

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
щодо виконання лабораторних робіт
з дисципліни «Основи теплотехніки і гідравліки»
для студентів спеціальностей
131 «Прикладна механіка»,
133 «Галузеве машинобудування»
(освітні програми «Обладнання та технології ливарного
виробництва», «Технології машинобудування», «Металорізальні
верстати та системи», «Підйомно-транспортні, дорожні,
будівельні, меліоративні машини і обладнання»)
всіх форм навчання

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з дисципліни «Основи теплотехніки і гідравліки» для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» (освітні програми «Обладнання та технології ливарного виробництва», «Технології машинобудування», «Металорізальні верстати та системи», «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання») всіх форм навчання / Укл.: Н. О. Євсєєва, Р. Ф. Сухонос. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 65 с.

Укладачі: Н.О. Євсєєва, к.т.н., доцент кафедри ДВЗ
Р.Ф. Сухонос, магістр, ст. викл. кафедри ДВЗ

Рецензент: В. В. Луцьов, д.т.н., професор каф. М і ТЛВ

Відповідальний
за випуск: Г. І. Слинько, д.т.н., професор

Затверджено
на засіданні кафедри «Двигуни внутрішнього згорання»
протокол № 10 від 20 червня 2018 р.

Рекомендовано до видання
НМК машинобудівного факультету
протокол № 1 від 12 вересня 2018 р.

Рекомендовано до видання
НМК інженерно-фізичного факультету
протокол № 10 від 12 червня 2018 р.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ – ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТИСКУ	6
1.1 Мета роботи	6
1.2 Загальні відомості	6
1.2.1 Визначення температури, тисків, одиниці вимірювання	6
1.2.2 Основне рівняння гідростатики.	9
1.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання	9
1.4 Контрольні запитання	17
1.5 Порядок виконання лабораторної роботи	17
1.6 Зміст звіту	18
1.7 Рекомендована література	19
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 ГРАФІЧНА ІЛЮСТРАЦІЯ РІВНЯННЯ Д. БЕРНУЛЛІ	20
2.1 Мета роботи	20
2.2 Загальні відомості	20
2.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання	21
2.4 Контрольні запитання	22
2.5 Порядок виконання лабораторної роботи	23
2.6 Зміст звіту	24
2.7 Рекомендована література	27
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИТРАТИ ПІД ЧАС ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ ТА НАСАДКИ	28
3.1 Мета роботи	28
3.2 Загальні відомості	28
3.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання	30
3.4 Контрольні запитання	31
3.5 Порядок виконання лабораторної роботи	31
3.6 Зміст звіту	33
3.7 Рекомендована література	34

4	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА	35
4.1	Мета роботи	35
4.2	Загальні відомості	35
4.3	Матеріали, інструмент, прилади, обладнання	36
4.4	Контрольні запитання	37
4.5	Порядок виконання лабораторної роботи	38
4.6	Зміст звіту	38
4.7	Рекомендована література	41
5	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ І ВИТРАТИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАНДАРТНОЇ ДІАФРАГМИ ТА ПНЕВМОМЕТРИЧНОЇ ТРУБКИ ПІТО-ПРАНДТЛЯ	42
5.1	Мета роботи	42
5.2	Загальні відомості	42
5.3	Матеріали, інструмент, прилади, обладнання	46
5.4	Контрольні запитання	48
5.5	Порядок виконання лабораторної роботи	49
5.6	Зміст звіту	50
5.7	Рекомендована література	53
6	ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЦИЛІНДРА ВІЛЬНОЮ ТА ВИМУШЕНОЮ КОНВЕКЦІЄЮ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ ОБТІКАННІ ЦИЛІНДРА ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ	54
6.1	Мета роботи	54
6.2	Загальні відомості	54
6.3	Матеріали, інструмент, прилади, обладнання	59
6.4	Контрольні запитання	61
6.5	Порядок виконання лабораторної роботи	61
6.6	Зміст звіту	62
6.7	Рекомендована література	65

ВСТУП

Згідно навчального плану спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» (освітні програми «Обладнання та технології ливарного виробництва», «Технології машинобудування», «Металорізальні верстати та системи», «Підйомно-транспортні, дорожні, будівельні, меліоративні машини і обладнання») передбачено виконання студентами лабораторних робіт з дисциплін «Основи теплотехніки і гідравліки». Задачею цих робіт є опанування методами експериментального дослідження параметрів течії рідини, експериментального дослідження гідравлічних процесів.

У поданих методичних вказівках наведено деякі загальні відомості, завдання на підготовку до лабораторних робіт, контрольні запитання для самоперевірки і контролю підготовленості студентів до роботи, опис матеріалів, інструменту, приладів та обладнання, заходів безпеки та порядку виконання лабораторних робіт.

Перший етап дослідження повинен бути пов'язаним з усвідомленням змісту та переліку введених характеристик, понять і співвідношень між ними, які витікають з їх визначення або умов постановки задач у досліджах, або за допомогою вихідних постулатів теорії.

Звіти про виконання лабораторної роботи студенти оформлюють згідно з вимогами чинних стандартів щодо оформлення науково-технічної документації та рекомендаціями, наведеними у поданих методичних вказівках, і представляють до захисту у термін, визначений графіком проведення лабораторних робіт.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТАНУ ТЕРМОДИНАМІЧНОЇ СИСТЕМИ – ТЕМПЕРАТУРИ ТА ТИСКУ

1.1 Мета роботи

Метою роботи є ознайомлення з теоретичними положеннями, на основі яких проводяться вимірювання температури та тиску у техніці та експериментальних дослідженнях, придбання навичок у роботі з вимірювальними приладами

1.2 Загальні відомості

1.2.1 Визначення температури, тисків, одиниці вимірювання

Температурою називають величину, яка характеризує тепловий стан тіла. Температура – це фізична величина, яка характеризує стан термодинамічної рівноваги макроскопічної системи. Температура тіла пов'язана з кінетичною енергією молекул, тому вона не може бути виміряною безпосередньо, а вимірюється тільки як деяка функція інших параметрів, які піддаються прямому вимірюванню.

Хоча багато фізичних величин залежать від температури, далеко не всі з них можуть бути використаними для її вимірювання. Вибір так званого термометричного параметра, за вимірюванням якого можна судити про температуру, робиться з урахуванням певних вимог.

Обраний параметр повинен:

- змінюватись зі зміною температури безперервно, рівномірно та однозначно;
- не залежати від інших параметрів;
- бути точно відтворюваним та вимірюватись простим і надійним способом.

Усі реальні термометричні параметри дещо відхиляються від вищевказаних вимог. Із деякими припущеннями у вимірювальній практиці як термометричні використовуються такі параметри: тиск або об'єм газів, об'єм рідини, електричний опір провідників та напівпровідників, термо-е.р.с. тощо.

При градуюванні всіх термометрів за основу приймається термодинамічна шкала температур. Це пояснюється наступними

причинами. Термометричні параметри по-різному залежать від температури для різних речовин. Тому числові значення температури, які вимірюються ртутними, спиртовими термометрами або платиновою термопарою, не будуть однаковими. Тобто при вимірюванні однієї і тієї ж температури буде одержано стільки ж значень, скільки речовин використовується як термометричні. Отже усі температурні шкали, які побудовані на основі таких вимірювань, умовні. Для однозначного визначення температури необхідно вибрати такий параметр, який не залежав би від природи речовини.

Таким параметром є ККД теплової машини Карно. Температурна шкала, що побудована на основі функціональної залежності ККД від температури, називається термодинамічною або абсолютною.

Фізичний зміст *абсолютної шкали* полягає в тому, що найнижча температура за цією шкалою відповідає такій температурі охолоджувача у циклі Карно, при якій його ККД дорівнює 1 (одиниці).

Основними точками термодинамічної шкали є найнижча можлива температура – абсолютний нуль та потрійна точка води – 273,16 К, де К (Кельвін) – одиниця вимірювання температури згідно з термодинамічною шкалою, що прийнята в Міжнародній системі одиниць SI. Прийнята також стоградусна (практична) шкала, яка має таку ж саму одиницю вимірювання, але другий початок відліку – точка танення льоду (273,15 К); градус цієї шкали позначається °С.

Тиск – це напруга нормальної поверхневої сили, тобто нормальна сила, що діє на одиницю площі поверхні. Розрізняють абсолютний та надлишковий тиски, що пов'язано з вибором системи відліку. **Абсолютний** або **повний** тиск – це дійсна напруга стиснення у рідині чи газі. Цей тиск відлічується від абсолютного нуля, тому завжди $p_{абс} > 0$. Визначення надлишкового (манометричного та вакуумметричного) тиску пов'язано з уявленням атмосферного тиску. **Атмосферний тиск** – це тиск, що діє на земну поверхню з боку атмосферного шару. Величина цього тиску мінлива і залежить, головним чином, від висоти над рівнем моря та метеорологічних умов. Середній за часом тиск на рівні моря називають **нормальним атмосферним тиском**. Величина його незмінна і дорівнює:

$$p_{атм}^{н.у.} = 760 \text{ мм Hg} = 101325 \text{ Па} = 10332 \text{ кг/м}^2.$$

Надлишковий тиск – це тиск, який відлічується від атмосферного тиску. Надлишковий тиск може бути як додатним (**манометричним**), так і від’ємним (**вакуумметричним**). **Вакуумметричний тиск** (розрідження) – це від’ємний надлишковий тиск. Зв’язок між вакуумметричним та надлишковим тисками встановлюється співвідношенням: $p_{\text{вак}} = -p_{\text{надл}}$. Величини $p_{\text{вак}}$ та p_m мають спільний початок відліку: $p_{\text{атм}}$. В області додатних значень теоретично на величину p_m не накладається ніяких обмежень. Уявлення $p_{\text{вак}}$ використовується лише в тих випадках, коли абсолютний тиск у гідросистемі менше ніж $p_{\text{атм}}$. Максимально можлива величина вакууму не перевищує атмосферного тиску. Зв’язок між абсолютним та надлишковим тисками встановлюється співвідношенням:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{атм}} + (\pm p_{\text{надл}}) \quad (1.1)$$

У міжнародній системі одиниць (SI) для вимірювання тиску використовується Паскаль: **Па** = **Н/м²**. Крім того, ще експлуатуються прилади для вимірювання тиску, шкали яких градуйовані у позасистемних одиницях, які допускалися до застосування до 1.01.1975 року, а саме: **торр** = **1 мм Hg (1 мм рт. ст.)**; **ат** = **1 кГс/см²** (технічна атмосфера); **м (мм) H₂O** (метр водяного стовпа). Більшість приладів для вимірювання тиску іноземного виробництва мають шкали, для поділу яких застосовується така одиниця як **бар**. Співвідношення між названими одиницями вимірювання тиску наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Співвідношення між системними та позасистемними одиницями вимірювання тиску

Одиниці	Па	кГс /см ²	торр	мм H ₂ O	бар
Па	1	1,02·10 ⁻⁵	7,50·10 ⁻³	0,102	10 ⁻⁵
кГс /см ²	9,81·10 ⁴	1	736	10 ⁴	0,981
торр	133	13,6·10 ⁻⁴	1	13,6	13,3·10 ⁻⁴
мм H ₂ O	9,81	10 ⁻⁴	7,36·10 ⁻²	1	9,81·10 ⁻⁵
бар	10 ⁵	1,02	750	10,2·10 ³	1

1.2.2 Основне рівняння гідростатики.

Тиски у двох точках, що розташовані в однорідній рідині у спокої, пов'язані за допомогою **основного рівняння гідростатики**:

$$p_m = p_n \pm \rho g h, \quad (1.2)$$

де m та n – позначення точок;

ρ – густина рідини, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – відстань між точками уздовж вертикалі, м.

У рівнянні (1.2) p_m та p_n обов'язково є однойменними тисками (обидва абсолютні, або обидва надлишкові). Знак перед другим доданком у формулі (1.2) залежить від взаємного розташування точок: якщо точка m розташована нижче, ніж точка n , то становиться знак «плюс». При зміні взаємного розташування точок змінюється також знак у рівнянні.

Для системи, що складається з різнорідних рідин, розрахункову формулу для визначення тиску одержують послідовним застосуванням рівняння (1.2) для кожної пари точок, що містяться в однорідному середовищі. Методику виведення розрахункових формул для рідинних систем (різних приладів) наведено далі.

1.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

Вибір того чи іншого параметра визначає засіб вимірювання температури. У залежності від умов експерименту (інтервал вимірюваних температур, властивості середовища, вимоги до точності та інші) використовуються різні прилади для вимірювання температури.

Рідинні термометри, що засновані на залежності об'єму рідини від температури, використовуються для вимірювання температур від -200 до $+1200$ °С, мають просту будову і не потребують допоміжної апаратури. Як рідини використовують ртуть, спирт, пентан тощо.

Термоелектричні перетворювачі – термопари, які представляють собою комбінацію спаїв різнорідних матеріалів, у яких виникаюча термо-е.р.с. пропорційна різниці температур спаїв (ефект

Зеебека), дозволяють вимірювати температуру від $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+2500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

У 1821 р. Т. Зеебеком було встановлено, що у замкненому електричному ланцюгу, який складений з послідовно з'єднаних провідників із різних матеріалів, виникає електрорушійна сила (е.р.с.), якщо у місцях контактів або спаїв підтримуються різні температури.

Це явище, яке назване термоелектричним ефектом Зеебека, покладено в основу принципу дії термоелектричних перетворювачів або термопар. Термо-е.р.с. термопари невелика ($0,01\dots 0,06\text{ мВ}$ на один градус), тому її вимірюють високочутливими мілівольтметрами або потенціометрами, які забезпечують достатню точність для практики.

До позитивних якостей термопар відноситься: простота виготовлення, невеликі розміри спаю, мала теплоємність термочутливого елемента – спаю, невеликий час установаження теплової рівноваги між спаєм і середовищем.

Негативна якість (недолік) термопар – невелика величина термо-е.р.с. при низьких температурах і у зв'язку з цим труднощі вимірювання їх. Зі зниженням температури термо-е.р.с. у спаї зменшується і перетворюється в нуль при температурі, що близька до абсолютного нуля. Тому чутливість термопари зі зниженням температури швидко падає.

Найпростіша схема з'єднання термоелементів для вимірювання температур спаїв показана на рисунку 1.1.

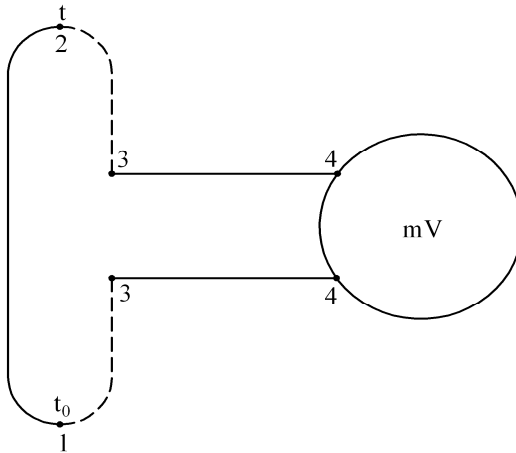


Рисунок 1.1 – Схема термоелектричного перетворювача

Термометри опору використовуються у діапазоні температур від -270 до 1100 $^{\circ}\text{C}$, забезпечуючи високу точність та надійність вимірювання. Дія термометрів опору основана на властивості матеріалів змінювати електричний опір зі зміною температури за визначеним певним законом.

При приблизних вимірюваннях (похибка більше $0,01$ $^{\circ}\text{C}$) ця залежність приймається лінійною, при більш точних вимірюваннях використовуються нелінійні залежності.

Відрізняють **провідникові та напівпровідникові термометри опору**. Термометри опору провідникові виготовляють з мідного (ТОМ), платинового (ТОП) або нікелевого дроту товщиною $0,05 \dots 0,50$ мм, який навивається на ізольований каркас і вміщується в металевий чохол. Цей пристрій має чотири виводи: два – для пропускання струму, що вимірюється; два – для вимірювання падіння напруги на термоопорі.

Пірометри випромінювання (оптичні, радіаційні, колірні) служать для вимірювання температур вище 500...6000 °С. Вони працюють за принципом вимірювання випромінювальної нагрітими тілами енергії, яка змінюється в залежності від температури цих тіл.

За принципом дії прилади тиску поділяються на рідинні, механічні та спеціальні (електричні, пневматичні і т.д.). В даній лабораторній роботі розглядаються прилади перших двох типів.

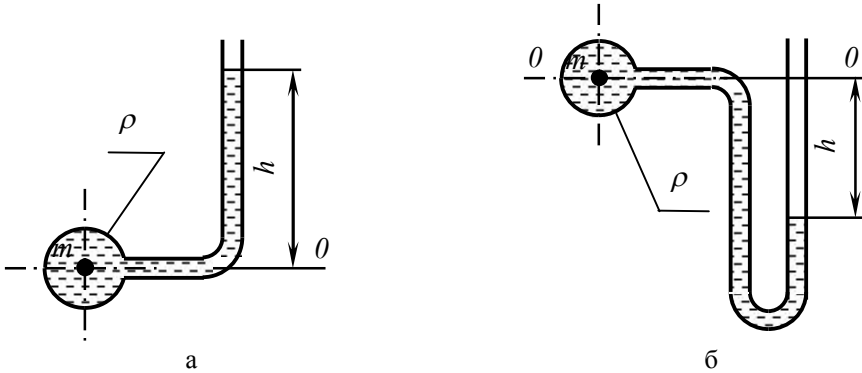
У залежності від призначення прилади тиску мають різні назви: **барометр** – для визначення атмосферного тиску; **манометр** – для надлишкового та абсолютного тисків; **вакуумметр** – для вакуумметричного тиску; **мановакуумметр** – для надлишкового та вакуумметричного тисків; **мікроманометр** – для вимірювання малих тисків; **диференціальний манометр** – для вимірювання різниці тисків.

Рідинні прилади тиску складаються з однієї, чи декількох трубок, які заповнені рідиною. Для того, щоб капілярні ефекти суттєво не впливали на точність вимірювань, використовують трубки з внутрішнім діаметром $d > 5$ мм. У процесі вимірювань фіксують положення видимих менісків (меж розподілу рідин) у трубках. Робочими рідинами часто використовують воду ($\rho = 1000$ кг/м³), спирт ($\rho = 790$ кг/м³), та ртуть ($\rho = 13600$ кг/м³). Рідинні прилади забезпечують високу точність вимірювань. Вони нескладні у виготовленні та використанні. Не потребують тарування (перевірки показань).

Для вимірювання високих тисків рідинні прилади виявляються малоздатними, тому що у цьому випадку вони суттєво ускладнюються (потрібно використовувати багато трубок). Крім того, величина тиску, що вимірюється, обмежується міцністю трубок та надійністю ущільнень. Як правило, рідинні приладі використовують для вимірювання тисків у діапазоні до 0,5 МПа (інколи до 15 МПа).

Дія механічних приладів базується на зв'язку між тиском, що рідина чине на спеціальний чутливий елемент, та деформацією останнього. Механічні прилади дозволяють вимірювати будь-які тиски (практичний діапазон від 50 Па до 1000 МПа), але точність їх нижча, ніж у рідинних приладів. Властивості матеріалу чутливих елементів з бігом часу змінюються, через це такі прилади потребують періодичного тарування (повірки).

Найпростішим приладом для вимірювання надлишкового тиску є *п'езометр* (рис. 1.2). Він являє собою трубку, один кінець якої з'єднується з резервуаром, а другий – відкритий у атмосферу.



а – для манометричних тисків; б – для вакуумметричних тисків

Рисунок 1.2 – П'езометри

Для вимірювання додатного надлишкового (манометричного) тиску п'езометр установлюють згідно зі схемою, наведеною на рисунку 1.2, а. Тоді тиск у заданій точці m розраховують за формулою

$$p_m = \rho \cdot g \cdot h. \quad (1.3)$$

Для вимірювання вакуумметричного тиску п'езометр установлюють згідно зі схемою, наведеною на малюнку 1.2, б. Тоді тиск у заданій точці m розраховують за формулою

$$p_m = -\rho \cdot g \cdot h. \quad (1.4)$$

Для вимірювання як манометричного, так і вакуумметричного надлишкового тиску застосовують *U-подібний манометр* (вакуумметр), схему якого показано на рисунку 1.3.

Спільне розв'язання рівнянь рівноваги рідин на межах розподілу рідин (в точках 1 та 2) дозволяють визначити тиск у заданій точці m за формулою (1.5):

$$p_m = \rho_1 \cdot g \cdot (h_1 + h_2) - \rho_2 \cdot g \cdot h_2 \quad (1.5)$$

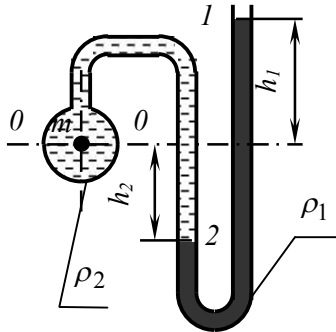


Рисунок 1.3 – U-подібний манометр

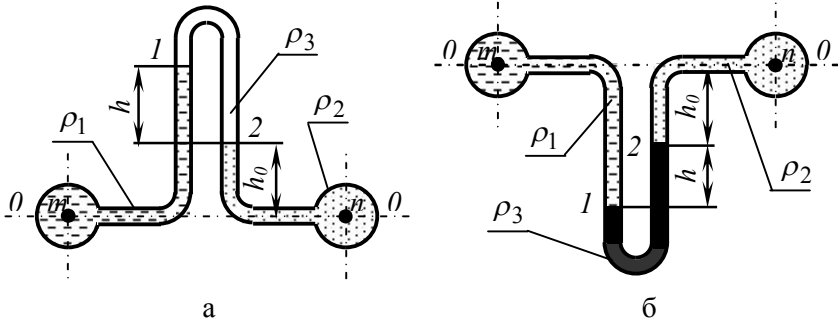
Для вимірювання різниці тисків використовують **диференціальні** манометри, які виконують за різними схемами: рисунок 1.4, а (для випадку $\rho_1 > \rho_3 < \rho_2$) та рисунок 1.4, б (для випадку $\rho_1 < \rho_3 > \rho_2$). Тоді різницю тисків у заданих точках m та n можна розрахувати за формулою:

$$\Delta p = p_m - p_n = (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot h_0 + (\rho_1 - \rho_3) \cdot g \cdot h. \quad (1.6)$$

У розповсюдженому випадку, коли $\rho_1 = \rho_2$ (у резервуарах знаходяться однорідні рідини), розрахункову формулу для визначення різниці тисків можна спростити:

$$\Delta p = (\rho_1 - \rho_2) \cdot g \cdot h \quad (1.7)$$

Спростити процедуру вимірювання тисків дозволяють прилади, в яких в одній з трубок встановлена циліндрична чашка великого діаметра. Прикладом може бути **чашковий манометр**, схему якого показано на рисунку 1.5. Такий прилад нагадує U-подібний манометр. Але завдяки тому, що $D \gg d$, межа розподілу рідин у чашці практично нерухома, і тому достатньо зробити лише одне вимірювання відстані h .



а – для рідини-посередника незначної густини;
б – для рідини-посередника значної густини.

Рисунок 1.4 – Диференціальний манометр

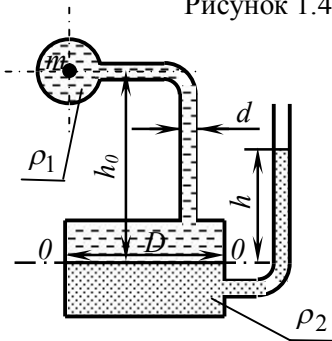


Рисунок 1.5 – Чашковий манометр

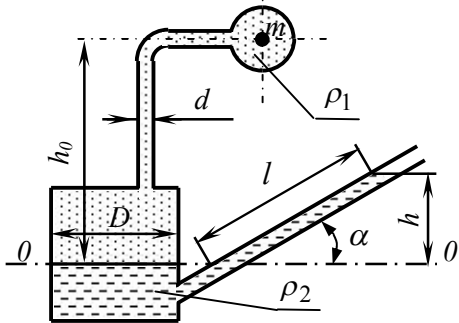


Рисунок 1.6 – Мікроманометр

Тиск в заданій точці m розраховують за формулою :

$$p_m = \rho_2 \cdot g \cdot h - \rho_1 \cdot g \cdot h_0 \quad (1.8)$$

Для вимірювання високих тисків застосовують **батаре́йний (багатотру́бковий) манометр**, схему якого показано на рисунку 1.7. Послідовне застосування основного рівняння гідростатики для пар точок на межах розподілу рідин в трубках (точки 1 – 4), дозволяє одержати формулу (1.9) для визначення тиску в точці m :

$$p_m = \rho_4 \cdot g \cdot (h_1 + h_2) - \rho_3 \cdot g \cdot (h_2 - h_3) + \rho_2 \cdot g \cdot (h_4 - h_3) - \rho_1 \cdot g \cdot h_4 \quad (1.9)$$

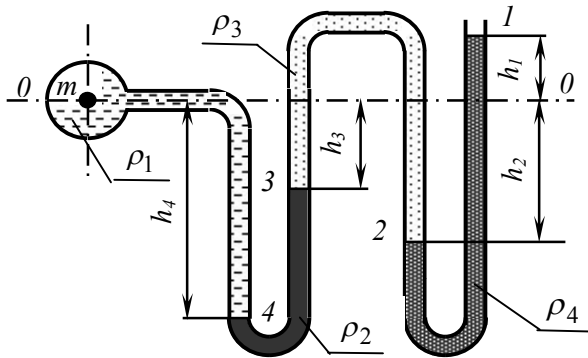
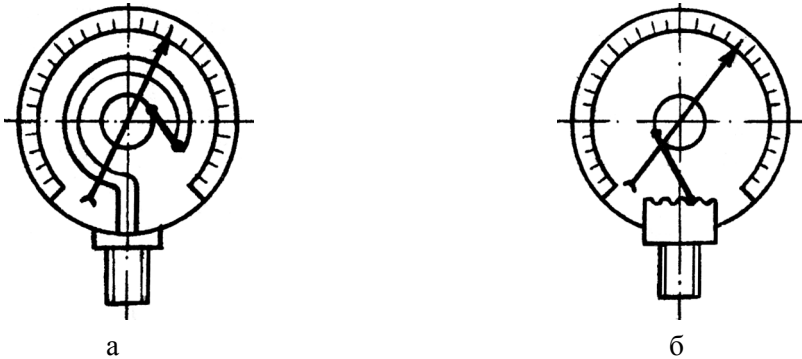


Рисунок 1.7 – Батарейний манометр

Більшість механічних приладів тиску призначено для вимірювання надлишкових (вакуумметричних) тисків.

Чутливий елемент механічного приладу тиску може виготовлятися за різними конструктивними схемами. На малюнку 1.8 наведено два варіанти виготовлення чутливого елемента: вигнута трубка (рис. 1.8, а) та мембрана (рис. 1.8, б).



а – з вигнутою трубкою; б – з мембраною

Рисунок 1.8 – Механічний манометр (вакуумметр)

Вигнута трубка в манометрі має овальний переріз, який під дією тиску змінює свою форму. Це призводить до розгинання (згинання) трубки і відповідного обертання стрілки. Мембрана механічного

манометра може пружно деформуватися під дією тиску, що також призводить до обертання стрілки приладу.

1.4 Контрольні запитання

1. Чи можна ртутним скляним термометром виміряти температуру вищу за температуру кипіння ртуті (356,6 °С)?
2. Який принцип дії термоелектричних перетворювачів або термопар?
3. Який механізм виникання термо-е.р.с.?
4. Які прилади існують для вимірювання температури?
5. Визначення тисків: атмосферного, надлишкового, абсолютного, вакууму, та зв'язок між ними.
6. Одиниці вимірювання тисків, їх класифікація.
7. Основне рівняння гідростатики, його фізична суть (розуміння) та практичне застосування.
8. Розрахункові формули для визначення тиску (чи різниці тисків) у випадку багаторідинних систем.
9. Основні типи приладів, їх позитивні якості, недоліки та галузь застосування.

1.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Ознайомитись з принципами дії термопар, термометрів опору, пірометрів, приладів для вимірювання тиску, принциповою схемою експериментальної установки.

Провести вимірювання температури середовища в різних діапазонах.

Біля експериментальної установки студенти працюють лише під наглядом викладача або лаборанта, суворо дотримуючись вимог інструкції з охорони праці при виконанні робіт в лабораторіях кафедри «Двигуни внутрішнього згорання».

Зафіксувати барометричний тиск p_0 . З'ясувати сорт рідини в гідросистемі. Зафіксувати показання приладу та положення приладу і точки А. Повторити дослід на інших стендах. (Положення точки А та приладу для вимірювання задається викладачем.). Точність для вимірювання величин – ціна поділу шкал приладів.

1.6 Зміст звіту

Вказати тему та мету лабораторної роботи. Записати формули (1.1), (1.2) з поясненням величин, що в них входять.

Змалювати форму протоколу (таблиця 1.2). Занести до протоколу всі величини, визначені з експерименту (дослідні).

Таблиця 1.2 – Форма протоколу

Дослід					Розрахунок				
p_M	H	H_A	ρ	P_0	p_A				
...	м	м	кг/м ³	Па	Па	кГс/см ²	торр	м Н ₂ О	бар

Визначити тиск в заданій точці А, використовуючи показання механічного приладу для вимірювання тиску. Слід пам'ятати, що механічні прилади реєструють тиск (розрідження) у рідині, що має місце безпосередньо біля чутливого елемента. Якщо прилад знаходиться вище, чи нижче точки, у якій вимірюється тиск, то слід врахувати тиск, що обумовлений різницею висот між заданою точкою та чутливим елементом приладу (горизонтальною віссю приладу). Це можна зробити, застосувавши формулу (1.2).

Одержаний результат (величина тиску в точці А) має бути представлений як в одиницях системи SI (Па), так і в позасистемних одиницях вимірювання: технічна атмосфера, торр, м Н₂О, бар. **Величину тиску в заданій точці слід визначити як по надлишковій, так і по абсолютній шкалі.** Для цього необхідно зафіксувати показання барометра і скористатися формулою (1.1). Точність визначення тиску в заданій точці перевіряють безпосереднім вимірюванням тиску в точці А, розташувавши в ній прилад для вимірювання тиску.

1.7 Рекомендована література

1. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. чл.-корр. АН СССР В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. (Гл. 8.2).
2. Температурные измерения: Справочник / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, В. И. Лах и др. – К.: Наукова думка, 1984. – 401 с.
3. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 3–39.
4. Мандрус В. І., Лещій Н. П., Звягін В. М. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади розрахунків. – Львів: Світ, 1995. – С. 4–16.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ГРАФІЧНА ІЛЮСТРАЦІЯ РІВНЯННЯ Д. БЕРНУЛЛІ

2.1 Мета роботи

Ознайомитися зі способом побудови п'єзометричної та напірної лінії для трубопроводів гідросистеми за експериментальними даними. Закріпити методику графічного визначення параметрів потоку рідини.

2.2 Загальні відомості

Рівняння Д. Бернуллі виражає закон *збереження та перетворення енергії* в потоці рідини. Записане в розмірностях питомої енергії (енергії, що віднесена до одиниці ваги, тобто *напорів*), це рівняння для двох перерізів потоку реальної рідини має вигляд:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_{em\ 1-2}, \quad (2.1)$$

або

$$H_1 = H_2 + h_{em\ 1-2}, \quad (2.2)$$

де H_1, H_2 – *повні* напори, м; z_1, z_2 – *геометричні* напори, м;

$p_1/\rho g, p_2/\rho g$ – *п'єзометричні* напори, м; $\alpha_1 v_1^2/2g$,

$\alpha_1 v_1^2/2g$ – *динамічні* напори, м; α_1, α_2 – корективи кінетичної енергії потоку (коефіцієнти Коріоліса), які враховують нееквівалентність значень кінетичної енергії, що розраховується через середню швидкість потоку v , та її дійсного значення. Величина цих коефіцієнтів залежить від закону розподілу місцевих швидкостей у живому перерізі потоку. При ламінарному режимі руху рідини $\alpha = 2$, при турбулентному – $\alpha \cong 1$; $h_{em\ 1-2}$ – *втрати напору* в потоці рідини між перерізами 1-1 та 2-2, м.

Примітка: параметри з індексом 1 відносяться до початкового перерізу потоку (першого по ходу руху), з індексом 2 – до кінцевого (другого по ходу руху рідини).

Втрати напору під час руху між вказаними перерізами $h_{em\ 1-2}$ дорівнюють сумі втрат на тертя на прямолінійних ділянках

(*поздовжні втрати*) та втрат, які пов'язані з деформацією потоку в місцевих опорах (*місцеві втрати*).

Втрати напору на довжині визначають за формулою Дарсі:

$$h_{\text{вм } \partial} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \quad (2.3)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя, величина якого у загальному випадку залежить від числа Рейнольдса Re та відносної шорсткості $\bar{\Delta}$: $\lambda = f(Re; \bar{\Delta})$;

$\bar{\Delta}$: $\lambda = f(Re; \bar{\Delta})$;

l, d – довжина та діаметр прямолінійної ділянки труби, м;

v – середня швидкість потоку на даній ділянці, м/с.

Місцеві втрати напору визначають за формулою Вейсбаха:

$$h_{\text{вм } m} = \zeta \frac{v^2}{2g}, \quad (2.4)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору, величина якого залежить від типу опору та його геометричних характеристик;

v – максимальна середня швидкість у живому перерізі потоку (або до, або після місцевого опору), м/с.

Величина середньої швидкості в живих перерізах потоку визначається з *рівняння нерозривності*:

$$Q = v_1 \cdot \omega_1 = v_2 \cdot \omega_2 = v_i \cdot \omega_i = \text{const}, \quad (2.5)$$

де Q – *об'ємна витрата* рідини, м³/с;

ω – площа *живого перерізу* потоку, м².

Закони змінювання повних напорів та їх складових ілюструються графіками – *п'єзометричною PP* та *напірною EE* лініями, які будують на підставі розрахунку, або за експериментальними даними.

2.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

До напірного баку 1 вода подається з водопроводу через вентиль 2. Наявність зливного вікна 3 у баку дозволяє підтримувати сталий рівень рідини. До напірного баку приєднано трубопровід 4, який складається з труб різних діаметрів. Вентилем 5 здійснюють регулювання витрати в гідросистемі. Вода, що витікає з трубопроводу,

потрапляє у мірний бак 6. До певних перерізів трубопроводу підключено п'єзометри А-И.

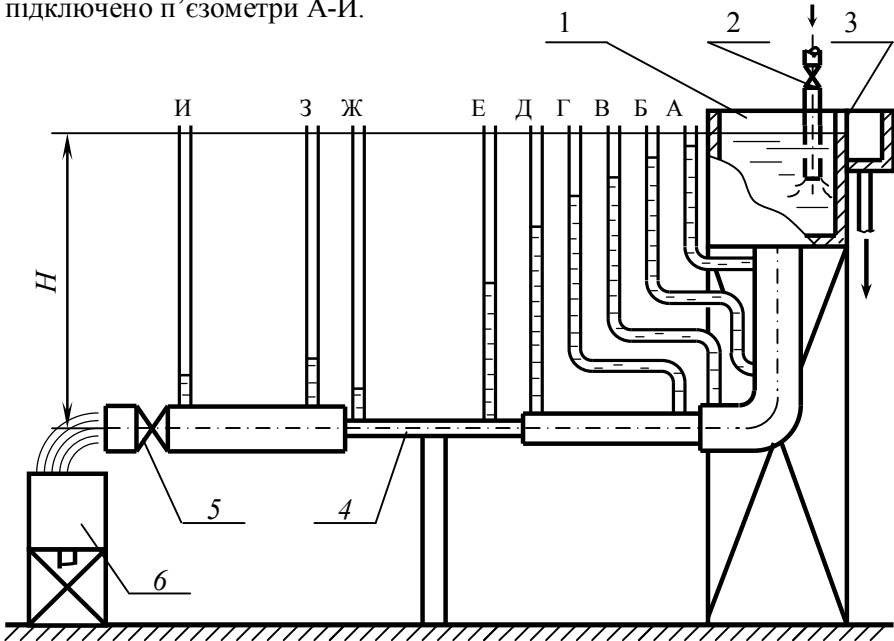


Рисунок 2.1 – Структурна схема експериментальної установки

2.4 Контрольні запитання

1. Пояснити енергетичну суть рівняння Бернуллі.
2. Знати розмірності всіх величин, що входять в рівняння Бернуллі.
3. Пояснити, як виводиться формула для розрахунку величини швидкісного напору в лабораторній роботі.
4. Пояснити причину втрат в потоці та вказати всі втрати напору в лабораторній гідросистемі
5. Вміти показати на графіках складові напору (геометричну, п'єзометричну, статичну, швидкісну) та повний напір для будь-якого перерізу трубопроводу.
6. Вміти визначати втрати напору для будь-якої ділянки трубопроводу

8. Знати структуру установки та методику проведення досліду.

9. Вміти оцінювати вплив ступеню відкриття вентиля 5 на характер напірної та п'єзометричної ліній.

2.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Перед тим, як стати до лабораторної роботи, студентам необхідно засвоїти теоретичний матеріал розділу «Основні рівняння гідродинаміки». Особливу увагу треба приділити проблемам визначення параметрів потоку рідини та їх геометричній інтерпретації. Слід чітко уявляти фізику процесу перетворення енергії в потоці рідини, взаємний вплив параметрів, що його характеризують, а також основні припущення, до яких вдаються у аналітичному описанні процесу руху рідини.

Біля експериментальної установки студенти працюють лише під наглядом викладача або лаборанта, суворо дотримуючись вимог інструкції з охорони праці в лабораторіях кафедри «Двигуни внутрішнього згорання».

Заповнити напірний бак. Для закритого положення вентиля 5 за показаннями п'єзометрів зафіксувати величину наявного напору H .

Змінюючи ступінь відкриття вентилів 2 та 5, у гідросистемі бак–трубопровід забезпечити усталений рух рідини ($Q = const$).

Зафіксувати показання п'єзометрів.

Зачинити зливний отвір у мірному баку та за допомогою секундоміра визначити час заповнювання його водою.

Точність вимірювань має бути не нижчою ніж: 1 мм – для п'єзометрів, 0,2 с – для секундоміра (ціна поділу шкал).

Результати вимірювань занести до протоколу (таблиця 2.1).

В процесі підготовки до лабораторної роботи слід користуватися літературою [1–3], конспектом лекцій, а також даними методичними вказівками.

До початку лабораторної роботи слід також підготувати ілюстративні матеріали, які повинні містити форму протоколу (таблиця 2.1), до якого заноситимуться всі величини, одержані з дослідів та в результаті розрахунків.

Таблиця 2.1 – Форма протоколу

№	H, мм	П'єзометричні напори, h_{pi} , мм						t, с	Динамічні напори, мм		
		Г	Д	Е	Ж	З	И		h_{v1}	h_{v2}	h_{v3}
1											

2.6 Зміст звіту

Вказати тему та мету лабораторної роботи. Записати рівняння (2.1)-(2.5) з пояснюванням величин, що в них входять та зазначенням їх розмірностей. Змалювати форму протоколу (таблиця 2.1). Записати розрахункові формули (2.1), (2.6), (2.7-2.9).

Виконати креслення трубопроводу, дотримуючись рекомендованих масштабів (для побудови графіків відвести по сторінці аркушу з зошита для вертикальної та горизонтальної ділянки трубопроводу) – рисунок 2.2.

Після проведення дослідів та розрахунків заповнити протокол та побудувати п'єзометричну та напірну лінії на кресленні трубопроводу.

Для того, щоб побудувати вказані лінії для горизонтальної ділянки трубопроводу, виконують креслення трубопроводу (рисунок 2), відкладаючи довжини у масштабі 1:20, а діаметри – в масштабі 1:5.

Уздовж горизонтальної осі трубопроводу розташовують **площину відліку** ($z = 0$). Від площини відліку в масштабі 1:10 відкладають у вертикальному напрямку величину наявного напору H та проводять горизонтальну лінію $H = const$ – напірна лінія для нев'язкої рідини ($E'E'$).

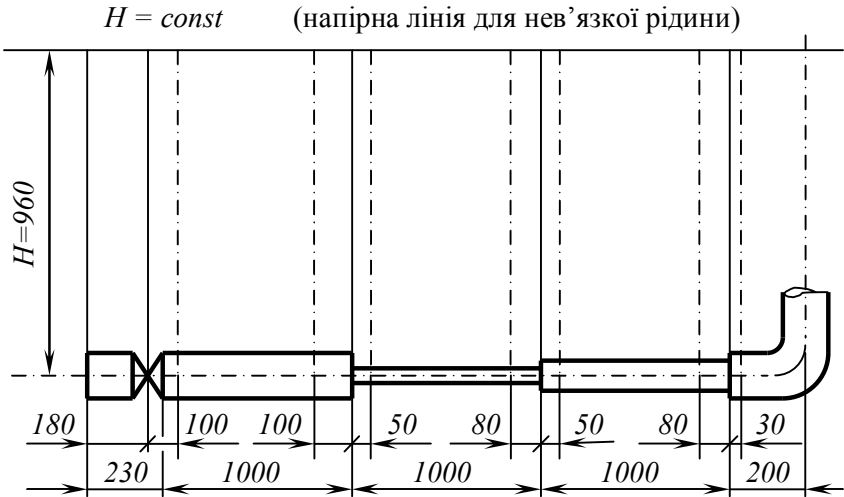


Рисунок 2.2 – Схема горизонтальної ділянки трубопроводу

На ординатах, проведених у місцях підключення п'єзометрів, (в напорів h_{pi} (показання п'єзометрів)). Прямі, що проведені через кожену пару точок (у межах ділянок труб $d_i = const$), утворюють п'єзометричну лінію (PP).

Щоб побудувати напірну лінію для в'язкої рідини (EE), необхідно відкласти від п'єзометричної лінії вгору уздовж вертикалі величини швидкісних напорів h_{vi} (в масштабі 1:10) на кожній прямолинійній ділянці труби, а потім провести прямі лінії, паралельні до п'єзометричної. Граничні точки відрізків прямих з'єднують прямими лініями.

Величини швидкісних напорів розраховують, використовуючи рівняння:

$$h_{vi} = \frac{v_i^2}{2g} = \frac{1}{2g} \cdot \left(\frac{4Q}{\pi d_i^2} \right)^2 = \frac{8}{g\pi^2} \cdot \frac{1}{d_i^4} \cdot Q^2, \quad (2.6)$$

де об'ємну витрату води Q [$\text{м}^3/\text{с}$] визначають через час наповнювання об'єму мірного баку V : $Q = V/t$. Тоді :

$$h_{v_i} = \frac{8V^2}{g\pi^2} \cdot \frac{1}{d_i^4} \cdot \frac{1}{t^2} . \quad (2.6,a)$$

Враховуючи, що об'єм мірного баку $V = 15$ л, а діаметри труб відповідно: $d_1 = d_4 = 25,4$ мм, $d_2 = 20,5$ мм, $d_3 = 14,7$ мм, одержимо :

$$h_{v_1} = h_{v_4} = \frac{44600}{t^2}, \text{ мм} \quad (2.7)$$

$$h_{v_2} = \frac{103280}{t^2}, \text{ мм} \quad (2.8)$$

$$h_{v_3} = \frac{396930}{t^2}, \text{ мм} \quad (2.9)$$

Втрати напору визначаються вертикальними відрізками у полі креслення, яке обмежується напірними лініями для нев'язкої (EE') та в'язкої (EE) рідини.

Для того, щоб побудувати напірну та п'езометричну лінії для вертикальної ділянки трубопроводу, виконують креслення трубопроводу та напірного баку в масштабі 1:10 (рисунок 2.2).

Від вертикальної осі трубопроводу (лінія відліку $O'O'$) в горизонтальному напрямку відкладають величину наявного напору H (в масштабі 1:10) та проводять вертикальну лінію $H = const$ – напірна лінія для нев'язкої рідини (EE'). Через точку перетину продовження лінії рівня рідини у баку та напірної лінії (EE'), а також через точку перетину осей вертикальної та горизонтальної ділянок трубопроводу проводять лінію геометричних напорів (zz).

На горизонтальних лініях, проведених через місця підключення п'езометрів, відкладають виміряні значення п'езометричних напорів h_{pi} (в масштабі 1:10) від лінії (zz) у напрямку лінії (EE'). Лінія, що проведена через пару одержаних точок, є п'езометричною (PP). Напірна лінія для в'язкої рідини (EE) відстоїть від п'езометричної (в горизонтальному напрямку) на величину динамічного напору h_{v1} , яку розраховують за формулою (2.7).

Закінчити звіт необхідно висновками за результатами роботи у відповідності до мети роботи.

2.7 Рекомендована література

1. Башта Т. М. и др. Гидравлика, гидромашини и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 40–164.
2. Лещій Н. П., Мандрус В. І. та ін. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади розрахунків: Навч. посібник для вузів. – Львів, 1995. – С. 31–40, 59–68.
3. Сергель О. С. Прикладная гидрогазодинамика. – М.: Машиностроение, 1981. – С. 38–87.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИТРАТИ ПІД ЧАС ВИТІКАННЯ РІДИНИ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ ТА НАСАДКИ

3.1 Мета роботи

Ознайомитися з методикою експериментального визначення коефіцієнтів витрати отворів та насадків різної конфігурації та провести аналіз величин одержаних коефіцієнтів.

3.2 Загальні відомості

Під час розв'язання задач, пов'язаних з витіканням рідин через отвори та насадки, найважливішою проблемою є визначення швидкості та витрати рідини в процесі витікання. Спільне застосування рівнянь Бернуллі та нерозривності потоку до задач такого класу дозволяє виразити названі параметри потоків за такими формулами:

$$v = \varphi \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3.1)$$

$$Q = \mu \cdot \omega_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H} \quad (3.2)$$

де H – **напір витікання** (питома енергія, завдяки якій відбувається процес витікання), м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

v – середня швидкість рідини на виході струменя з отвору (насадка), м/с;

φ – **коефіцієнт швидкості**;

Q – об'ємна витрата рідини, що витікає з отвору (насадка), м³/с;

ω_o – площа поперечного перерізу отвору (на просвіт), м²;

μ – **коефіцієнт витрати**.

У формулі (3.1), якщо розглядати ідеальний процес витікання, коефіцієнт швидкості $\varphi = 1$. В реальних процесах завжди відбуваються втрати енергії під час огинання гострих кромek отворів та розширень потоків в насадках. Тому **дійсна швидкість** витікання струменя виходить завжди менша ніж **теоретична**, а коефіцієнт швидкості φ , який враховує величину втрат енергії, завжди менше одиниці. Величина коефіцієнта φ залежить від величини місцевого опору конструктивного елемента, через який витікає рідина:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta}} \quad (3.3)$$

де α – коефіцієнт кінетичної енергії потоку, який враховує нерівномірність розподілу швидкостей у живому перерізі (при турбулентних режимах практично дорівнює одиниці);

ζ – *коефіцієнт місцевого опору*.

Отже, чим більшим виявляється опір конструктивного елемента, через який відбувається витікання рідини, тим меншим виходить значення коефіцієнта швидкості i , відповідно, меншою виявляється величина швидкості витікання.

Важливим явищем під час витікання рідини також виступає *стиснення* струменя, яке пов'язано з виникненням сил інерції при криволінійному русі частинок рідини. Внаслідок цього величина площі живого перерізу струменя (ω_c), який витікає з отвору (насадка), може відрізнятись від величини площі самого отвору (ω_o). Цей ефект оцінюється *коефіцієнтом стиснення струменя* ε :

$$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega_o} \quad (3.4)$$

Основною відмінною в процесах витікання рідини через отвори від витікання через насадки є саме різниця коефіцієнтів стиснення. При витіканні через отвори дія *сил інерції* завжди призводить до *звуження* вихідного струменя. Конструкція насадків, в яких після огинання вхідної кромки за принципом отвору далі завжди відбувається розширення потоку і заповнювання всього перерізу насадка, дозволяє одержувати струмінь розміру як меншого ніж розмір насадка (конічний збіжний), однакового з розміром насадка (циліндричний), так і більшого за розмір вхідного отвору насадка (конічний розбіжний). Саме розмір струменя, який виходить з насадка (отвору) виступає одним з головних чинників, що впливає на величину витрати, яку оцінюють коефіцієнтом витрати μ :

$$\mu = \varphi \cdot \varepsilon \quad (3.5)$$

Коефіцієнт витрати μ виступає комплексним параметром, який залежить від величини витрат енергії (враховуються коефіцієнтом ϕ) та ступеню стиснення струменя (враховується коефіцієнтом ε).

3.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

Структурну схему лабораторної установки для експериментального визначення коефіцієнтів витрати отворів та насадків різної конфігурації наведено на рисунку 3.1. В напірний бак *1* вода подається з водопроводу через вентиль *2*. Наявність зливного вікна *3* у баку дозволяє підтримувати сталий рівень рідини. У вертикальній стінці бака на одному горизонтальному рівні розташовуються осі різних отворів і насадків у порядку, який відповідає таблиці 3.1. Вода, що витікає через отвір (або насадок), потрапляє у мірний бак *4*. Час повного заповнення мірного бака фіксується ручним секундоміром.

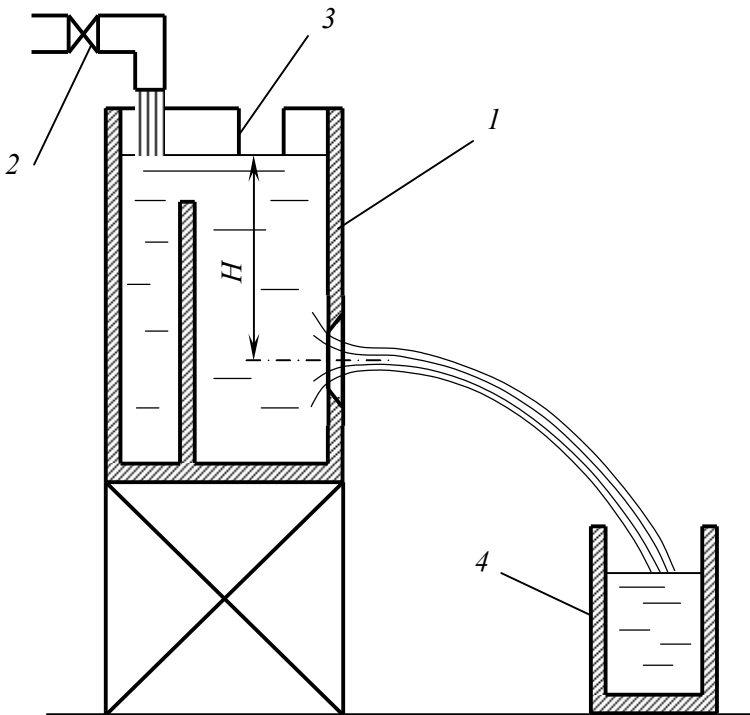


Рисунок 3.1 – Структурна схема експериментальної установки

3.4 Контрольні запитання

1. Дати визначення та пояснити фізичну суть коефіцієнтів витікання.
2. Пояснити виведення формул швидкості та витрати для процесу витікання рідини.
3. Як залежить тиск у вузькому перерізі струменя у насадку від напору витікання?
4. Пояснити умови виникнення кавітації в насадку.
5. З'ясувати різницю значень коефіцієнтів для всіх отворів та насадків, що розглядаються в лабораторній роботі.
6. Порівняти граничні лінії потоку (струменя) для випадків витікання рідини через отвори та насадки різних типів.
7. Пояснити вплив конструктивних параметрів отворів та насадків на величини коефіцієнтів витікання ζ , φ , ε , μ .

3.5 Порядок виконання лабораторної роботи

В процесі підготовки до лабораторної роботи слід користуватися літературою [1–3], конспектом лекцій, а також даними методичними вказівками.

Перед тим як стати до лабораторної роботи, студентам необхідно засвоїти теоретичний матеріал розділу «Витікання рідини через отвори та насадки», а також мати чітке уявлення про суть основних рівнянь гідродинаміки. Слід приділити особливу увагу з'ясуванню фізичної суті процесів перетворення енергій в потоці рідини, що витікає з конструктивних елементів різних конфігурацій та фізичних принципів, на яких ґрунтується методика визначення коефіцієнтів, що характеризують процес витікання.

В процесі підготовки до лабораторної роботи слід користуватися літературою [1–3], конспектом лекцій, а також даними методичними вказівками.

До початку лабораторної роботи слід підготувати ілюстративні матеріали, згідно з вимогами методичних вказівок, які повинні містити форму протоколу (таблиця 3.1), до якого заноситимуться всі величини, одержані з дослідів та в результаті розрахунків.

Таблиця 3.1 – Форма протоколу

№ п/п	Назва отвору або насадку	Ескіз отвору або насадку	А	Час заповнювання мірного об'єму t, c				μ	Значення коефіцієнтів за довідником	$\delta, \%$
				t_1	t_2	t_3	t_{cp}			
1	Отвір з гострою кромкою		15,5					$\zeta = 0,06;$ $\varepsilon = 0,64;$ $\varphi = 0,97;$ $\mu = 0,62$		
2	Зовнішній циліндричний насадок $l/d = 3,0$		15,5					$\zeta = 0,49;$ $\varepsilon = 1,00;$ $\varphi = 0,82;$ $\mu = 0,82$		
3	Внутрішній циліндричний насадок $l/d = 4,5$		14,5							
4	Внутрішній циліндричний насадок $l/d = 3,5$		14,2					$\zeta = 1,00;$ $\varepsilon = 1,00;$ $\varphi = 0,71;$ $\mu = 0,71$		
5	Конічний збіжний насадок		13,6							
6	Конічний розбіжний насадок		14,5							
7	Отвір з фаскою		15,5							
8	Коноїдний насадок		15,8					$\zeta = 0,06;$ $\varepsilon = 1,00;$ $\varphi = 0,97;$ $\mu = 0,97$		

Біля експериментальної установки студенти працюють лише під наглядом викладача або лаборанта, суворо дотримуючись вимог інструкції з охорони праці при виконанні робіт в лабораторіях кафедри «Двигуни внутрішнього згорання».

Заповнюється напірний бак, відкривається один з отворів (насадків) і за допомогою вентиля 2 встановлюється сталий режим витікання ($H = const$). Фіксують час заповнювання мірного бака струменем води за допомогою секундоміра. Для підвищення точності визначення часу заповнення мірного об'єму проводять 2 – 3 досліди.

Зачиняють досліджуваний отвір. Відкривають наступний і повторюють процедуру досліду. Точність для вимірювання величин: 0,2 с (ціна поділу шкали приладу). Величини, одержані з досліду, занотувати до протоколу (табл.3.1).

3.6 Зміст звіту

Вказати тему та мету лабораторної роботи.

Записати формули (3.1-3.5, 3.10) з поясненням величин, що в них входять. Змалювати структурну схему експериментальної установки (рисунок 3.1). Змалювати форму протоколу (таблиця 3.1).

Занести до протоколу всі величини, визначені з експерименту (дослідні). Величину коефіцієнта витрати для кожного отвору (насадка) визначають з його фізичної суті:

$$\mu = \frac{Q}{Q_{теор}} \quad (3.6)$$

Враховуючи, що теоретичне значення витрати залежить тільки від величини напору витікання та розміру поперечного перерізу отвору:

$$Q_{теор} = \omega_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}, \quad (3.7)$$

а дійсна об'ємна витрата рідини визначається з досліду за формулою

$$Q = \frac{V}{t_{сп}}, \quad (3.8)$$

то коефіцієнт μ може бути визначений як

$$\mu = \frac{V}{\omega_o \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \cdot \frac{1}{t_{cp}}, \quad (3.9)$$

або, враховуючи геометричні розміри експериментальної установки,

$$\mu = \frac{A_i}{t_{cp}} \quad (3.10)$$

де значення сталої величини A для кожного отвору (насадка) наведені в таблиці 3.1.

Результати обробки експериментальних даних записуються у протокол, після чого розраховуються значення відносних похибок визначення коефіцієнтів μ для тих конструктивних елементів, для яких в протоколі наведені довідкові дані. Відносну похибку вимірювання δ оцінюють за формулою:

$$\delta = \frac{|\mu_{теор} - \mu_{експ}|}{\mu_{теор}} \cdot 100 \quad (3.11)$$

Після цього робиться висновок у відповідності до мети роботи.

3.7 Рекомендована література

1. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 122–136; 153–164.
2. Лещій Н. П., Мандрус В. І. та ін. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади розрахунків: Навч. посібник для вузів. – Львів, 1995. – С. 100–104.
3. Сергель О. С. Прикладная гидрогазодинамика. М.: Машиностроение, 1981. – С. 115–180.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСА

4.1 Мета роботи

Ознайомитися зі способами вимірювання параметрів відцентрового насоса та методикою експериментального визначення основних характеристик відцентрового насоса.

4.2 Загальні відомості

Насосом називають гідравлічну машину, в якій відбувається перетворення механічної енергії в гідравлічну енергію потоку рідини. Відцентрові насоси відносяться до класу лопатевих (гідродинамічних) машин, в яких потоку додаються всі три складові енергії (енергія положення, енергія сил тиску та кінетична енергія).

Роботу відцентрового насоса характеризують такі параметри.

Подача (Q) – об'ємна кількість рідини, що подається насосом за одиницю часу, м³/с.

Напір (H), або питома енергія, – приріст повного напору рідини під час проходження її через насос, м:

$$H = \frac{p_2 - p_1}{\rho \cdot g} + (z_2 - z_1) + \frac{\alpha \cdot v_2^2 - \alpha \cdot v_1^2}{2 \cdot g} \quad (4.1)$$

Тут індексами 1 та 2 позначені параметри потоку відповідно на вході в насос та виході з насоса.

Потужність – робота насоса за одиницю часу, Вт. Розрізняють **споживну потужність** (N) – механічну потужність, яка підводиться до валу насоса; та **корисну потужність** (N_0) – гідравлічну потужність потоку рідини, що виходить з насосу:

$$N = M_{кр} \cdot \Omega, \quad (4.2)$$

де $M_{кр}$ – крутильний момент на валу насоса Н·м;

Ω – кутова швидкість обертання вала насоса, с⁻¹.

$$N_0 = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (4.3)$$

Ефективність перетворення енергії в насосі оцінюють повним к.к.д. (η), який враховує всі види втрат в насосі (об'ємні, гідравлічні, механічні):

$$\eta = N_0 / N = \eta_o \cdot \eta_z \cdot \eta_{mex} \quad (4.4)$$

Роботу насоса визначають його **робочими характеристиками** – залежностями напору, споживної потужності та к.к.д від подачі насоса при незмінній частоті обертання його вала ($n = const$):

$$H = f(Q), \quad N = f(Q), \quad \eta = f(Q) \quad (4.5)$$

4.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

Перед тим як стати до лабораторної роботи, студентам необхідно засвоїти теоретичний матеріал розділу «Основи теорії лопатевих гідромашин». Слід приділити особливу увагу з'ясуванню фізичної суті балансу енергій в лопатевих машинах та фізичних принципів, на яких ґрунтується методика визначення параметрів та характеристик гідромашин. В процесі підготовки до лабораторної роботи слід користуватися літературою [1–2], конспектом лекцій, а також даними методичними вказівками.

До початку лабораторної роботи слід підготувати ілюстративні матеріали, згідно з вимогами розділу 4.6 даних методичних вказівок, які повинні містити форму протоколу (таблиця 4.1), до якого заноситимуться всі величини, одержані з дослідів та в результаті розрахунків.

Структурну схему лабораторної насосної установки для експериментального визначення параметрів відцентрового насоса наведено на рисунку 4.1. З живильного резервуару 1 вода подається у всмоктувальний трубопровід 2 і через вентиль 3 потрапляє у відцентровий насос 4. Далі по нагнітальному трубопроводу 5 вода через вентиль 6 подається в нагнітальний резервуар 7, з якого через водозлив трикутної форми 8 знов потрапляє в живильний резервуар. Насос живиться механічною енергією від електродвигуна 9. Установка обладнана наступними приладами. Електрична потужність, що споживається однією з фаз електродвигуна контролюється за допомогою ваттметра 11. Тиск на вході в насос контролюється за допомогою мановакуумметра 12. Тиск на виході з насоса

контролюється за допомогою манометра 13. Висота заповнення трикутного водозливу контролюється мірною трубкою 14.

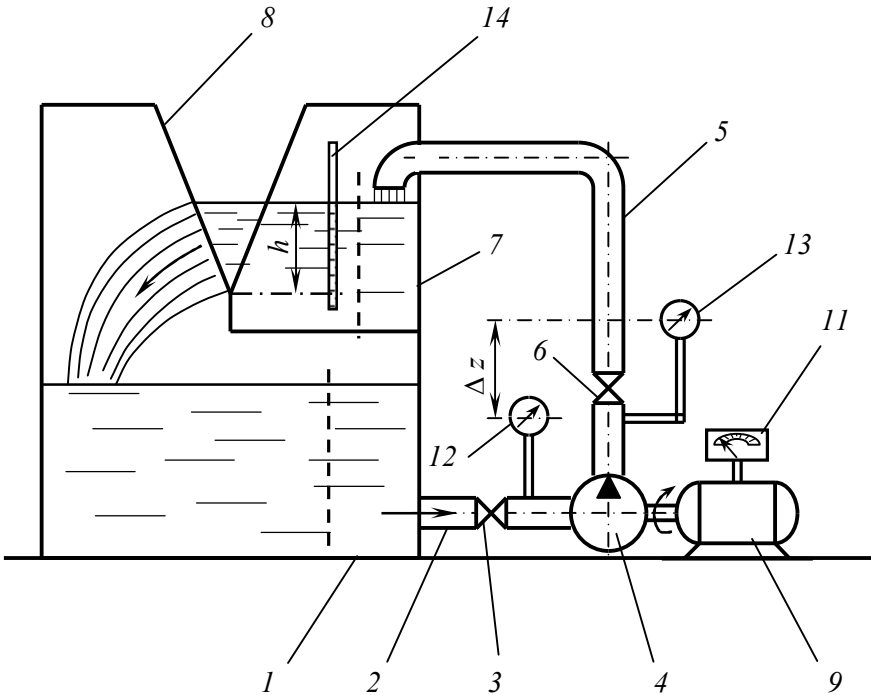


Рисунок 4.1 – Структурна схема експериментальної установки

4.4 Контрольні запитання

1. Визначення основних параметрів відцентрових насосів.
2. Методи експериментального визначення параметрів насоса.
3. Графічні залежності відцентрового насоса та їх побудова.
4. Формули подібності для перерахунку параметрів.
5. Назвіть складові втрат підведеної потужності.
6. Чому необхідно заповнити всмоктуючий трубопровід перед початком роботи.

4.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Біля експериментальної установки студенти працюють лише під наглядом викладача або лаборанта, суворо дотримуючись вимог інструкції з охорони праці при виконанні робіт в лабораторіях кафедри «Двигуни внутрішнього згорання» .

Запуск насоса здійснюють за умови мінімального навантаження на вал насоса (режим холостого ходу). Для цього слід повністю відкрити вентиль 3 та повністю закрити вентиль 6. Фіксують показання ваттметра (N_W), показання мановакуумметра (p_{MV}), показання манометра (p_M) та показання мірної трубки трикутного водозливу (h).

Точність для вимірювання величин: 0,02 кВт; 0,01 кГс/см²; 1 мм (ціна поділу шкал приладів). Поступово відкриваючи вентиль 6 змінюють режими роботи відцентрового насоса до повного його відкриття. На кожному режимі (6...8 режимів) здійснюють відповідні вимірювання параметрів. Величини, одержані з досліду, занотовують до протоколу (табл. 4.1).

4.6 Зміст звіту

Вказати тему та мету лабораторної роботи. Записати формули (4.1), (4.2), (3), (4.4), (4.5), (4.6) з поясненням величин, що в них входять.

Зарисувати структурну схему експериментальної установки (рисунок 4.1), форму протоколу (таблиця 4.1). Занести до протоколу всі величини, визначені з експерименту (дослідні).

Величину подачі насоса визначають за показаннями мірної трубки трикутного водозливу :

$$Q = k \cdot h^{2,5}, \quad (4.7)$$

де коефіцієнт $k = 0,77 \sqrt{m}/c$;

h – показання мірної трубки, м.

Величину напору насоса визначають за формулою (4.1), яка з урахуванням однаковості швидкостей всмоктування і нагнітання може бути записана, як

$$H = h_M - (\pm h_V) + \Delta z, \quad (4.8)$$

де h_M та h_V – відповідно величини п'єзометричних напорів на виході з насоса та на вході в насос, м; приріст геометричного напору Δz згідно зі схемою установки (див. рис. 4.1) дорівнює 0,3 м.

Споживну потужність насоса розраховують по величині споживної потужності електродвигуна, з урахуванням його к.к.д (η_e):

$N = 3 \cdot N_W \cdot \eta_e$. Враховуючи, що $\eta_e = 0,82$, остаточно одержимо:

$$N = 2,46 \cdot N_W \quad (4.9)$$

Корисну потужність насоса розраховують за формулою (4.3). Коефіцієнт корисної дії насоса розраховують за формулою (4.4). Результати розрахунку параметрів насоса на кожному режимі записуються у протокол, після чого будують робочі характеристики насоса (4.5), при необхідності застосувавши формули подібності (4.6). Графіки будують на одному полі (уздовж однієї осі абсцис), вибравши відповідні масштаби для зображення функціональних параметрів H , N та η . Після цього робиться висновок у відповідності до мети роботи.

4.7 Рекомендована література

1. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 172–197; 200–226; 255–269.
2. Мандрус В. І., Лещій Н. П., Звягін В. М. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади розрахунків. – Львів: Світ, 1995. – С. 120–135.

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ І ВИТРАТИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАНДАРТНОЇ ДІАФРАГМИ ТА ПНЕВМОМЕТРИЧНОЇ ТРУБКИ ПІТО-ПРАНДТЛЯ

5.1 Мета роботи

Вивчення призначення і конструкцій стандартної діафрагми та пневмометричної трубки Піто-Прандтля, експериментальне дослідження та розрахунок швидкості і витрати повітряного.

5.2 Загальні відомості

У теплотехнічних агрегатах у більшості випадків тиск газів невеликий, тому і швидкості газів не перевищують 100 м/с. Це дозволяє вважати гази нестисливими і використовувати в розрахунках при обробці експериментальних даних із дослідження газового потоку закони загальні для механіки газів та рідин.

Витрата газу, пари та рідини може бути виміряною за допомогою стандартної діафрагми та пневмометричної трубки Піто-Прандтля та рівняння Бернуллі.

Для випадку течії газу в закритому каналі:

$$P + \rho gh + \rho \frac{w^2}{2} + \sum \xi \rho \frac{w^2}{2} = const, \quad (5.1)$$

де P – статичний тиск, Па;

ρgh – геометричний тиск, Па;

$\rho \frac{w^2}{2}$ – динамічний (швидкісний) тиск, Па. Динамічним тиском

називається тиск, який створюється в результаті повного перетворення кінетичної енергії потоку в потенційну енергію тиску на ту поверхню, набігаючи на яку потік загальмовується;

$\sum \xi \rho \frac{w^2}{2}$ – втрачений тиск, Па.

Кожний із доданків характеризує відповідно потенційну, кінетичну та втрачену енергію, що віднесені до 1 м^3 потоку газу. Рівняння Бернуллі показує, що сума усіх видів енергії ізотермічного потоку газу для різних перерізів каналу є сталою величиною, якщо в

каналі з незмінним поперечним перерізом по мірі руху газу зростає доданок, який характеризує втрачену енергію (втрати енергії на подолання різного роду газодинамічних опорів – засувки, діафрагми, заслінок, поворотів і т. д.), то відповідно зменшується запас потенційної енергії. Рівняння Бернуллі широко використовується для аналізу роботи теплотехнічних агрегатів.

У лабораторних експериментах газодинамічні процеси моделюються потоком повітря, який являє собою парогазову суміш – механічну суміш сухого повітря та водяної пари.

Найбільш розповсюдженим є спосіб вимірювання витрати рідини, газу та пари за допомогою приладів незмінного перепаду тиску в комплекті зі звужувальними пристроями (діафрагмами) та дифманометрами, тобто спосіб вимірювання витрати за перепадом тиску в дросельних пристроях.

Діафрагма з отвором діаметром d розміщується у трубі діаметром D на шляху потоку повітря. Потік на підході до діафрагми звужується, а після проходження крізь отвір діафрагми – розширюється, і на деякій відстані від діафрагми заповнює весь переріз труби. На основі закону про нерозривність потоку (або сталості витрати) при протіканні газу (або рідин) у звуженому перерізі підвищується швидкість потоку в порівнянні з його швидкістю до звуження. На основі закону збереження та перетворення енергії збільшення швидкості потоку i , як наслідок, збільшення кінетичної енергії у звуженому перерізі викликає зменшення потенційної енергії потоку в цьому перерізі. Відповідно, статичний тиск у звуженому перерізі буде меншим, ніж у перерізі до діафрагми. Таким чином, при протіканні повітря, як і будь-якого газу, пари або рідини крізь діафрагму створюється перепад тиску, який залежить від швидкості потоку і від його витрати крізь трубопровід.

Для визначення швидкості потоку та його витрати скористуємось одновимірним законом збереження енергії потоку, що виражається рівнянням Бернуллі.

$$P_1 + \rho \frac{w_1^2}{2} + P_2 + \rho \frac{w_2^2}{2} + \Delta P_{\text{втр}(1-2)} \quad (5.2)$$

Тут індекс «1» відноситься до параметрів потоку перед діафрагмою, а індекс «2» – після діафрагми. $\Delta P_{\text{втр}(1-2)}$ – втрати тиску на шляху від перерізу «1» до перерізу «2» [1].

Завдяки звуженню потоку у діафрагмі та нерівномірності поля швидкостей визначити w_d достатньо важко. Тому оберемо точки вимірювання тиску потоку як можна ближче до діафрагми з обох її боків, тоді $w_d = w_2$.

Враховуючи, що з рівняння нерозривності $w_1 F_1 = w_2 F_2 = V = \text{const}$ або $w_1 = w_2 (d^2 / D^2)$ після нескладних перетворювань одержимо

$$w_2 = \frac{\sqrt{\frac{2(P_1 - P_d)}{\rho}}}{\sqrt{1 + \left[\frac{D^2 (1,1 - d^2 / D^2)}{d^2 (0,57 + 0,043)} - 1 \right]^2 - \frac{d^4}{D^4}}}. \quad (5.3)$$

Звідси об'ємна витрата дорівнює

$$V = w_2 \cdot F_2, \text{ м}^3/\text{с} \quad (5.4)$$

або

$$V = 3600 w_2 F_2, \text{ м}^3/\text{год}. \quad (5.5)$$

Масова витрата

$$G = \rho \cdot w_2 \cdot F_2, \text{ кг/с} \quad (5.6)$$

або

$$G = 3600 \rho \cdot w_2 \cdot F_2, \text{ кг/год}. \quad (5.7)$$

Сталі, що входять до рівняння витрати, звичайно замінюються загальним коефіцієнтом витрати α , а замість враховують площу прохідного перерізу діафрагми. Коефіцієнтом витрати називається відношення дійсної витрати до теоретичної. Коефіцієнт витрати дорівнює добутку коефіцієнта звуження потоку та коефіцієнта швидкості. Коефіцієнт звуження потоку – це відношення площі поперечного перерізу потоку до площі отвору діафрагми. Коефіцієнт швидкості є відношенням дійсної швидкості до теоретичної. Таким чином,

$$V = \alpha \cdot F_a \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}, \quad (5.8)$$

де

$$F_a = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

Для нестиглого середовища існує напівемпірична формула для визначення годинної об'ємної витрати

$$V = 3,998 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (5.9)$$

де d – отвір діафрагми, мм.

Кінетична енергія потоку визначена динамічним (швидкісним) тиском

$$P_d = \rho \frac{w^2}{2} = P_{II} - P_{CT} \quad (5.10)$$

Звідси

$$w = \sqrt{\frac{2(P_{II} - P_{CT})}{\rho}}, \quad (5.11)$$

де p_{II} – повний тиск або тиск гальмування потоку;

P_{CT} – статичний тиск.

Формула для визначення годинної масової витрати набуває вигляду:

$$G = 3,998 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{\rho \cdot \Delta P}, \text{ кг/год} \quad (5.12)$$

тому що

$$G = \rho \cdot V. \quad (5.13)$$

Значення α в залежності від відношення площ, або квадратів діаметрів отвору діафрагми і внутрішнього перерізу труби наведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Визначення α

$F_d/F = d^2/D^2$	0,8	0,6	0,4	0,2	0
α	1	0,74	0,66	0,62	0,60

Експериментальне дослідження та розрахунок швидкості і витрати повітряного потоку за допомогою пневмометричної трубки Піто-Прандтля полягає у визначенні максимальної величини швидкості на осі трубопроводу і нульового значення на поверхні стінок. Тому для визначення середньої швидкості потоку площу трубопроводу, які відповідно дорівнюють $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$.

Середня швидкість потоку у трубопроводі визначається так

$$\bar{w} = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n}{n}, \quad (5.14)$$

де швидкість

$$w = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho}}, \text{ м/с.} \quad (5.15)$$

Тоді годинна об'ємна витрата повітря, тобто кількість повітря, що протікає крізь поперечний переріз F , м^2 трубопроводу за годину становить

$$V = 3600 \cdot F \cdot \bar{w}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (5.16)$$

Годинна масова витрата повітря визначається за формулою:

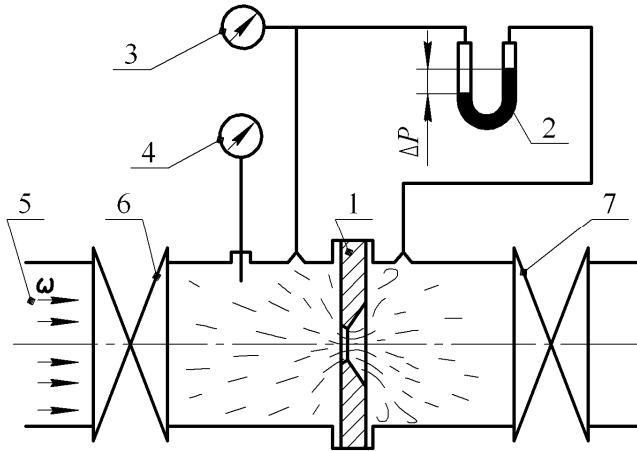
$$G = \rho \cdot V = 3600 \cdot \rho \cdot \bar{w} \cdot F, \text{ кг/год}, \quad (5.17)$$

де ρ – густина вологого повітря, кг/м^3 .

5.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

Експериментальна установка (рисунок 5.1) складається з компресора, який нагнітає повітря в трубопровід із внутрішнім діаметром $D = 92$ мм. У трубопровід приблизно на середині його довжини вмонтовано діафрагму з діаметром отвору $d = 58$ мм.

Діафрагму вмонтовано таким чином, щоб довжина труби до і після діафрагми була рівною $(10 \dots 20) \cdot D$. По кінцях трубопроводу встановлені два вентиля, які забезпечують можливість регулювання витрати повітря, тобто величини перепаду тиску ΔP у діафрагмі, оскільки перепад тиску у стандартній діафрагмі, що вимірюється за допомогою диференційного манометра, служить мірою витрати повітря. Виміряна різниця тиску дозволяє розрахувати швидкість потоку та його витрату.



- 1 – стандартна діафрагма; 2 – диференційний водяний манометр для вимірювання тиску у діафрагмі ΔP , мм вод. ст. ($\text{кг}/\text{м}^2$);
 3 – механічний манометр для вимірювання надлишкового тиску перед діафрагмою $P_{\text{над}}$, $\text{кг}/\text{м}^2$; 4 – термометр для вимірювання температури повітря перед діафрагмою t , $^{\circ}\text{C}$; 5 – компресор;
 6, 7 – регулювальні вентилялі.

Рисунок 5.1 – Схема експериментальної установки

Пневмометричну трубку вмонтовано в трубопровід із площею і перерізу $F = \pi \cdot d^2/4$. Схему пневмометричної трубки наведено на рис. 5.2. Для вимірювання повного тиску $P_{\text{П}}$ використовується отвір 1, для вимірювання статичного тиску $P_{\text{ст}}$ твори 2. Отвори 1 і 2 з'єднані з трубками 3 і 4. Якщо кінці трубок 3 і 4 з'єднати з диференційним манометром 5, то його показання буде являти собою різницю повного та статичного тиску, тобто динамічний (швидкісний) тиск

Виміряна різниця тисків дозволяє розрахувати швидкість потоку; повітря та його витрату, тобто динамічний (швидкісний) тиск. Повітря з атмосфери подається вентилятором крізь вузол пневмометричної трубки 3, і крізь вихідний патрубок знову попадає в атмосферу.

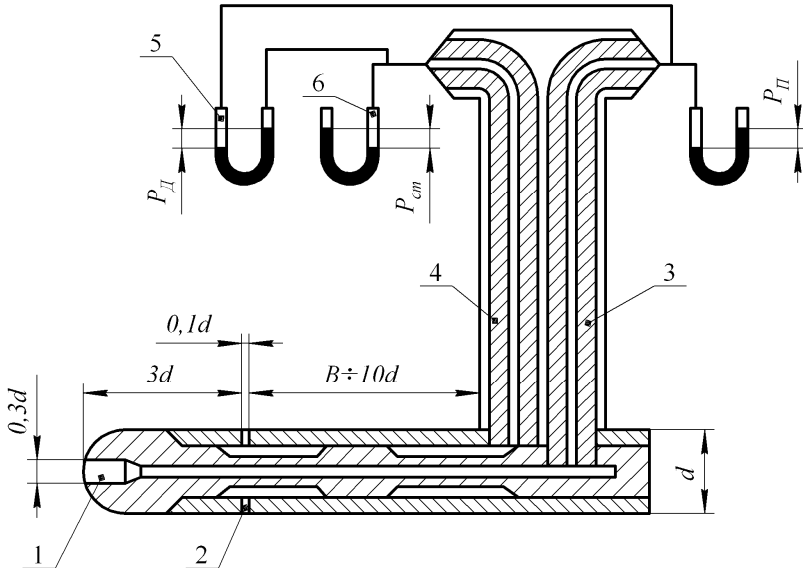


Рисунок 5.2 – Конструкція пневмометричної трубки Піто-Прандтля.

5.4 Контрольні запитання

1. Написати рівняння Бернуллі та пояснити фізичний зміст доданків, що входять до нього.
2. Побудувати графік розподілу швидкості щодо перерізу потоку до і після діафрагми.
3. Побудувати графік розподілу повного та статичного тиску вздовж осі потоку до і після діафрагми.
4. У якому перерізі виконується відбір статичного тиску після діафрагми та чому?
5. Який співмножник у формулі для розрахунку витрати вносить максимальну помилку?
6. Який зв'язок між об'ємною та масовою витратою?
7. Який фізичний закон є основою використання пневмометричної трубки для вимірювання швидкості потоку?
8. У чому міститься принцип роботи пневмометричної трубки?
9. Як визначається швидкість потоку за допомогою пневмометричної трубки?

10. Що є витратою потоку газу (наприклад, повітря) і як вона обчислюється?

11. Який з розглянутих методів вимірювання витрати має мінімальну помилку?

5.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Експериментальне визначення швидкості і витрати повітряного потоку за допомогою стандартної діафрагми.

1. Відкрити повністю вентиль 6 на трубопроводі біля компресора.

2. Прикрити вентиль 7 у вільного кінця трубопроводу.

3. Ввімкнути електродвигун компресора за допомогою пакетного вимикача.

4. Кожний студент робочої групи, повільно закриваючи вентиль 6 біля компресора і відкриваючи вентиль 7 біля вільного кінця трубопроводу, повинен встановити одне з можливих показань манометра 3 в діапазоні $0,04 \dots 0,2 \text{ кг/см}^2$, після чого виміряти параметри потоку повітря: $P_{\text{над}}$ – надлишковий тиск повітря перед діафрагмою за показаннями механічного манометра 3, кг/см^2 ; ΔP – перепад тиску в діафрагмі за показаннями водяного манометра 2, мм вод. ст.; t – температуру повітря перед діафрагмою за показаннями термометра 4, $^{\circ}\text{C}$; P_o – атмосферний барометричний тиск за показаннями барометра, кПа.

Виміряні величини занести в таблицю 5.2.

Експериментальне визначення швидкості і витрати повітряного потоку за допомогою пневмометричної трубки Піто-Прандтля.

1. Ввімкнути вентилятор.

2. Виміряти динамічний тиск P_d , за показаннями диференційного манометра та статичний тиск $P_{ст}$ за показаннями U-подібного водяного манометра в кожному фіксованому положенні пневмометричної трубки.

4. Визначити величину атмосферного тиску P_o за барометром.

5. Визначити значення відносної вологості φ повітря, використовуючи психрометричну таблицю приладу за показаннями вологого (мокрого) термометра t' і за різницею показань сухого та мокрого термометрів ($t - t'$).

6. Виміряти температуру t , атмосферного повітря за ртутним термометром, який розташований в аеродинамічній трубці.

Виміряні величини занести в таблицю 5.2.

5.6 Зміст звіту

1. Розрахувати абсолютний тиск повітря перед діафрагмою

$$P_a = P_o + P_{\text{над}}, \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)}, \quad (5.18)$$

де P_o – атмосферний тиск, Па;

$P_{\text{над}}$ – надлишковий тиск, Па.

2. Визначити густину повітря перед діафрагмою за рівнянням стану Клапейрона

$$\rho = \frac{P_a}{RT}, \text{ кг/м}^3, \quad (5.19)$$

де $R = 287 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ – газова стала повітря;

$T = (273 + t)$ – термодинамічна (абсолютна) температура, К;

P_a – абсолютний тиск перед діафрагмою, Н/м^2 (Па).

3. Знайти значення коефіцієнта витрати α з таблиці 5.1.

4. Обчислити значення годинних об'ємної та масової витрат за формулами (5.9-5.11)

5. Розрахувати швидкість потоку за формулою 5.3.

6. Результати розрахунків занести до таблиці 5.2.

7. У складі робочої групи побудувати графіки залежностей $w = f(\Delta p)$ та $G = f(\Delta p)$ для діафрагми.

8. Розрахувати абсолютний тиск вологого повітря для пневмометричної трубки

$$P_a = P_o + P_{cm}, \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)}. \quad (5.20)$$

9. Визначити густину вологого повітря за формулою:

$$\rho = \frac{P_a + \varphi P_H}{287(t + 273)} + \varphi \rho_H, \text{ кг/м}^3. \quad (5.21)$$

Таблиця 5.2 – Форма протоколу

Позначення величин	Спосіб визначення величини	Одиниця вимірювання	Числове значення
ΔP	за водяним манометром 2	кг/м ²	
		Н/м ² (Па)	
$P_{\text{над}}$	за механічним манометром 3	кг/см ²	
		Н/м ² (Па)	
P_o	за барометром	кг/м ² (кПа)	
		Н/м ² (Па)	
T	за термометром 4	°С	
		К	
P_a	за формулою (5.18)	Н/м ² (Па)	
ρ	за формулою (5.19)	кг/м ³	
α	за таблицею (5.1)	–	
V	за формулою (5.9)	м ³ /год	
G	за формулою (5.12-5.13)	кг/год	

Густина сухого повітря обчислюється за рівнянням стану Клапейрона:

$$\rho_{c.n.} = \frac{P_{c.n.}}{R_{c.n.} \cdot T}, \quad (5.22)$$

де $R_{c.n.} = 287$ Дж/(кг·К) – газова стала повітря;

$T = (273 + t)$ – термодинамічна абсолютна температура, К;

t – температура повітря, °С;

$P_{c.n.}$ – парціальний тиск сухого повітря, Н/м² (Па).

Відносна вологість φ , що визначається за психрометром.

Величини ρ'' та $P_{н.н.}$ визначаються температурою t вологого повітря і не залежать від його тиску p_a . Густина сухої насиченої пари ρ'' та парціальний тиск насиченої пари $P_{н.н.}$ визначаються з таблиці 5.3 для насиченої водяної пари (за температурою).

10. Результати розрахунків, занести в таблицю 5.4.

Таблиця 5.3 – Параметри насиченої водяної пари

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н.п.}}, \text{Н/м}^2$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н.п.}}, \text{Н/м}^2$	$\rho'', \text{кг/м}^3$
15	1704,1	0,0128	23	2807,9	0,0206
16	1817,0	0,0136	24	2982,4	0,0218
17	1936,4	0,0145	25	3166,3	0,0230
18	2062,6	0,0154	26	3360,0	0,0244
19	2196,0	0,0163	27	3563,9	0,0258
20	2337,0	0,0173	28	3778,5	0,0272
21	2485,5	0,0183	29	4004,3	0,0286
22	2642,4	0,0194	30	4241,7	0,0304

Таблиця 5.4 – Форма протоколу

Позначення величини	Засіб визначення величини	Одиниця вимірювання	Числове значення для точок
P'_D	за дифманометром	кг/м^2	
P_D	розрахунок	Н/м^2	
$\sqrt{P_D}$	—”—	$\text{Н}^{1/2}/\text{м}$	
$\Sigma\sqrt{P_D}$	—“—	$\text{Н}^{1/2}/\text{м}$	
t	за термометром	$^\circ\text{C}$	
P_o	за барометром	Н/м^2 (Па)	
φ	за психрометром	% (і)	
$P_{\text{ст.}}$	за водяним манометром	кг/м^2	
		Н/м^2 (Па)	
$P_{\text{н.п.}}$	з таблиці 5.3	Н/м^2 (Па)	
P_a	за формулою (5.20)	Н/м^2 (Па)	
ρ''	з таблиці 5.3	кг/м^3	
ρ	за формулою (5.21)	кг/м^3	
w	за формулою (5.15)	м/с	
\bar{w}	за формулою (5.14)	м/с	
V	за формулою (5.16)	$\text{м}^3/\text{год}$	
G	за формулою (5.17)	кг/год	

5.7 Рекомендована література

1. Мануйлов П. П. Теплотехнические измерения и автоматизация тепловых процессов. – М.: Энергия, 1976. (Гл. 3.4).
2. Петунин А. Н. Измерение параметров газового потока. – М.: Машиностроение, 1974. (Гл. 1).

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ЦИЛІНДРА ВІЛЬНОЮ ТА ВИМУШЕНОЮ КОНВЕКЦІЄЮ ПРИ ПОЗДОВЖНЬОМУ ОБТІКАННІ ЦИЛІНДРА ПОВІТРЯНИМ ПОТОКОМ

6.1 Мета роботи

Експериментальне вивчення теплообміну при вільному та вимушеному обтіканні повітрям циліндра, ознайомлення з методами експериментального дослідження та одержання навичок з проведення експерименту, визначення інтенсивності конвективного теплообміну.

6.2 Загальні відомості

Теплообмін між потоками рідини або газу та поверхнею тіла, що стикається з ними, називають *конвективним теплообміном* або конвективною тепловіддачею. Теплообмін може здійснюватися в результаті вільного або вимушеного руху газу або рідини відносно нагрітої або охолодженої поверхні тіла. Тепловіддача при вільному обтіканні поверхні твердого тіла виникає внаслідок зміни густини середовища через зміну його температури в різних областях (ділянках). При вимушеному обтіканні поверхні твердого тіла – здійснюється під впливом зовнішніх механічних сил за допомогою вентиляторів, компресорів, насосів і та інші.

В основі фізичної моделі конвективного теплообміну лежить модель пограничного шару. Відрізняють гідродинамічний і тепловий пограничний шар.

Гідродинамічним пограничним шаром δ_v називають пристінний шар рідини (або газу), в якому виникає змінювання швидкості від нуля на поверхні тіла до значення W_o – швидкості основного потоку рідини (або газу). Якщо температури набіжного потоку і стінки відрізняються, то утворюється тепловий пограничний шар, у якому температура рідини (або газу) змінюється від значення $t_{нов}$ поверхні тіла до t_c – температури основного потоку середовища .

Лімітуючою ланкою в конвективному теплообміні є товщина теплового пограничного шару, через який теплота переноситься переважно теплопровідністю. Причому коефіцієнт тепловіддачі конвекцією буде тим більший, чим менша товщина теплового пограничного шару.

Основний потік середовища поза пограничним шаром може бути ламінарним, турбулентним або перехідним від першого до другого. При ламінарній течії середовища частинки рідини або газу рухаються за визначеними траєкторіями, утворюючи не перемішані струмені. При турбулентному русі у середовищі існують випадкові пульсації швидкостей біля середніх значень, завдяки чому виникає хаотичне перемішування сусідніх шарів. При цьому опір рухові середовища і інтенсивності теплообміну зростає. Характер режиму руху газу або рідини залежить від швидкості W , густини ρ , в'язкості ν (μ) і конфігурації та розмірів області течії. В'язкість рідини із зростанням температури зменшується, а газів – збільшується.

Кількість теплоти Q , яка переноситься від поверхні тіла площею F до рідини або газу (і навпаки) при різниці температур між поверхнею тіла та рухомим середовищем $\Delta t = (t_{нов} - t_c)$ (або $\Delta t = (t_c - t_{нов})$) за визначений проміжок часу τ в процесі конвективного теплообміну, визначається за рівнянням Ньютона-Ріхмана

$$Q = \alpha_k \cdot (t_{нов} - t_c) \cdot F \cdot \tau, \text{ Дж}, \quad (6.1)$$

у якому коефіцієнт пропорційності α є кількісною характеристикою явища тепловіддачі і називається конвективним коефіцієнтом тепловіддачі.

У загальному випадку пропорційність між густиною теплового потоку та різницею температур може порушуватися, тобто співвідношення (6.1) може ставати нелінійною залежністю, якщо $\alpha_k = f(t)$.

Коефіцієнт тепловіддачі залежить від різниці температур у випадку вільної конвекції, тому що різниця температур стінки і середовища є причиною конвекції і визначає газогідродинамічний процес. Залежність α_k від температури виявляється також, якщо фізичні властивості рідини або газу істотно змінюються із змінюванням температури.

При такому підході вся складність процесу концентрується в одній величині – коефіцієнті тепловіддачі, який залежить від великої кількості параметрів, що характеризують умови теплообміну. Найбільш істотними серед них є режим руху рідини або газу (ламінарний, перехідний, турбулентний); природа виникнення руху (вільна або вимушена); фізичні властивості середовища (коефіцієнт теплопровідності λ , теплоємність C_p , густина ρ , в'язкість ν (μ); геометрична форма і розміри об'єкту поверхні тіла (l або d).

Одержання кількісних співвідношень для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі за різних умов є основною задачею конвективного теплообміну.

Коефіцієнт α_k як функція великої кількості змінних, не може бути обчислений теоретично і визначається на основі експерименту. Засновуючись на теорії подібності, результати дослідів опрацьовують в критеріальній формі, що дає можливість характеризувати залежність тепловіддачі не від кожного окремого фактора, що впливає на неї, а від комплексу величин та критеріїв. Опрацьовування результатів у критеріальній формі значно спрощує постановку експерименту і, крім того, що є головним, дає можливість результати одиночного (поодинокого) досліду перенести на всю групу подібних явищ.

При узагальненні даних щодо конвективного теплообміну апроксимаційні залежності між критеріями подібності звичайно визначаються у вигляді $K_l = C \cdot K_2^n \cdot K_3^m$.

У лівій частині рівняння завжди розташований визначуваний критерій (критерій Нуссельта) Nu , а у правій – визначальні для вільного потоку середовища – це критерій Релея $Ra = Gr \cdot Pr$ (тут Gr – критерій Грасгофа; Pr – критерій Прандтля); для вимушеного теплового потоку – це критерій Пекле $Pe = Re \cdot Pr$ (тут Re – критерій Рейнольдса).

Тепловіддача при вільному обтіканні поверхні твердого тіла, що виникає внаслідок зміни густини середовища через зміну температури, є характерною для гравітаційного поля, поля дії відцентрових, кориолісових або магнітних сил.

На основі узагальнення великої кількості експериментальних даних для процесу тепловіддачі при вільному русі газу або рідини відносно поверхні тіл різної форми та розмірів (горизонтальні циліндри, кулі, вертикальні стінки та інші) залежність між критеріями подібності виражається функцією виду:

$$Nu_m = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n, \quad (6.2)$$

де $Gr = \beta g \frac{\ell^3 \cdot \Delta t}{\nu^2}$ – критерій Грасгофа;

$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ – критерій Прандтля;

C і n – емпіричні коефіцієнти;
 Nu – критерій Нусельта

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot \ell}{\lambda_c} \quad (6.3)$$

Визначальна температура

$$t_m = \bar{t} = 0,5 \cdot (t_{нов} + t_c).$$

При цій температурі повинні бути обраними фізичні властивості середовища, що входять у критерії подібності Nu , Gr , Pr :

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

ν – кінематична в'язкість, м²/с;

α – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

$\beta = \frac{1}{T}$ – коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹.

Визначальний розмір l у критеріях Nu і Gr , який залежить від геометрії тіла, що розглядається, дорівнює для куль та горизонтальних циліндрів діаметру d , для вертикальних циліндрів та плоских стінок – висоті h ; для горизонтальних пластин (плит) – мінімальному розміру пластини l_d .

Таблиця 6.1 – Значення сталих C і n залежить від аргументу критеріального виразу таким чином:

$Pr \cdot Gr = Ra$	C	n	Режим вільного руху середовища
10	0,5	0	плівковий
$10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	0,18	1/8	перехідний до ламінарного
$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	ламінарний
$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	1/3	турбулентний

Про режим течії у пограничному шарі судять (висновують) за величиною (числовим значенням) критерія Рейнольдса

$$Re_x = \frac{W_o \cdot x}{\nu}, \quad (6.4)$$

де W_o – швидкість набіжного потоку, м/с;

ν – кінематична в'язкість рідини, м²/с;

x – визначальний розмір перерізу, м.

Перехід до турбулентного режиму може мати місце при значеннях Re_x приблизно від $1 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^6$. У практиці розрахунків перехідну зону замінюють точкою і приблизно приймають

$$Re_{x, KP1} = Re_{x, KP2} = Re_{x, KP} = 10^5 \quad (6.5)$$

Перехідна зона характеризується збільшенням тепловіддачі у зв'язку з появою турбулентного перемішування. Для зони розвинутого турбулентного пограничного шару характерним є більш повільне змінювання α по довжині:

$$Nu_{P,X} = 0,33 Re_{P,X}^{0,8} \cdot Pr_{P,X}^{0,43} \left(\frac{Pr_P}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (6.6)$$

Для визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі до повітря можна використати більш прості співвідношення, вважаючи $Pr = 0,71$:

а) при ламінарному режимі течії в пограничному шарі

$$Nu_{P,I} = 0,57 \cdot Re_{P,I}^{0,5}; \quad (6.6)$$

б) при турбулентному режимі течії у пограничному шарі

$$Nu_{P,I} = 0,032 \cdot Re_{P,I}^{0,8}. \quad (6.7)$$

Кількість теплоти $Q_{випр}$ яка віддається випромінюванням від поверхні тіла площею F до газу при різниці температур між ними $\Delta t = t_{нов} - t_c$ за певний проміжок часу τ , визначається за рівнянням Стефана-Больцмана:

$$Q_{випр} = \varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot \tau, \text{ Дж}, \quad (6.8)$$

де ε – ступінь (міра) чорноти твердого тіла ($0 < \varepsilon < 1$);

$C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

$C = \varepsilon C_o$ – коефіцієнт випромінювання сірого (реального) тіла, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$;

$T_{нов}$ – абсолютна температура поверхні, що випромінює, К;

T_c – абсолютна температура газу (середовища), К.

Враховуючи, що потік теплоти в результаті конвекції

$$P_{конв} = \alpha_k (t_{нов} - t_c) \cdot F, \text{ Вт}, \quad (6.9)$$

а в результаті теплового випромінювання

$$P_{\text{випр}} = \varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{\text{нов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \text{ Вт}, \quad (6.10)$$

сумарний потік теплоти

$$P_{\Sigma} = P_{\text{конв}} + P_{\text{випр}} = \alpha_{\kappa} (t_{\text{нов}} - t_c) \cdot F + \varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{\text{нов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F$$

або

$$P_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} (t_{\text{нов}} - t_c) \cdot F, \quad (6.11)$$

де $\alpha_{\Sigma} = \alpha_{\kappa} + \alpha_{\text{випр}}$ – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К).

6.3 Матеріали, інструмент, прилади, обладнання

Схему експериментальної установки наведена на рисунку 6.1.

Всередині порожнистого металічного циліндра 1 розташований електронагрівник 2, кінці якого з'єднані з регулятором потужності 3.

Для вимірювання температури на зовнішній поверхні циліндра вздовж нього закладено систему термопар. Таке розташування термопар забезпечує усереднення температури. Установка живиться від мережі 220 В.

Регулювання струму, який споживається нагрівником, здійснюється за допомогою регулятора потужності 3. Падіння напруги на нагрівнику ΔU вимірюється вольтметром, струм I – амперметром.

Для вимірювання термо-е.р.с. термопари 4 за допомогою перемикача по черзі з'єднуються з електронним термометром 5.

В установці використовуються хромель-копельові термопари. Як відомо, термопарою вимірюється різниця температур між гарячим та холодним спаями. В даному експерименті, якщо холодний спай буде мати температуру повітря, яка дорівнює t_c , то за допомогою термопари буде вимірююю різниця температур $\Delta t = t_{\text{нов}} - t_c$.

При проведенні серії експериментів вимірюють температуру термометром, що виключає помилку експерименту.

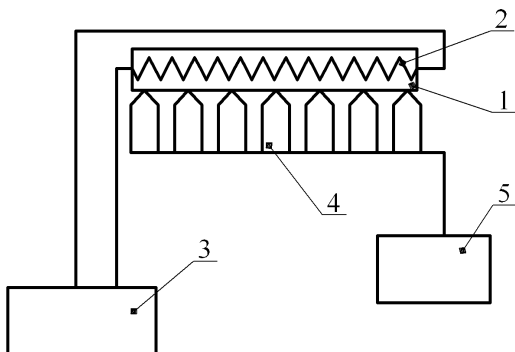


Рисунок 6.1 – Принципова схема експериментальної установки

Швидкість потоку повітря залежить від частоти обертів крильчатки вентилятора, яка змінюється шляхом варіювання напруги на електродвигуні. Для вимірювання напруги, яка у даному випадку є мірою швидкості потоку, використовують вольтметр.

Потужність струму, що подається на нагрівник зразка, вимірюється за допомогою вольтметра і амперметра. Різниця температур між поверхнею циліндра і повітрям вимірюється термопарою.

Зразок (циліндр) (рисунок 6.2) складається з мідного корпусу 1, всередині якого на керамічному трубчастому каркасі 2 намотано нагрівник 3. Холодний спай термопари розташовується в аеродинамічній трубі трохи попереду зразка відносно набіжного потоку. Спай захищений екраном з алюмінієвої фольги.

Основні параметри зразка: маса мідного корпусу з ніхромовим нагрівником $m_k = 0,606$ кг; маса керамічної трубки $m_t = 0,004$ кг; електричний опір нагрівника $R_n = 225$ Ом; електричний опір диференційної термопари $R_T = 10,3$ Ом; теплоємність міді $C_m = 389$ Дж/(кг · К), теплоємність кераміки $C_k = 720$ Дж/(кг К).

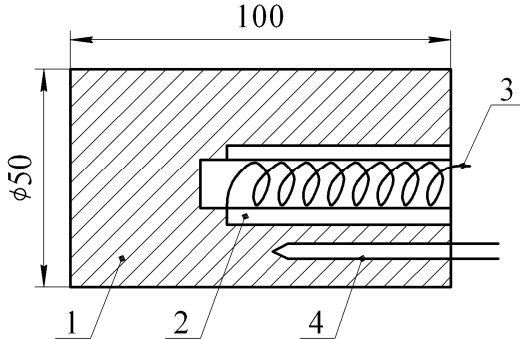


Рисунок 6.2 – Конструкція зразка

6.4 Контрольні запитання

1. Що таке конвективний теплообмін?
2. Що покладено в основу фізичної моделі конвективного теплообміну?
3. Як виражаються критерії Нуссельта, Грасгофа, Прандтля та яка їх фізична суть?
4. Що таке коефіцієнт тепловіддачі конвекцією, тепловим випромінюванням і сумарний коефіцієнт тепловіддачі?
5. Що таке визначальна температура і визначальний розмір?
6. Як здійснюється перехід від ламінарного режиму руху середовища до турбулентного?

6.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Перевірити готовність усіх елементів установки до експерименту. Виміряти діаметр та довжину циліндра.
2. Увімкнути нагрівник.
3. Поступово встановити необхідну температуру зовнішньої поверхні циліндра, регулюючи електричну потужність нагрівника.
4. Зафіксувати наявність стаціонарного теплового режиму вільною конвекцією (про початок стаціонарного режиму свідчить сталість у часі температури на зовнішній поверхні циліндра).

5. Провести вимірювання не менше трьох разів через кожні 10 ... 15 хвилин. При вимірюваннях фіксувати температуру, силу струму та падіння напруги на нагрівнику (або безпосередньо потужність нагрівника).

6. Змінити потужність нагрівника (тобто встановити іншу температуру на зовнішній поверхні циліндра) і повторити вимірювання за п. 5 при новому значенні температури.

7. Результати серій (режимів експерименту) занести до таблиці 6.2.

Таблиця 6.2 – Результати експерименту

№	$\Delta U, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$P, \text{ В}$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	$\bar{t}_{\text{ноє}} = \frac{\sum t}{7}$
1	50	0,4	20	130	115	125	122	111	124	122	121,3
2	100	0,8	80	297	249	282	269	243	274	268	268,9
3	150	1,2	180	420	345	395	374	346	385	374	377

8. Вимірювання величини α_k циліндра стаціонарним методом вимушеною конвекцією.

9. Зафіксувати швидкість повітряного потоку на рівні $w = 10 \text{ м/с}$ ($U = 190 \text{ В}$).

10. Подати на нагрівник зразка напругу 40 В.

11. Перевірити механічний нуль гальванометра, закоротивши термопару.

12. Дочекатись стаціонарного режиму, записати показання термопарі.

13. Розрахувати повний (сумарний) коефіцієнт тепловіддачі.

6.6 Зміст звіту

Вільна конвекція.

1. Обчислити середнє значення кожної виміряної величини;
 2. Розрахувати для кожного, рівня стаціонарного температурного режиму:

3. Тепловий потік P , Вт, що виділяється нагрівником і переноситься крізь бокову поверхню порожнистого циліндра

$$P = I \cdot \Delta U, \text{ Вт}, \quad (6.12)$$

де I – сила струму, А;

ΔU – падіння напруги на нагрівнику, В.

4. Середню температуру поверхні циліндра $\bar{t}_{нов}$, (як середнє арифметичне значень, які виміряні у різних точках поверхні циліндра) і різницю температур:

$$\Delta t = t_{нов} - t_c. \quad (6.13)$$

5. Сумарний коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_k = \frac{P}{F(t_{нов} - t_c)}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (6.14)$$

6. Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням

$$\alpha_{випр} = \frac{\varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F}{t_{нов} - t_c}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (6.15)$$

де $\varepsilon = 0,022 \dots 0,031$ для латуні виполіруваної при $t_{нов} = 50 \dots 350$ °С;
 $\varepsilon = 0,023$ – для міді виполіруваної при $t_{нов} = 115$ °С.

7. Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією

$$\alpha_k = \alpha_\Sigma + \alpha_{випр}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (6.16)$$

8. Коефіцієнт об'ємного розширення повітря

$$\beta = \frac{1}{T}, \text{ К}^{-1}, \quad (6.17)$$

де $T = \bar{t} + 273$, К.

9. Результати розрахунків занести до таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 – Результати розрахунків

№	$\alpha_k, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	$\beta \cdot 10^{-3}, \text{К}^{-1}$	$T, \text{К}$	$P, \text{Вт}$	$\Delta t, \text{°С}$

Вимушена конвекція.

Стационарний метод. При дослідженні коефіцієнта тепловіддачі стаціонарним методом всередині циліндра монтується електричний нагрівник. У сталому тепловому стані енергія, яка виділяється у нагрівникові, віддається зовнішніми стінками циліндра. Вона пов'язана із коефіцієнтом тепловіддачі такою залежністю

$$P = \alpha_{\Sigma} \cdot (t_{noe} - t_c) \cdot F, \text{Вт} \quad (6.18)$$

де P – потужність нагрівника, Вт;

F – площа поперечного перерізу поверхні циліндра, м^2 ;

t_{noe}, t_c – температури поверхні циліндра і навколишнього середовища, К;

α_{Σ} – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Звідси

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{P}{F(t_{noe} - t_c)}. \quad (6.19)$$

Через те, що з поверхні циліндра теплота віддається навколишньому середовищу не тільки конвективним шляхом, але й випромінюванням, одержане значення α_{Σ} є сумарним:

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{конв} + \alpha_{випр}, \quad (6.20)$$

де $\alpha_{конв}, \alpha_{випр}$ – конвективна і промениста складові коефіцієнта тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Величину $\alpha_{випр}$ може бути обчислено за формулою (4.13):

$$\alpha_{випр} = \frac{\varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{noe}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F}{t_{noe} - t_c}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}), \quad (6.21)$$

де ε – міра чорноти поверхні циліндра;

$C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Обчисливши величину $\alpha_{\text{випр}}$ і віднявши її від сумарного коефіцієнта тепловіддачі α_{Σ} , остаточно визначають величину $\alpha_{\text{конв}}$.

6.7 Рекомендована література

1. Беляев Н. М. Основы теплопередачи. – Киев: Вища школа, 1989. – 334 с.
2. Металлургическая теплотехника / В. А. Кривандин, В. А. Арутюнов и др. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.
3. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 1985. – 416 с.
4. Эккерт Э., Дрейк Р. Теория тепло- и массообмена. – М.: Энергоиздат, 1961. – 680 с.
5. Михеев М. А., Михеева П. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
6. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. – М.: Машгиз, 1957. – 304 с.
7. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. – М.: ГИТТЛ, 1994. – 408 с.
8. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1979. – 469 с.

