac{(t_p - t_{cm})}{\delta_m},$$

де δ_m – товщина теплового пограничного шару, то з рівнянь (4.1) і (4.2) випливає, що

$$\alpha = \frac{\lambda_p}{\delta_m}. \quad (4.3)$$

Таким чином, для інтенсифікації тепловіддачі потрібно використовувати рідини з високою теплопровідністю і приймати міри щодо зменшення товщини пограничного шару.

Інтенсивність тепловіддачі конвекцією залежить від характеру руху рідини в пограничному шарі.

При ламінарному режимі руху рідини, коли лінії течії не змінюються, інтенсивність тепловіддачі невелика, слабо залежить від швидкості течії і суттєво змінюється при зміні теплофізичних властивостей теплоносія.

При турбулентному режимі руху рідини швидкість у кожній точці потоку пульсує біля деякого середнього за часом значення. Це спричинює виникнення інтенсивного поперечного змішування рідини, що і викликає інтенсивний обмін кількістю руху і теплою між шарами з різноманітною швидкістю. При вимушеному русі рідини в трубах тільки на достатній відстані від входу, коли товщина пограничного шару стає рівною радіусу труби, встановлюється рівноважний розподіл швидкості і температури по перерізу (стабілізований потік), що не залежить від початкових параметрів.

На початковій ділянці, де має місце дестабілізований потік, процес тепловіддачі відрізняється великою складністю, та коефіцієнт тепловіддачі різко змінюється по довжині.

В багатьох випадках математичний опис процесів теплообміну виявляється настільки складним, що розв'язати задачу аналітично не можливо. В цих випадках задача може бути вирішена або чисельним методом, або експериментально. Обидва способи дозволяють знайти розв'язок лише для одного конкретного випадку. При зміні хоча б одного параметру задачу необхідно розв'язувати ще раз.

При великій кількості аргументів не тільки дуже великим виявляється об'єм обчислень або експериментів, але і дуже складно (а інколи і неможливо) стає підібрати емпіричну залежність, яка правильно відображає вплив всіх аргументів, тобто узагальнити результати чисельних рішень або експериментів. Ці труднощі усуваються з допомогою так званих узагальнених змінних або критеріїв подібності, які являють собою безрозмірні комплекси фізичних величин.

Критерії подібності, які складаються з фізичних величин, що задані умовами рівнозначності, називаються визначальними. Критерії, що містять невідомі (шукані) величини, називаються критеріями, що визначаються.

Залежності між критеріями подібності називаються критеріальними рівняннями, їх знаходять за допомогою експериментів або чисельних рішень.

4.2 ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальна установка складається з пульта керування з чотирма блоками вимірів (потужності, тиску, температури), макету робочої ділянки (рис. 3.1) і ЕОМ, яка підключена до пульта.

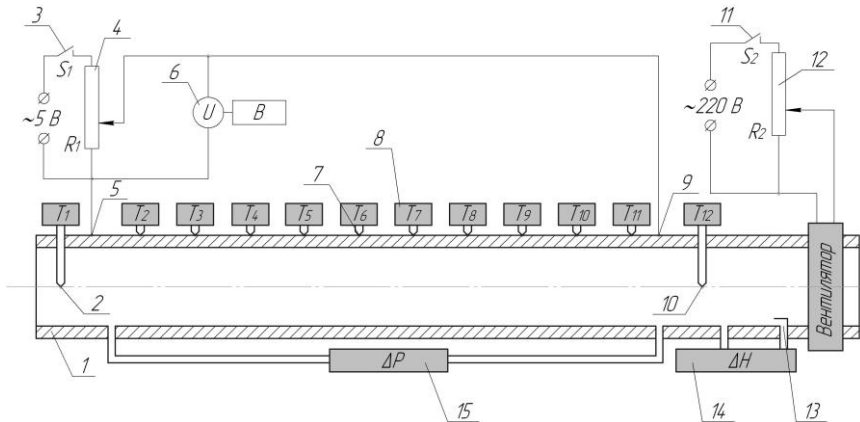


Рис. 4.1 – Схема робочої ділянки установки:

- 1 – стальна трубка; 2,7,10 – датчики температури; 3 – тумблер електронагріву;
- 4 – регулятор потужності електронагріву; 5,9 – підведення струму;
- 6,8,14,15 – цифрові індикатори; 11 – тумблер живлення вентилятора;
- 12 – регулятор потужності вентилятора; 13 – трубка Піто;

Робоча ділянка установки являє собою трубку з нержавіючої сталі 1 з внутрішнім діаметром $d=8,5\pm 0,01$ мм, через яку за допомогою вентилятора з електродвигуном продувається повітря. Витрата (і швидкість) повітря змінюється регулятором напруги в мережі вентилятора 12 і контролюється трубкою Піто 13. Перепад тиску (динамічний напір) ΔH , який вимірюється трубкою Піто, реєструється цифровим індикатором 14. Нагрів робочої ділянки трубки (на

довжині $l=720$ мм) здійснюється електричним струмом і регулюється автотрансформатором 4. Напруга U реєструється цифровим індикатором 6. Електричний опір трубки R дорівнює $0,0344$ Ом.

Спад тиску за рахунок гідравлічного опору на робочій ділянці ΔP реєструється цифровим індикатором 15.

Температура повітря на вході t_{p1} , і на виході t_{p2} вимірюється датчиками температур 2 і 10; температура стінки трубки вимірюється десятьма датчиками 7, які розташовані на зовнішній поверхні трубки.

Покази всіх датчиків температур виводяться послідовно через перемикачі на цифровий індикатор 8.

Покази цифрових індикаторів U , ΔH , ΔP , t_i на пульті керування дублюються на екрані телевізійного монітору.

Координати датчиків температур x_i , які встановлені на трубці і відраховуються від входу в трубку, і довжини ділянок L_i , які відповідають i -у датчику, наведені в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Координати термопар на трубці x_i і довжина ділянок L_i

№ ділянки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ термопар	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
x_i	25	45	85	155	250	370	490	610	695	715
L_i	25	30	55	82,5	107,5	120	120	102,5	52,5	25

4.3 ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1 В рекомендованому діапазоні основних режимних параметрів (напруга на трубці Піто $U=1,1; 1,3; 1,5; 1,7$ В і перепад тисків $\Delta H=200; 400; 800; 1000$ Па) вибирається один з варіантів проведення досліду. При цьому на екрані монітору вивічується схема експериментальної установки з відображенням на ній регулюючих і вимірювальних пристроїв, а також процесу руху повітря в трубці на робочих режимах.

2 Перед початком досліду необхідно встановити регулятори електронагріву і витрати на пульті керування в початкове положення поворотом до упору проти годинникової стрілки. Після цього вмикаються тумблери живлення електродвигуна 11, нагрівника 4 і можна розпочати проведення досліду.

3 Для вибраного режиму спочатку (для запобігання перегріву робочої ділянки) встановлюється рекомендована витрата повітря, яка визначається величиною перепаду ΔH на трубці Піто. Значення величини ΔH контролюється за цифровим індикатором 14 на пульті керування або на екрані монітора. Після цього встановлюється рекомендована напруга U електронагріву, значення якої контролюється за цифровим індикатором 6 на пульті або на екрані монітора.

4 Для встановленого режиму вимірюється спад тиску на ділянці нагріву ΔP (за цифровим індикатором або на екрані монітору), і записуються покази всіх дванадцяти датчиків температур, послідовно підключених з допомогою перемикачів до цифрового індикатора 8. Покази термопар (в °C) дублюються на екрані монітору.

6 Результати вимірів записуються в протокол (табл. 3.2).

7 По закінченню експерименту виконується перевід всіх регулювальних органів у вихідне положення.

Таблиця 4.2.

Результати досліджу

Барометричний тиск $B =$

Температура в приміщенні $t_{306} =$

U	ΔH	ΔP	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
B	Pa	Pa	°C											

4.4 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДУ

1 Визначається тепловий потік за відомою формулою

$$Q = \frac{U^2}{R}, \tag{4.4}$$

2 Підраховується масова витрата повітря за формулою

$$G = \mu \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{нов}^{вих} \cdot \Delta H}, \tag{4.5}$$

де B – барометричний тиск в Паскалях (1 мм.рт.ст.=133,3 Па);

$\mu = 0,63$ – коефіцієнт, який отриманий таруванням;

$\rho_{нов}^{вих} = \frac{B - \Delta P}{R \cdot (t_{12} + 273)}$ - густина повітря на виході з труби, $кг/м^3$;

$R = 287 \text{ Дж}/(кг \cdot K)$ - газова постійна повітря.

3 Визначається середня температура повітря

$$t_{нов} = \frac{1}{2} \cdot (t_1 + t_{12}). \quad (4.6)$$

4 Розраховується середня густина повітря

$$\rho_{нов} = \frac{B}{R \cdot (t_{нов} + 273)}. \quad (4.7)$$

5 Визначається число Рейнольдса і середня швидкість w на ділянці нагріву за формулами

$$Re = \frac{w \cdot d}{v_{нов}} = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d \cdot \rho_{нов} \cdot v_{нов}}, \quad (4.8)$$

$$w = \frac{Re \cdot v_{нов}}{d}, \quad (4.9)$$

де $v_{нов}$ - кінематична в'язкість повітря при температурі $t_{нов}$, вибирається з табл. Д1.

6 Обчислюються значення температурного напору Δt_i в перерізах трубки з координатами x_i (табл. 4.1):

$$\Delta t_i = (t_i - t_1) - \frac{t_{12} - t_1}{720} \cdot x_i. \quad (4.10)$$

7 Визначаються локальні значення коефіцієнта тепловіддачі α_i за співвідношенням

$$\alpha_i = \frac{Q - Q_{emp}}{\Delta t_i \cdot \pi \cdot d \cdot l}, \quad (4.11)$$

де Q_{emp} – втрати тепла з зовнішньої поверхні трубки:

$$Q_{emp} = k \cdot (\overline{t_{нов}} - t_1), \quad (4.12)$$

$k=0,18$ – коефіцієнт, визначений дослідним шляхом; $\overline{t_{нов}} = 0,1 \cdot \sum_{i=2}^{11} t_i$

- середня температура стінки трубки;

8 За отриманими значеннями α_i будується графік $\alpha=f(x)$.

9 Визначаються середнє значення коефіцієнта тепловіддачі і критерій Нуссельта за дослідними даними

$$\overline{\alpha} = \sum_{i=3}^{10} \alpha_i \cdot L_i / \sum_{i=3}^{10} L_i. \quad (4.13)$$

Крайні значення α_2 та α_{11} виключаються, через вплив втрат тепла із торців робочої ділянки. Значення L_i наведені в табл. 4.1.

$$Nu = \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{нов}} \cdot d. \quad (4.14)$$

Коефіцієнт теплопровідності повітря $\lambda_{нов}$ наведений в табл. Д1.

10 Визначаються розрахункові значення критерію Нуссельта:

1) При вимушеному турбулентному русі ($Re \geq 10^4$, $Pr \geq 0,7$) на основній ділянці труби критеріальна залежність має вигляд:

$$Nu_p = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr_{нов}^{0,43}. \quad (4.15)$$

2) При менших значеннях числа Re, тобто в перехідній області руху ($2300 \leq Re < 10^4$) тепловіддача може бути розрахована за рівнянням

$$Nu_p = f(Re) \cdot Pr_{нов}^{0,48}, \quad (4.16)$$

де $f(Re)$ – функція, яка залежить від числа Re:

Re	2300	2500	3000	3500	4000	5000
$f(Re)$	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5

Re	6000	7000	8000	9000	10^4
$f(Re)$	20	24	27	30	$0,021 \cdot Re^{0,8}$

11 За даними дослідів розраховується коефіцієнт гідравлічного опору трубки за формулами

$$\xi = \frac{\Delta P_{mp}}{w^2} \cdot \frac{2}{\rho_{нов}} \cdot \frac{d}{l}, \quad (4.15)$$

де $\Delta P_{mp} = \Delta P - \Delta P_{np} = \Delta P - w^2 \cdot \rho_{нов} \cdot \frac{t_{12} - t_1}{t_{нов} + 273}$ - спад тиску за

рахунок тертя; ΔP_{np} - втрата тиску на прискорення потоку повітря.

12 Отримане значення коефіцієнта гідравлічного опору порівнюємо з розрахунковим, визначеним за формулою Блазіуса:

$$\xi_{роз} = \frac{0,316}{Re^{0,25}}. \quad (4.16)$$

13 Розраховується критерій Нуссельта за формулою, отриманою на основі гідродинамічної теорії теплообміну

$$Nu'_p = \frac{\xi_{роз}}{8} \cdot Re \cdot Pr_{нов}^{0,43} . \quad (4.17)$$

Розраховані величини Nu_p та Nu'_p порівнюються з отриманим в експерименті Nu .

Результати розрахунків записуються в таблицю 4.3.

Таблиця 4.3

Результати обробки дослідних даних

Q	$\rho_{нов}^{гнх}$	G	$t_{нов}$	$\rho_{нов}$	$\bar{\alpha}$	Nu	Nu_p	ξ	$\xi_{роз}$	Nu'_p
Bm	$кг/м^3$	$кг/с$	$^{\circ}C$	$кг/м^3$	$Bm/(м^2 \cdot K)$	-	-	-	-	-

$\frac{\Delta t_2}{\alpha_2}$	$\frac{\Delta t_3}{\alpha_3}$	$\frac{\Delta t_4}{\alpha_4}$	$\frac{\Delta t_5}{\alpha_5}$	$\frac{\Delta t_6}{\alpha_6}$	$\frac{\Delta t_7}{\alpha_7}$	$\frac{\Delta t_8}{\alpha_8}$	$\frac{\Delta t_9}{\alpha_9}$	$\frac{\Delta t_{10}}{\alpha_{10}}$	$\frac{\Delta t_{11}}{\alpha_{11}}$
$^{\circ}C$									
$Bm/(м^2 \cdot K)$									

4.5 КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Що таке тепловіддача?
2. Закон Ньютона-Ріхмана. Який фізичний зміст коефіцієнта тепловіддачі?
3. Числа і критерії подібності.
4. Критеріальні рівняння.
5. Режими руху рідини в трубах, їх вплив на інтенсивність тепловіддачі.

ДОДАТКИ

Таблиця Д1

Фізичні властивості води на лінії насичення

t , °C	ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	c_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	$\lambda \cdot 10^2$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$	$\alpha \cdot 10^8$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6$, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
0	999,9	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	13,67
10	999,7	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	9,52
20	998,2	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	7,02
30	995,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	5,42
40	992,2	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	4,31
50	988,1	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	3,54
60	983,2	4,179	65,9	16	469,4	0,478	2,98
70	977,8	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	2,55
80	971,8	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	2,21
90	965,3	4,208	68	16,8	314,9	0,326	1,95
100	958,4	4,22	68,3	16,9	282,5	0,295	1,75
110	951	4,233	68,5	17	259	0,272	1,6
120	943,1	4,25	68,6	17,1	237,4	0,252	1,47
130	934,8	4,266	68,6	17,2	217,8	0,233	1,36
140	926,1	4,287	68,5	17,2	201,1	0,217	1,26
150	917	4,313	68,4	17,3	186,4	0,203	1,17
160	907,4	4,346	68,3	17,3	173,6	0,191	1,1
170	897,3	4,38	67,9	17,3	162,8	0,181	1,05
180	886,9	4,417	67,4	17,2	153	0,173	1
190	876	4,459	67	17,1	144,2	0,165	0,96
200	863	4,505	66,3	17	136,4	0,158	0,93
210	852,8	4,555	65,5	16,9	130,5	0,153	0,91
220	840,3	4,614	64,5	16,6	124,6	0,149	0,89
230	827,3	4,681	63,7	16,4	119,7	0,145	0,88
240	813,6	4,756	62,8	16,2	114,8	0,141	0,87
250	799	4,844	61,8	15,9	109,9	0,137	0,86
260	784	4,949	60,5	15,6	105,9	0,135	0,87
270	767,9	5,07	59	15,1	102	0,133	0,88
280	750,7	5,23	57,4	14,6	98,1	0,131	0,9
290	732,3	5,485	55,8	13,9	94,2	0,129	0,93
300	712,5	5,736	54	13,2	91,2	0,128	0,97
310	691,1	6,071	52,3	12,5	88,3	0,128	1,03
320	667,1	6,574	50,6	11,5	85,3	0,128	1,11
330	640,2	7,244	48,4	10,4	81,4	0,127	1,22
340	610,1	8,165	45,7	9,17	77,5	0,127	1,39
350	574,4	9,504	43	7,88	72,6	0,126	1,6
360	528	13,984	39,5	5,36	66,7	0,126	2,35
370	450,5	40,321	33,7	1,86	56,9	0,126	6,79

Таблиця Д2

Фізичні параметри сухого повітря
при $B=10,13 \cdot 10^4 \text{ Па}$ (760 мм.рт.ст.)

t , $^{\circ}\text{C}$	ρ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	c_p , $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\lambda \cdot 10^2$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$a \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu \cdot 10^6$, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6$, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,17	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,1	17,66	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,15	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,64	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,13	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,62	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,11	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,97	28,6	20,60	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,09	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,48	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,88	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,86	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,74	27,8	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,52	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,31	32,49	0,681
200	0,776	1,026	3,93	51,4	26,00	34,85	0,680
250	0,674	1,058	4,27	61,0	28,40	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,70	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,40	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,00	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,39	0,699

Таблиця Д3

Фізичні параметри двоокису вуглецю
при $V=10,13 \cdot 10^4$ Па (760 мм.рт.ст.)

$T,$ K	$\rho,$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	$\lambda \cdot 10^2,$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot K}$	$\mu \cdot 10^6,$ $\frac{H \cdot c}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6,$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$a \cdot 10^6,$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
300	1,773	0,851	1,66	14,92	8,42	11,0	0,77
350	1,517	0,900	2,04	17,21	11,34	14,9	0,76
400	1,326	0,942	2,43	19,39	14,62	19,5	0,75
450	1,176	0,981	2,83	21,49	18,24	24,5	0,74
500	1,059	1,02	3,25	23,31	22,01	30,1	0,73
550	0,962	1,05	3,66	25,39	26,39	36,2	0,73
600	0,883	1,08	4,07	27,22	30,83	42,7	0,72
650	0,814	1,10	4,45	28,98	35,6	49,7	0,72
700	0,756	1,13	4,81	30,63	40,52	56,3	0,72

Таблиця Д4

Фізичні параметри азоту
при $V=10,13 \cdot 10^4$ Па (760 мм.рт.ст.)

$T,$ K	$\rho,$ $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$c_p,$ $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot K}$	$\lambda \cdot 10^2,$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot K}$	$\mu \cdot 10^6,$ $\frac{H \cdot c}{\text{м}^2}$	$\nu \cdot 10^6,$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$a \cdot 10^6,$ $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
300	1,123	1,041	2,59	17,82	15,87	22,15	0,716
350	0,962	1,042	2,93	20,0	20,79	29,23	0,711
400	0,842	1,045	3,27	22,04	26,18	37,16	0,705
450	0,749	1,05	3,58	23,96	31,99	45,52	0,703
500	0,674	1,056	3,89	25,57	37,94	54,65	0,694
550	0,612	1,065	4,17	27,47	44,89	63,98	0,702
600	0,561	1,075	4,46	29,08	51,84	73,95	0,701
650	0,518	1,086	4,72	30,62	59,11	83,9	0,705
700	0,481	1,098	4,99	32,1	66,74	94,48	0,706

ЛІТЕРАТУРА

1. Погорелов А. І. Тепломасообмін (основи теорії та розрахунку) : навчальний посібник для вузів. Львів : Новий Світ-2000, 2006. 144 с.
2. Константінов С. М. Тепломасообмін : підручник. К. : ВПІ ВПК «Політехніка»: Інрес, 2005. 304 с.: іл.
3. Буляндра О. Ф. Технічна термодинаміка : підручник для студентів енергетичних спец. вищ. навч. закл. / 2-ге вид. випр. К. : Техніка, 2006. 320с.
4. Приходько М. А., Герасимов Г. Г. Технічна термодинаміка та теплопередача : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2008. 250 с. URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/1847>