

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до лабораторних робіт з дисциплін
«Теоретичні основи теплотехніки»,
«Термодинаміка та теплопередача»,
«Технічна термодинаміка»
для студентів денної та заочної форм навчання

2014

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін «Теоретичні основи теплотехніки», «Термодинаміка та теплопередача», «Технічна термодинаміка» для студентів денної та заочної форм навчання / Укл. : Рябошапка Н. Є., Євсєєва Н. О., Сухонос Р. Ф. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2014. – 74 с.

Укладачі:	Н. Є. Рябошапка, ст. викл. Н. О. Євсєєва, асист. Р. Ф. Сухонос, магістр
Рецензент:	В. В. Луньов, д.т.н., професор
Відповідальний за випуск:	Г. І. Слинько, д.т.н., професор

Затверджено
на засіданні кафедри
“Теплотехніка і гідравліка”.
Протокол № 8
від 14 квітня 2014 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1	
Вимірювання температури.....	5
1.1 Програма роботи.....	5
1.2 Методи вимірювання температури.....	5
1.3 Способи виготовлення термопар.....	11
1.4 Порядок виготовлення термопари.....	14
1.5 Градування термопар.....	14
1.6 Контрольні запитання.....	16
1.7 Література.....	17
2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2	
Вимірювання швидкості і витрати повітряного потоку за допомогою стандартної діафрагми.....	18
2.1 Програма роботи.....	18
2.2 Дослідження параметрів газового потоку.....	18
2.3 Динаміка повітря у трубопроводі при наявності діафрагми.....	19
2.4 Опис експериментальної установки.....	23
2.5 Порядок підготовки та проведення експерименту.....	24
2.6 Обробка результатів вимірювання.....	24
2.7 Контрольні запитання.....	25
2.8 Література.....	26
3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3	
Визначення швидкості і витрати повітряного потоку за допомогою пневмометричної трубки Піто-Прандтля.....	27
3.1 Програма роботи.....	27
3.2 Розподіл швидкості повітряного потоку в трубопроводі і методика його вимірювання.....	27
3.3 Опис експериментальної установки.....	30
3.4 Порядок підготовки та проведення експерименту.....	31
3.5 Обробка результатів експерименту.....	31
3.6 Контрольні запитання.....	35
3.7 Література.....	35
4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4	
Дослідження теплопередачі циліндра вільною конвекцією і випромінюванням.....	36
4.1 Програма роботи.....	36
4.2 Конвективний теплообмін.....	36
4.3 Тепловіддача при вільному обтіканні поверхні твердого тіла.....	39

4.4 Тепловіддача випромінюванням від поверхні твердого тіла до газу..	40
4.5 Методика проведення експерименту.....	41
4.6 Опис експериментальної установки.....	42
4.7 Порядок підготовки та проведення експерименту.....	43
4.8 Обробка результатів вимірювань.....	44
4.9 Контрольні запитання.....	45
4.10 Література.....	46
5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5	
Дослідження тепловіддачі при вимушеному поздовжньому обтіканні поодинокого циліндра повітряним потоком.....	47
5.1 Програма роботи.....	47
5.2 Тепловіддача при вимушеному поздовжньому обтіканні поверхні...	47
5.3 Методика проведення експерименту.....	51
5.4 Опис експериментальної установки.....	54
5.5 Порядок підготовки та проведення експерименту.....	56
5.6 Вимірювання величини α_k циліндра методом регулярного режиму першого роду.....	56
5.7 Визначення залежності.....	57
5.8 Контрольні запитання.....	57
5.9 Література.....	58
6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6	
Дослідження стаціонарних процесів теплопровідності в твердих тілах методом електротеплової аналогії.....	59
6.1 Програма роботи.....	59
6.2 Електротеплова аналогія.....	59
6.3 Теорія експерименту.....	61
6.4 Опис експериментальної установки.....	65
6.5 Підготовка та проведення експерименту.....	66
6.6 Обробка результатів вимірювань.....	69
6.7 Визначення температури різальної крайки різця методом ЕТА.....	70
6.8 Визначення поля температур навколо труби, що закладена в ґрунт, та лінійної густини теплового потоку від труби.....	71
6.9 Визначення поля температур та теплового потоку в куті плавильної печі.....	72
6.10 Контрольні запитання.....	74
6.11 Література.....	74

ВСТУП

Експериментальне дослідження теплотехнічних процесів базується на проведенні досліду.

Первісний 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 дослідях, або за допомогою вихідних постулатів теорії.

В експериментах досліджуються основні характерні взаємодії в різних системах, які пов'язані з термодинамічними поняттями про енергію, форми її існування (механічну, внутрішню, теплову, електричну тощо) з урахуванням можливих трансформацій одних видів енергії в інші.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

Вимірювання температури

Мета роботи: ознайомлення з теоретичними положеннями, на основі яких проводяться вимірювання температур у техніці та експериментальних дослідженнях, придбання навичок у виготовленні та градуюванні термопар, у роботі з вимірювальними приладами

1.1 Програма роботи

1. Ознайомитись з принципами дії термопар, термометрів опору, пірометрів, принциповою схемою експериментальної установки.
2. Зробити вимірювання температури середовища в різних діапазонах.
3. Провести обробку експериментальних результатів, оцінити похибку експерименту.
4. Скласти звіт про виконану роботу.

1.2 Методи вимірювання температури

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, монотонно та однозначно;

- не залежний від інших параметрів;

- бути точно відтворюваним та вимірюватись простим і надійним способом.

Усі реальні термометричні параметри декілька відхиляються від вимог, що перелічені вище.

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.

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 до $+2500$ °С.

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

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.

Величина термо-е.р.с. для даної термопари залежить від температури спаїв, $E = f(t, t_0)$.

Якщо t_0 підтримується сталою, то термо-е.р.с. однозначно визначається величиною t . Тобто, вимірюючи термо-е.р.с., можна визначити температуру t .

Термоелектричний перетворювач (рисунок 1.1) складається з термоелемента, який утворено термоелектродами 1-2 та 2-3-1, що виконані з різних, звичайно металевих провідників.

Характеристики найбільш розповсюджених у лабораторній практиці термопар наведені у таблиці 1.1.

Склад термоелектродних матеріалів такий:

- константан: 60 % Cu + 40 % Ni;
- копель: 56 % Cu + 44 % Ni;
- алюмель: 94,5 % Ni + 2 % Al + 2 % Mn + 1 % Si + 0,5 % Co;
- хромель: 90,5 % Ni + 9,5 % Cr;
- НК – нікель-кобальтовий сплав;
- СА – сплав, який містить кремній і алюміній.

Термо-е.р.с. термопари невелика (0,01 ... 0,06 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 установлення 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.

Так, наприклад, мідь-константанова термопара, що найчастіше використовується для низькотемпературних вимірювань, має при

температурі $T = 293 \text{ К}$ чутливість 40 мкВ/К , при $T = 90 \text{ К}$ – 17 мкВ/К , а при $T = 20 \text{ К}$ – усього 5 мкВ/К .

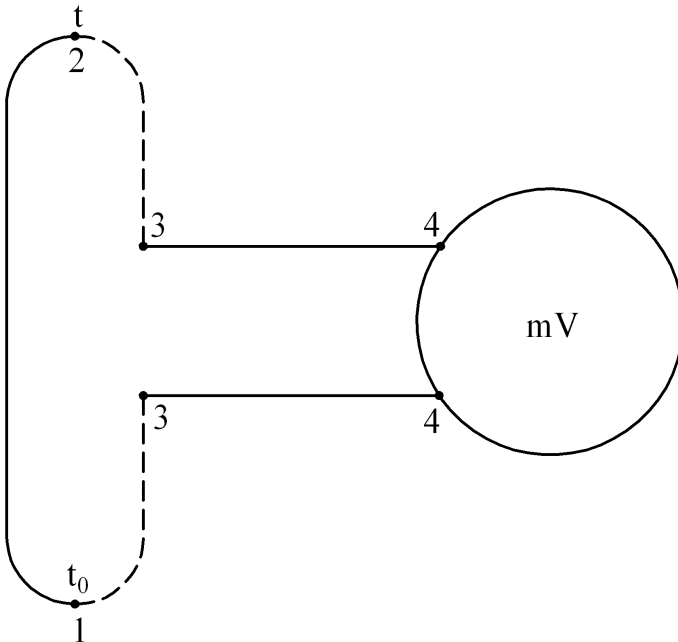


Рисунок 1.1 – Схема термоелектричного перетворювача

До матеріалів, які призначені для виготовлення термопар, ставиться ряд вимог:

- вони повинні у межах вимірюваних температур не змінювати своїх фізичних властивостей, не окислюватись;
- температурний коефіцієнт електричного опору повинен бути мінімальним, а електропровідність – високою;
- величина термо-е.р.с. електродів термопари повинна бути достатньою для точних вимірювань і змінюватись однозначно в залежності від температури;
- термоелектродні матеріали повинні вироблятись із незмінними властивостями у великих кількостях.

Назва термопар (найменування)	Позначення		Межі застосування, °C		Величина термо-е.р.с., мВ при $t(t_o = 0\text{ }^{\circ}\text{C})$						
	типів термопар	градуювання	тривале	коротко-часне	100°C	200°C	400°C	600°C	800°C	1000°C	1300°C
Стандартні											
Платинородій (10 % Rh) -платина Платинородій (30 % Rh) Платинородій (6 % Rh) Хромель-алюмель Сплави НК-СА Хромель-копель	ТПП	ПП-1	1300	1600	0,64	1,420	3,240	5,220	7,320	9,570	13,15
	ТПР	ПР 30/6	1600	1800	–	–	0,812	1,821	3,201	4,913	7,982
	–	ХА	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	ТХА	НС	1000	1300	4,10	8,13	16,39	24,90	33,31	41,31	52,43
	ТНС	ХК	1000	1000	–	–	1,60	5,36	9,41	13,39	–
ТХК	–	600	800	800	6,90	14,65	31,53	49,00	66,40	–	–
Нестандартні											
Мідь-константан	ТМК	МК	400	600	4,16	8,87	20,04	–	–	–	–
Залізо-константан	ТЗК	ЗК	600	800	5,15	10,60	21,09	33,35	–	–	–
Залізо-копель	–	–	600	800	5,75	12,00	24,60	37,40	51,15	–	–
Вольфрам-молибден	–	ВМ	2000	2300	–	–	–	–	–	–	–
Вольфрам (5 % Re) - реній (80 % W + 20 % Re)	–	ВР5/20	2000	2300	–	–	–	–	–	–	–

Найбільш розповсюджені термопари, які використовуються для вимірювання температури нижче 275 К, наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2

Назва термопари	Термо-е.р.с., мВ при $T_o = 273 \text{ К}$
Мідь-константан	4,26
Мідь-копель	4,75
Хромель-копель	6,95
Залізо-копель	5,75
Хромель-алюмель	4,10

Термометри опору використовуються у діапазоні температур від -270 до $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$, забезпечуючи високу точність та надійність вимірювання.

Дія термометрів опору ґрунтується на властивості матеріалів змінювати електричний опір зі зміною температури за визначеним певним законом.

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

Відрізняють провідникові та напівпровідникові термометри опору.

Термометри опору провідникові виготовляють з мідного (ТОМ), платиного (ТОП) або нікелевого дроту товщиною $0,05 \dots 0,50 \text{ мм}$, який навивається на ізолюваний 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 $500 \dots 6000 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони працюють за принципом вимірювання випромінювальної нагрітими тілами енергії, яка змінюється в залежності від температури цих тіл.

У даній роботі розглядається спосіб визначення температури за допомогою термопари.

При градуванні всіх термометрів, приймається за основу термодинамічна шкала температур. Це пояснюється такими 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 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 тій 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.

1.3 Способи виготовлення термопар

Виготовлення термопар зводиться в основному до одержання якісного спаю термоелектродів, який повинен задовольнити таким вимогам:

- мати високу механічну міцність (місце спаю не повинно бути менш міцним, ніж матеріал термоелектродів);
- мати високу хімічну стійкість в агресивному середовищі – спай не повинен кородувати помітно швидше за термоелектроди;
- мати низький омичний опір;
- зона неоднорідності, що утворюється у спаї, повинна бути

мінімальною;

- усі перелічені властивості повинні зберігатись в усіх діапазонах температур, що вимірюються.

При виготовленні термопар для одержання якісного спаю в залежності від конкретних умов можуть бути використаними різні методи спаювання або зварювання:

- спаювання олов'яносвинцевими (для виготовлення термопар із верхньою границею вимірювання не більш 150 °С) і жорсткими мідно-сріблоцинковими припоями для виготовлення термопар із верхньою границею вимірювання до 700 °С;

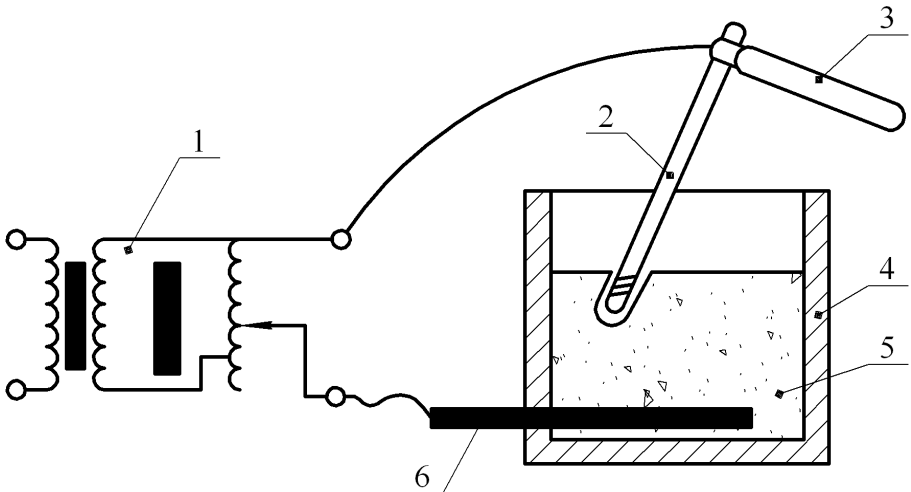
- газова зварка;
- електрозварка в дузі між двома електродами;
- електрозварка одним вугільним або графітовим електродом;
- зварка у ванні вугільного або графітного порошку;
- зварка у ваннах із рідким електролітом;
- зварка в оптичному зображенні Сонця або вольтової дуги.

Кожний з цих способів виготовлення термопар має належні йому як переваги, так і недоліки.

Так, використання газової зварки дозволяє робити зварювання термоелектродів у полум'ї пальника з мінімальними розмірами зони прогріву. Процес електрозварки у дузі між двома електродами простий і не трудомісткий але неминуче виникає насичення термоелектродів графітом, що призводить до появи (з'явлення) значної неоднорідності матеріалу в зоні спаю (при зварці спаїв високотемпературних термопар часто використовують електроди з вольфраму з подачею в зону дуги інертного газу – аргону з невеликою кількістю кисню). Конденсаторна зварка термопар, яка здійснюється за рахунок розряду батареї конденсаторів, відзначається швидкістю (час зварювання вимірюється мілісекундами), причому зона прогріву не набагато більша діаметра термоелектродів, що зварюються (0,05 ... 1,00 мм) і місце спаю характеризується однорідністю. Особливістю зварки в оптичному зображенні Сонця або вольтової дуги є можливість виконувати зварювання термоелектродів у повністю інертній атмосфері без забруднення зони зварки будь-якими домішками, причому оптична система з великою світлосилою дозволяє одержувати в зображенні зведену температуру, яка перевищує половину температури джерела випромінювання (Сонця або вольтової дуги). Способи електрозварки одним вугільним або

графітним електродом у ванні графітового або вугільного порошку, у ваннах з рідким електролітом відрізняються від усіх вказаних способів насамперед простотою і доступністю одержання термопар. Їх об'єднує те, що джерелом напруги для цих способів зварки служить звичайний лабораторний трансформатор, один кінець вихідної навитки якого з'єднаний з пристроєм – затиском скрутки термоелектродів, інший – відповідно з вугільним або графітовим електродом, які закріплені у спеціальному держаку з ручкою. Зварювання виконується у ванні, що зроблена з ізоляційного матеріалу і заповнена зернистим графітом або електродним вугіллям, рідким електролітом, етиловим спиртом або розчином нашатирю.

У даній лабораторній роботі для виготовлення термопари використовується зварювання з графітовим порошком на установці, схематичне зображення якої представлено на рисунку 1.2.



1 – автотрансформатор; 2 – термопара, що зварюється;
3 – держак із затиском для термопари; 4 – тигель (ванна);
5 – графітова засипка (порошок); 6 – нижній електрод

Рисунок 1.2 – Схема пристрою для зварювання термопар у графітній ванні

Процес зварювання виконують в об'ємі ванночки, на дні якої встановлюють шину 6, що приєднується до одного з виводів автотрансформатора 1. До другого виводу приєднується гнучкий дріт

із затиском 3 на кінці. У затиску закріплюють підготовлені до зварювання термоелектроди 2. При зануренні скрутки у графітову ванну 4 зерна графіту, що прилягають до скрутки швидко нагріваються. Розжарений графітовий порошок нагріває скрутку до оплавлення з утворенням кульки.

1.4 Порядок виготовлення термопар

1. Відмотати від котушки та відрізати термоелектродні дроти такої довжини, що дозволила б підключити термопару до приладу, який має реєструвати термо-е.р.с.

2. Звільнити кінці дротів від ізоляції, зачистити їх, виконати скрутку в 2...4 оберти. Кінець скрутки рівно підрізати ножицями або гострозубцями.

3. При вимкненому трансформаторі встановити скрутку у затисковий пристрій таким чином, щоб її кінець виступав на 40 ... 60 мм.

4. Перевірити підключення затискового пристрою та ванночки з порошком до трансформатора.

5. Виконуючи правила техніки безпеки при провадженні зварювальних робіт, ввімкнути трансформатор у мережу. При цьому ванночка з графітовим порошком повинна знаходитись на електроізоляційній підложці на віддалі від затискового пристрою.

6. Навести на скрутку тонкий шар флюсу (бури).

7. Взявши в одну руку захисну маску, а в іншу – держак із затисковим пристроєм, піднести скрутку близько до поверхні порошку.

8. Закрити обличчя щитком, занурити скрутку у ванну з графітом і, виконавши зварку, вийняти скрутку із ванни.

9. Вимкнути трансформатор із мережі.

10. Одержаний спай старанно (пильно) оглянути і обережно зачистити. Окисну плівку, що з'явилась у процесі зварки, можна усунути за допомогою слабкого розчину соляної кислоти з наступним промиванням водою.

1.5 Градування термопар

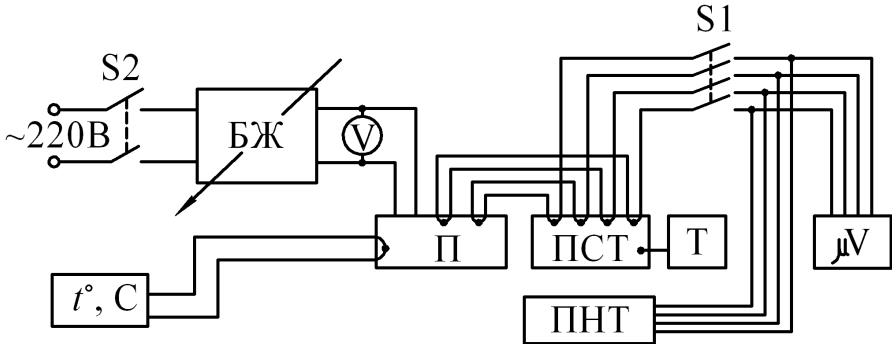
У метрологічній та вимірювальній практиці бажано

використовувати експериментально підтверджену залежність між температурою та термометричним параметром – у даному випадку між температурою та термо-е.р.с., яка розвинута тією чи іншою термопарою. Сучасна термодинаміка, однак, не має у своєму розпорядженні навіть приблизних залежностей такого роду. Тому прив'язка термопар до температурної шкали та їх градування полягає в чисто емпіричному визначенні залежності термо-е.р.с. від температури гарячого спаю при суворо (точно) зафіксованій температурі холодного спаю, що дорівнює $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ця залежність звичайно зображається графічно і називається градувальною кривою.

Інколи її представляють і у формі таблиці. Градування термопар виконується або в рідинних термостатах (при температурах від 20 до 100 $^{\circ}\text{C}$ у водяному і від 100 до 300 $^{\circ}\text{C}$ у масляному) за зразковим ртутним термометром, або у трубчастих електропечах (при температурах більших 300 $^{\circ}\text{C}$) за зразковою платиноводій-платиновою чи платино-родієвою термопарою.

Термо-е.р.с. термопар вимірюється гальванометрами або компенсаційними приладами (потенціометрами). Рід матеріалу сполучних дротів для точності вимірювання значення не має. Важливо, щоб температура у місцях з'єднання була однаковою. Але якщо термоелектроди виготовлені з дешевих та недефіцитних матеріалів, сполучні дроти вважають за краще виконувати як продовження цих термоелектродів. Для підтримування температури холодного спаю на рівні $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ його розташовують у пробірці з трансформаторним маслом, яка міститься в посудині Дьюара або в колбі будь-якого придатного за розмірами термоса, що наповнюється розкришеним льодом із дистильованої води та самою дистильованою водою. Колбу закривають товстою пробкою, яка має виводи для дротів.

Схему установки для градування термопар наведено на рисунку 1.3



БЖ – блок живлення з регулятором напруги печі; V – вольтметр; $t, ^\circ\text{C}$ – зразковий термометр; П – піч із термопарами гарячого спаю; S1 – перемикач термопар; ПСТ – посудина зі сталюю температурою; ПНТ – показчик номера термопар; μV – мікровольтметр ТЕРС; Т – термометр; S2 – вимикач “Мережа”

Рисунок 1.3 – Схема установки для градуювання термопар

Градування термопари виконується в такому порядку:

1. Ознайомитись зі схемою та відповідною їй установкою для градуювання термопар (рисунок 1.3).
2. Перевірити наявність льоду та води в посудині з пробірками, які заповнені трансформаторним маслом.
3. Ввімкнути тумблер “Мережа” S2 (рисунок 1.3).
4. Встановити напругу підігріву печі 150 В, повертаючи ручку регулятора в напрямку, що вказаний червоною стрілкою на блоці живлення, за індикатором “напруга живлення печі”.
5. Спостерігати температури в печі за зразковим термометром, перемикаючи термопари “перемикачем термопар” S1 (рисунок 1.3). Знімати показання термо-е.р.с. із приладу “Індикація ТЕРС” термопар, (мВ) через кожні $50\text{ }^\circ\text{C}$ за зразковим термометром у печі.

1.6 Контрольні запитання

1. Чи зберігаються значення коефіцієнтів об’ємного розширювання та видимого об’ємного теплового розширювання термометричної речовини?
2. Чи можна ртутним скляним термометром виміряти

температуру вищу за температуру кипіння ртуті (356,6 °C)?

3. У чому полягає суть термоелектричного явища?

4. Який принцип дії термоелектричних перетворювачів або термопар?

5. Який механізм виникання термо-е.р.с.?

6. Опишіть схему термопари.

7. Назвіть склад термоелектродних матеріалів константану, копелю, хромелю, алюмелю.

8. Які термопари вам відомі? Назвіть їх основні характеристики та область застосування.

9. Які існують способи виготовлення термопар?

10. Який порядок виготовлення спаю термоелектродів за допомогою електрозварки у ванні графітового порошку?

11. Як виконуються градування термопар?

12. Опишіть схему установки для градування термопар.

13. Який порядок градування термопар?

14. Які прилади існують для вимірювання температури тіла?

1.7 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.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

Вимірювання швидкості і витрати повітряного потоку за допомогою стандартної діафрагми

Мета роботи: вивчення призначення і конструкцій діафрагм, експериментальне дослідження та розрахунок швидкості і витрати повітряного потоку за допомогою стандартної діафрагми.

2.1 Програма роботи

1. Ознайомитись з описом методів вимірювання витрати.
2. Вивчити метод вимірювання витрати повітряного потоку за допомогою стандартної діафрагми.
3. Ознайомитись з експериментальною установкою та вимірювальними приладами.
4. Виміряти витрати повітря за допомогою стандартної діафрагми при різних перепадах тиску ΔP у діафрагмі.
5. Виконати розрахунки, що пов'язані з визначенням витрати повітря.
6. Побудувати графіки $G = f(\Delta P)$ та $w = f(\Delta P)$ для діафрагми.
7. Оформити звіт про виконану роботу.

2.2 Дослідження параметрів газового потоку

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. Найважливішим серед них є рівняння Бернуллі. Для випадку течії газу в закритому каналі:

$$P + \rho gh + \rho \frac{w^2}{2} + \sum \zeta \rho \frac{w^2}{2} = \text{const}, \quad (2.1)$$

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 перетворен-

ня кінетичної енергії потоку в потенційну енергію тиску на ту поверхню, набігаючи на яку потік загальмовується;

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

Кожний із доданків характеризує відповідно потенційну, кінетичну та втрачену енергію, що віднесені до 1 м³ 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.

2.3 Динаміка повітря у трубопроводі при наявності діафрагми

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 і, 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.

$$P_1 + \rho \frac{w_1^2}{2} + P_2 + \rho \frac{w_2^2}{2} + \Delta P_{\text{emp(1-2)}} \quad (2.2)$$

Тут індекс "1" відноситься до параметрів потоку перед діафрагмою, а індекс "2" – після діафрагми. $\Delta P_{\text{emp(1-2)}}$ – втрати тиску на шляху від перерізу "1" до перерізу "2", у даному випадку – це втрати на місцевий (локальний) опір діафрагми [1].

$$\Delta P_{\text{emp(1-2)}} = \xi \rho \frac{w_d^2}{2}; \quad \xi = \frac{D^2}{\varepsilon \cdot d^2} - 1;$$

$$\varepsilon = 0,57 + 0,043 \cdot \left(1,1 - \frac{d^2}{D^2} \right)^{-1},$$

де w_d – швидкість потоку в перерізі діафрагми, м/с;

ξ – коефіцієнт даного місцевого опору (залежить від виду місцевого опору і визначається звичайно дослідним шляхом);

ε – поправочний коефіцієнт, який враховує розширення газу під час руху крізь діафрагму.

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 перетворень одержимо

$$w_2 = \frac{\sqrt{\frac{2(P_1 - P_d)}{\rho}}}{\sqrt{1 + \left[\frac{D^2(1 - d^2/D^2)}{d^2(0,57 + 0,043)} - 1 \right]^2 - \frac{d^4}{D^4}}}. \quad (2.3)$$

Звідси об'ємна витрата дорівнює

$$V = w_2 \cdot F_2, \text{ м}^3/\text{с} \quad (2.4)$$

або

$$V = 3600 w_2 F_2, \text{ м}^3/\text{год.} \quad (2.5)$$

Масова витрата

$$G = \rho \cdot w_2 \cdot F_2, \text{ кг/с} \quad (2.6)$$

або

$$G = 3600 \rho \cdot w_2 \cdot F_2, \text{ кг/год.} \quad (2.7)$$

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,

$$V = \alpha \cdot F_\alpha \cdot \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}, \quad (2.8)$$

$$\text{де } F_\alpha = \frac{\pi \cdot d^2}{4}.$$

Для нестиглого середовища існує напівемпірична формула для

визначення годинної об'ємної витрати

$$V = 3,998 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (2.9)$$

де d – отвір діафрагми, мм.

Кінетична енергія потоку визначена динамічним (швидкісним) тиском

$$P_d = \rho \frac{w^2}{2} = P_{\Pi} - P_{CT}.$$

Звідси

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

тут P_{Π} – повний тиск або тиск гальмування потоку;

P_{CT} – статичний тиск.

Формула для визначення годинної масової витрати набуває вигляду:

$$G = 3,998 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot d^2 \sqrt{\rho \cdot \Delta P}, \text{ кг/год} \quad (2.10)$$

тому що

$$G = \rho \cdot V. \quad (2.11)$$

Значення, α в залежності від відношення площ, або квадратів діаметрів отвору діафрагми і внутрішнього перерізу труби наведені у таблиці 2.1.

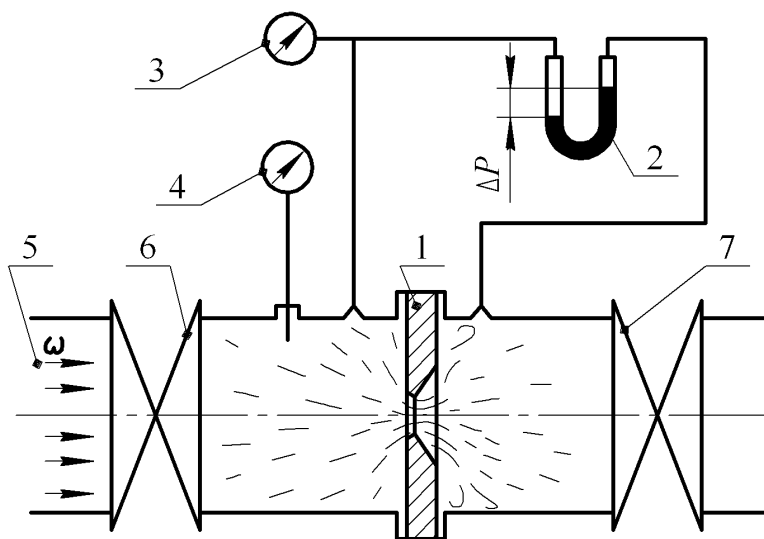
Таблиця 2.1

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

2.4 Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рисунок 2.1) 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. (кг/м^2); 3 – механічний манометр для вимірювання надлишкового тиску перед діафрагмою $P_{\text{над}}$, кг/м^2 ; 4 – термометр для вимірювання температури повітря перед діафрагмою t , $^{\circ}\text{C}$; 5 – компресор; 6, 7 – регулювальні вентиля.

Рисунок 2.1 – Схема експериментальної установки

2.5 Порядок підготовки та проведення експерименту

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 ... 0,2 кг/см², після чого виміряти параметри потоку повітря:

$P_{\text{над}}$ – надлишковий тиск повітря перед діафрагмою за показаннями механічного манометра 3, кг/см²;

ΔP – перепад тиску в діафрагмі за показаннями водяного манометра 2, мм вод. ст.;

t – температуру повітря перед діафрагмою за показаннями термометра 4, °C;

P_o – атмосферний барометричний тиск за показаннями барометра, кПа.

Виміряні величини занести в таблицю 2.2.

2.6 Обробка результатів вимірювання

1. Розрахувати абсолютний тиск повітря перед діафрагмою

$$P_a = P_o + P_{\text{над}}, \text{ Н/м}^2, (\text{Па}) \quad (2.12)$$

де P_o – атмосферний тиск, Па;

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

2. Визначити густину повітря перед діафрагмою за рівнянням стану Клапейрона

$$P = \frac{P_a}{RT}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.13)$$

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/м² (Па).

3. Знайти значення коефіцієнта витрати α з таблиці 2.1.

4. Обчислити значення годинних об'ємної та масової витрат за формулами (2.11) та (2.13)

5. Розрахувати швидкість потоку за формулою 2.3.

6. Результати розрахунків занести до таблиці 2.2.

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

8. За даними про похибку приладів і пристроїв, які одержуються від викладача і використовуються при вимірюваннях, визначити сумарну помилку експерименту.

Таблиця 2.2

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 (2.12)	Н/м ² (Па)	
ρ	за формулою (2.13)	кг/м ³	
α	за таблицею (2.1)	–	
V	за формулою (2.9)	м ³ /год	
G	за формулою (2.11)	кг/год	

2.7 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. Що таке коефіцієнт витрати?

2.8 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).

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

Визначення швидкості і витрати повітряного потоку за допомогою пневмометричної трубки Піто-Прандтля

Мета роботи: експериментальне дослідження швидкості та витрати вологого повітря, вивчення конструкції приладів для визначення вологості та витрати повітря, оволодіння технікою інженерного розрахунку витрати вологого повітря.

3.1 Програма роботи

1. Ознайомитись з методами вимірювання швидкості і витрати.
2. Освоїти прилад для оцінювання вологості повітря.
3. Вивчити конструкцію пневмометричної трубки Піто-Прандтля.
4. Вивчити метод вимірювання витрати вологого повітря за допомогою пневмометричної трубки.
5. Ознайомитись з експериментальною установкою та вимірювальними приладами.
6. Розрахувати витрату повітря.
7. Виконати розрахунки, які поєднані з визначенням витрати вологого повітря.
8. Скласти звіт про виконану роботу.

3.2 Розподіл швидкості повітряного потоку в трубопроводі і методика його вимірювання

Витрата газу, пари та рідини може бути виміряною за допомогою пневмометричної трубки Піто-Прандтля. На рисунку 3.2 показана принципова схема вимірювання динамічного (швидкісного) тиску. Повний тиск сприймається центральним отвором, а статичний тиск – крізь отвори, що розташовані по периметру кожуха центральної трубки.

Динамічний тиск, пов'язаний зі швидкістю потоку рівнянням Бернуллі:

$$P_D = \rho \frac{w^2}{2}, \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)}, \quad (3.1)$$

звідки швидкість

$$w = \sqrt{\frac{2P_D}{\rho}}, \text{ м/с}. \quad (3.2)$$

Швидкість потоку в різних точках перерізу трубопроводу неоднакова. Вона досягає максимальної величини на осі трубопроводу і зменшується біля стінок аж до нульового значення на поверхні стінок. швидкість, яка вимірюється за допомогою пневмометричної трубки, Являє собою місцеву швидкість потоку в тій точці, в якій встановлено трубку. Для визначення витрати необхідно знати середню швидкість потоку за його перерізом, тобто таку швидкість, яка будучи помноженою на площу перерізу трубопроводу, дає кількість повітря, що дійсно протікає крізь трубопровід за одиницю часу. Тому для визначення середньої швидкості потоку площу трубопроводу умовно розбивають на n ділянок з рівними площами і на кожній з цих ділянок визначають значення швидкостей, які відповідно дорівнюють $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$.

Середня швидкість потоку у трубопроводі визначається так

$$\bar{w} = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + \dots + w_n}{n} \quad (3.3)$$

У даній роботі переріз трубопроводу, умовно ділиться на $n = 3$ рівновеликих площ f_1, f_2, f_3 . У свою чергу кожна з площ f_1, f_2, f_3 , розділяється на дві рівні частини відповідно радіусам r_1, r_2, r_3 . (рисунок 3.1).

Підрахунок значень для рівновеликих площ трубопроводу діаметром 205 мм експериментальної установки дає такі величини:

$$r_1 = 42 \text{ мм}; r_2 = 72,5 \text{ мм}; r_3 = 93,5 \text{ мм}.$$

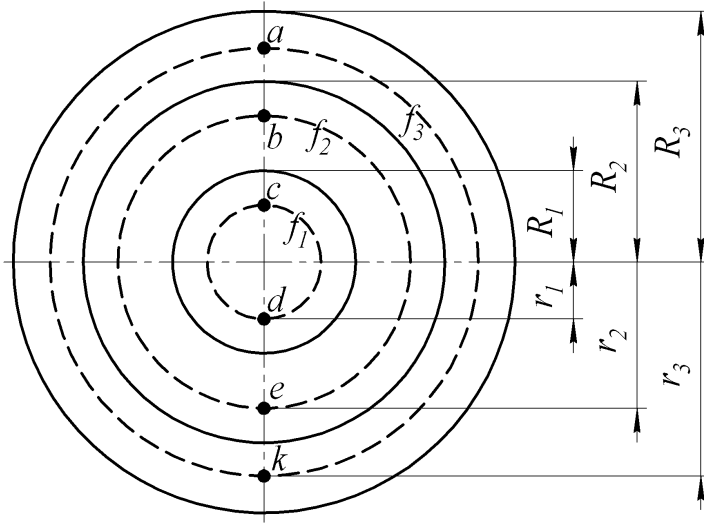


Рисунок 3.1 – Переріз трубопроводу

Спочатку обчислюють швидкості на рівновеликих площах f_1 , f_2 , f_3 як середньоарифметичні з двох вимірювань:

$$w_1 = (w_a + w_k) / 2;$$

$$w_2 = (w_b + w_e) / 2;$$

$$w_3 = (w_c + w_d) / 2.$$

Підставляючи в ці вирази співвідношення для швидкостей за формулою (3.2), одержимо:

$$\begin{aligned} w_1 &= \frac{\sqrt{P_{da}} + \sqrt{P_{dk}}}{\sqrt{2\rho}}, \text{ м/с;} \\ w_2 &= \frac{\sqrt{P_{db}} + \sqrt{P_{de}}}{\sqrt{2\rho}}, \text{ м/с;} \\ w_3 &= \frac{\sqrt{P_{dc}} + \sqrt{P_{dd}}}{\sqrt{2\rho}}, \text{ м/с.} \end{aligned} \quad (3.4)$$

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

$$V = 3600 \cdot F \cdot \bar{w}, \text{ м}^3/\text{год} \quad (3.5)$$

$$\bar{w} = \frac{w_1 + w_2 + w_3}{3}, \text{ м/с} \quad (3.6)$$

де $\bar{w}$ – середня швидкість потоку для всього перерізу трубопроводу. Годинна масова витрата повітря визначається за формулою:

$$G = \rho \cdot V = 3600 \cdot \rho \cdot \bar{w} \cdot F, \text{ кг/год}, \quad (3.7)$$

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

3.3 Опис експериментальної установки

Як джерело руху повітря використовується вентилятор 1, що розташований в одному з вільних перерізів горизонтальної аеродинамічної труби 2 (рисунок 3.2). Повітря з атмосфери подається вентилятором крізь вузол пневмометричної трубки 3, і крізь вихідний патрубок знову попадає в атмосферу.

Пневмометричну трубку вмонтовано в трубопровід із площею і перерізу $F = \pi \cdot d^2/4$. Схему пневмометричної трубки наведено на рис. 3.3. Для вимірювання повного тиску P_{Π} використовується отвір 1, для вимірювання статичного тиску $P_{ст}$ твори 2. Отвори 1 і 2 з'єднані з трубками 3 і 4. Якщо кінці трубок 3 і 4 з'єднати з диференціальним манометром 5, то його показання буде являти собою різницю повного та статичного тиску, тобто динамічний (швидкісний) тиск

$$P_{д} = P_{\Pi} - P_{ст}. \quad (3.8)$$

Виміряна різниця тисків дозволяє розрахувати швидкість потоку; повітря та його витрату, тобто динамічний (швидкісний) тиск.

3.4 Порядок підготовки та проведення експерименту

1. Ввімкнути вентилятор.
 2. Встановити пневмометричну трубку послідовно по рисках (що нанесені на трубці, які відповідають точкам "a", "b", "c" "d", "e", "к" на відповідних радіусах r_1, r_2, r_3 (див. рисунок 3.1).
 3. 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 психометричну таблицю приладу за показаннями вологого (мокрого) термометра t' і за різницею показань сухого та мокрого термометрів $(t - t')$ (рисунок 3.4).
 6. Виміряти температуру t , атмосферного повітря за ртутним термометром, який розташований в аеродинамічній трубі.
- Виміряні величини занести в таблицю 3.1.

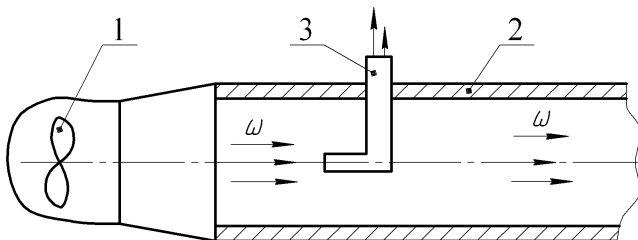


Рисунок 3.2 – Аеродинамічна труба

3.5 Обробка результатів експерименту

1. Розрахувати абсолютний тиск вологого повітря

$$P_a = P_o + P_{ст}, \text{ Н/м}^2 \text{ (Па)}. \quad (3.9)$$

2. Визначити густину вологого повітря за формулою:

$$\rho = \frac{P_a + \varphi P_n}{287(1 + \varphi) + 273\varphi}, \text{ кг/м}^3. \quad (3.10)$$

Цей вираз отримано на основі таких понять і методики. Густина вологого повітря:

$$\rho = \rho_{c.n.} + \rho_{в.п.}, \quad (3.11)$$

де $\rho_{c.n.}$ – густина сухого повітря кг/м^3 ;

$\rho_{в.п.}$ – густина водяної пари, кг/м^3 , що міститься у вологому повітрі.

Густина сухого повітря обчислюється за рівнянням стану Клапейрона:

$$\rho_{c.n.} = \frac{P_{c.n.}}{R_{c.n.} \cdot T}, \quad (3.12)$$

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

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

t – температура повітря, $^{\circ}\text{C}$;

$P_{c.n.}$ – парціальний тиск сухого повітря, Н/м^2 (Па).

За законом Дальтона

$$P_a = P_{c.n.} + P_{в.п.}, \quad (3.13)$$

де P_a – абсолютний тиск вологого повітря Н/м^2 (Па);

$P_{в.п.}$ – парціальний тиск водяної пари Н/м^2 (Па);

Відносна вологість φ , що визначається за психрометром, дорівнює:

$$\varphi = \frac{\rho_{c.n.}}{\rho''} = \frac{P_{c.n.}}{P_{н.п.}} \quad (3.14)$$

де ρ'' – густина сухої насиченої пари, кг/м^3 ;

$P_{н.п.}$ – парціальний тиск насиченої пари, Н/м^2 (Па).

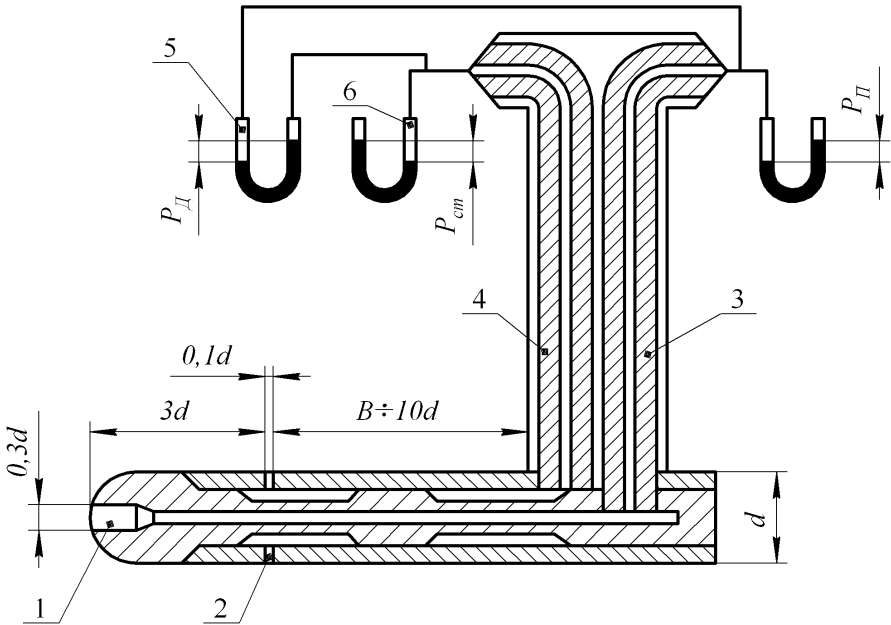


Рисунок 3.3 – Конструкція пневмометричної трубки Піто-Прандтля.

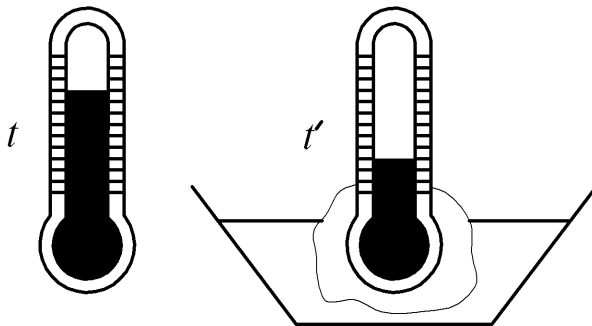


Рисунок 3.4 – До визначення відносної вологості повітря φ .

Величини ρ'' та $P_{н.п.}$ визначаються температурою t вологого повітря і не залежать від його тиску p_a . Густина сухої насиченої пари ρ'' та парціальний тиск насиченої пари $P_{н.п.}$ визначаються з таблиці 3.2 для насиченої водяної пари (за температурою).

3. Результати розрахунків, занести в таблицю 3.1.

4. За даними про похибку вимірювальних приладів, що використовуються в роботі, визначити сумарну помилку експерименту.

Таблиця 3.1.

Позначення величини	Засіб визначення величини	Одиниця вимірювання	Числове значення для точок					
			a	k	b	e	c	d
1	2	3						
$P'_д$	за дифманометром	кг/м ²						
$P_д$	розрахунок	Н/м ²						
$\sqrt{P_д}$	—”—	Н ^{1/2} /м						
$\Sigma\sqrt{P_д}$	—“—	Н ^{1/2} /м						
t	за термометром	°С						
P_o	за барометром	Н/м ² (Па)						
φ	за психрометром	% (ї)						
$P_{с.т.}$	за водяним манометром	кг/м ²						
		Н/м ² (Па)						
$P_{н.п.}$	з таблиці 3.2	Н/м ² (Па)						
P_a	за формулою (3.9)	Н/м ² (Па)						
ρ''	з таблиці 3.2	кг/м ³						
ρ	за формулою (3.10)	кг/м ³						
w_1, w_2, w_3	за формулою (3.4)	м/с						
$\bar{w}$	за формулою (3.6)	м/с						
V	за формулою (3.5)	м ³ /год						
G	за формулою (3.9)	кг/год						

Таблиця 3.2

$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н.п.}}, \text{Н/м}^2$	$\rho'', \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$P_{\text{н.п.}}, \text{Н/м}^2$	$\rho'', \text{кг/м}^3$
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

3.6 Контрольні запитання

1. Який фізичний закон є основою використання пневмометричної трубки для вимірювання швидкості потоку?
2. У чому міститься принцип роботи пневмометричної трубки?
3. Як улаштовано диференційний манометр?
4. Як визначається швидкість потоку за допомогою пневмометричної трубки?
5. Що є швидкістю потоку і як вона визначається?
6. Що є витратою потоку газу (наприклад, повітря) і як вона обчислюється?
7. Який з розглянутих методів вимірювання витрати має мінімальну помилку?
8. Які вимірювання проводились — прямі чи посередні?

3.7 Література

1. Мануйлов П. Н. 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).

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

Дослідження теплопередачі циліндра вільною конвекцією і випромінюванням

Мета роботи: експериментальне вивчення теплообміну при вільному обтіканні повітрям поодинокого циліндра, ознайомлення з методами експериментального дослідження та одержання навичок з проведення експерименту.

4.1 Програма роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою та вимірювальними приладами.
2. Провести вимірювання інтенсивності тепловіддачі поодинокого циліндра при вільній конвекції та випромінюванні в стаціонарному режимі.
3. Вивчити вплив різних факторів на тепловіддачу циліндра.
4. Обробити результати дослідів та представити їх в узагальненому вигляді $Nu = f(Gr, Pr)$.
5. Теоретично розрахувати інтенсивність теплообміну циліндра за умов проведення експерименту.
6. Порівняти результати розрахунку з даними експерименту.
7. Скласти звіт про виконану роботу.

4.2 Конвективний теплообмін

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_0 – 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

$$Q = \alpha_k \cdot (t_{нов} - t_c) \cdot F \cdot \tau, \text{ Дж}, \quad (4.1)$$

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 (4.1) 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 (ламінальний, перехідний, турбулентний); природа виникнення руху (вільна або вимушена); фізичні властивості середовища (коефіцієнт теплопровідності λ , теплоємність C_p , густина ρ , в'язкість $\nu(\mu)$; геометрична форма і розміри об'єкта 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) дослідів перенести на всю групу подібних явищ.

При узагальненні даних щодо конвективного теплообміну апроксимаційні залежності між критеріями подібності звичайно визначаються у вигляді $K_1 = C \cdot K_2^n \cdot K_3^m$.

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).

4.3 Тепловіддача при вільному обтіканні поверхні твердого тіла

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:

$$Nu_m = C \cdot Gr \cdot Pr^n. \quad (4.2)$$

Тут

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

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

C і n – емпіричні коефіцієнти;

$$Nu = \frac{\alpha_k \cdot \ell}{\lambda_c} \quad \text{– критерій Нусельта.} \quad (4.3)$$

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;

$$\beta = \frac{1}{T} \quad \text{– коефіцієнт об'ємного розширення, К}^{-1}.$$

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 .

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

Точно кажучи критеріальні рівняння для тіл різної форми повинні бути різними, тому що в цьому випадку порушується геометрична подібність. Однак виявляється, що універсальна залежність (4.2) із достатньою для практики точністю (помилка розрахунку за цим критеріальним рівнянням складає 5 ... 15 %) описує вільну конвекцію на поверхні тіл різної форми при відповідному виборі визначального розміру.

Крім того, для руху потоку, що має високу температуру, потрібно враховувати наявність тепловіддачі випромінюванням.

4.4 Тепловіддача випромінюванням від поверхні твердого тіла до газу

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:

$$Q_{випр} = \varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F \cdot \tau, \text{ Дж}, \quad (4.4)$$

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, Вт/(м²·К⁴);

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

T_c – абсолютна температура газу (середовища), К.

Враховуючи, що потік теплоти в результаті конвекції

$$P_{конв} = \alpha_k (t_{нов} - t_c) \cdot F, \text{ Вт}, \quad (4.5)$$

а в результаті теплового випромінювання

$$P_{випр} = \varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \text{ Вт}, \quad (4.6)$$

сумарний потік теплоти

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

або

$$P_{\Sigma} = \alpha_{\Sigma} (t_{нов} - t_c) \cdot F. \quad (4.7)$$

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

4.5 Методика проведення експерименту

Звичайно коефіцієнт тепловіддачі конвекцією α_k визначають за виразом (4.3) при відомих значеннях C і n . Визначення C і n виконують таким чином: логарифмуючи критеріальне рівняння (4.2) одержують:

$$\lg Nu = \lg C + n \cdot \lg(Pr \cdot Gr). \quad (4.8)$$

У системі координат ця залежність є прямою лінією (рисунок 4.1).

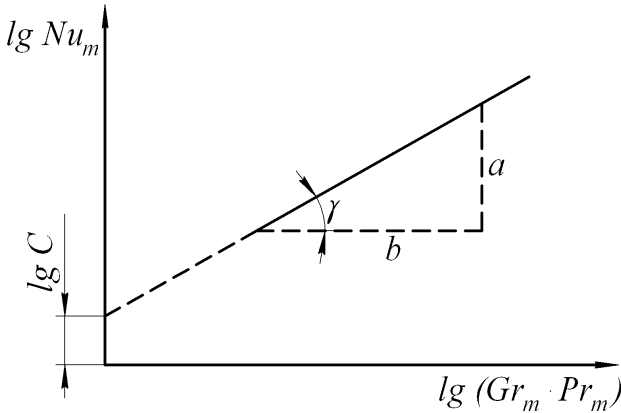


Рисунок 4.1 – До визначення C і n .

З рисунка 4.1 виходить, що $n \cdot \operatorname{tg} \gamma = \frac{a}{b}$ – кутовий коефіцієнт;

$$C = \frac{Nu}{Gr \cdot Pr}. \quad (4.9)$$

Таким чином, визначивши при проведенні експерименту значення критеріїв подібності Nu , Gr , Pr та побудувавши графік, як показано на рисунку 4.1, можна знайти значення сталих C і n для рівняння 4.2.

4.6 Опис експериментальної установки

Схему експериментальної установки наведена на рисунку 4.2.

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 вимірююна різниця температур $\Delta t = t_{noe} - t_c$.

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

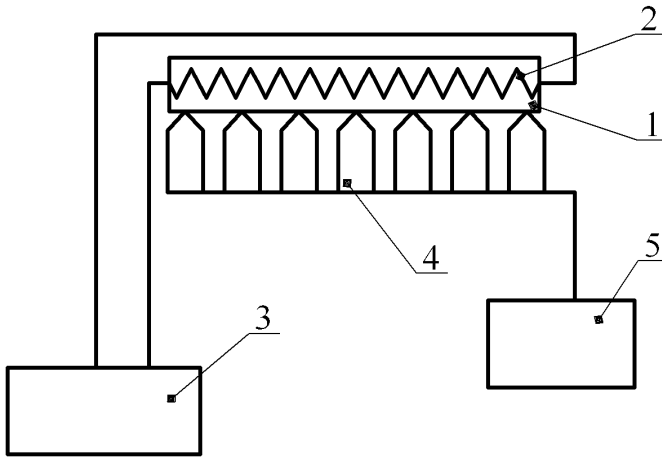


Рисунок 4.2 – Принципова схема експериментальної установки

4.7 Порядок підготовки та проведення експерименту

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 (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 4.1.

Таблиця 4.1

№	ΔU , В	I , А	P , В	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	$\bar{t}_{нов} = \frac{\sum t}{7}$
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

4.8 Обробка результатів вимірювання

1. Обчислити середнє значення кожної виміряної величини;

2. Розрахувати для кожного, рівня стаціонарного температурного режиму:

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

$$P = I \cdot \Delta U, \text{ Вт}, \quad (4.10)$$

де I – сила струму, А;

ΔU – падіння напруги на нагрівнику, В.

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

$$\Delta t = t_{нов} - t_c. \quad (4.11)$$

2.3. Сумарний коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_k = \frac{P}{F(t_{нов} - t_c)}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (4.12)$$

2.4. Коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням

$$\alpha_{випр} = \frac{\varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{нов}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F}{t_{нов} - t_c}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (4.13)$$

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

2.5. Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією

$$\alpha_k = \alpha_\Sigma + \alpha_{випр}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (4.14)$$

2.6. Коефіцієнт об'ємного розширення повітря

$$\beta = \frac{1}{T}, \text{ К}^{-1}, \quad (4.15)$$

де $T = \bar{t} + 273, \text{ К}$.

3. Результати розрахунків занести до таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

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

4.9 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. Що таке теплове випромінювання?

7. Як кількісно описати теплообмін випромінюванням між двома тілами?

8. Яка величина характеризує інтенсивність тепловіддачі випромінюванням?

9. Опишіть схему установки для визначення коефіцієнта тепловіддачі і способи його вимірювання?

4.10 Література

1. Беляев Н. М. Основи теплопередачи. – Киев: Вища школа, 1989. – 334 с.

2. Металлургическая теплотехника / В. А. Кривандин, В. А. Арутюнов и др. – М.: Металлургия, 1986. – 424 с.

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

Дослідження тепловіддачі при вимушеному поздовжньому обтіканні поодинокого циліндра повітряним потоком

Мета роботи: вивчення інтенсивності конвективного теплообміну при вимушеному поздовжньому обтіканні повітрям поодинокого циліндра, ознайомлення з методами експериментального дослідження та одержання навичок проведення експерименту.

5.1 Програма роботи

1. Ознайомитись з експериментальною установкою та вимірювальними приладами.
2. Провести вимірювання інтенсивності теплообміну поодинокого циліндра стаціонарним методом і методом регулярного режиму першого роду.
3. Обробити результати дослідів і представити їх в узагальненому вигляді.
4. Теоретично розрахувати інтенсивність теплообміну циліндра за умов проведення експерименту.
5. Порівняти результати розрахунку з даними експерименту.
6. Скласти звіт про проведену роботу.

5.2 Тепловіддача при вимушеному поздовжньому обтіканні поверхні

Для простоти припустимо, що рідиною омивається плоска поверхня (рисунок 5.1), а швидкість і температура рідини на віддалі від поверхні сталі і дорівнюють відповідно w_0 та t_0 .

Хай набіжний потік при $x = 0$ має рівномірний профіль швидкостей і температури.

При $x = 0$ біля стінки утворюється гідродинамічний пограничний шар, товщина якого зростає зі збільшенням координати.

У межах пограничного шару швидкість змінюється від нуля до швидкості незбуреного потоку. Течія у пограничному шарі може бути як ламінарною, так і турбулентною.

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

$$Re_x = \frac{w_o \cdot x}{\nu}, \quad (5.1)$$

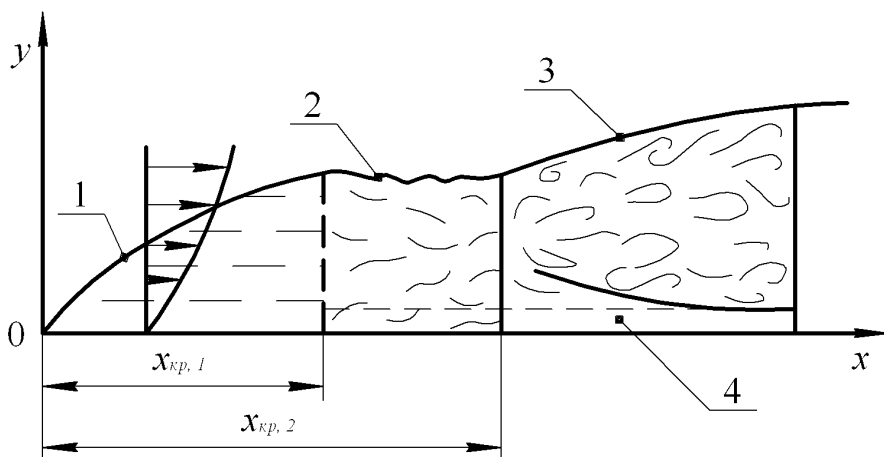
де W_o – швидкість набіжного потоку, м/с;

ν – кінематична в'язкість рідини, m^2/s ;

x – визначальний розмір перерізу, м.

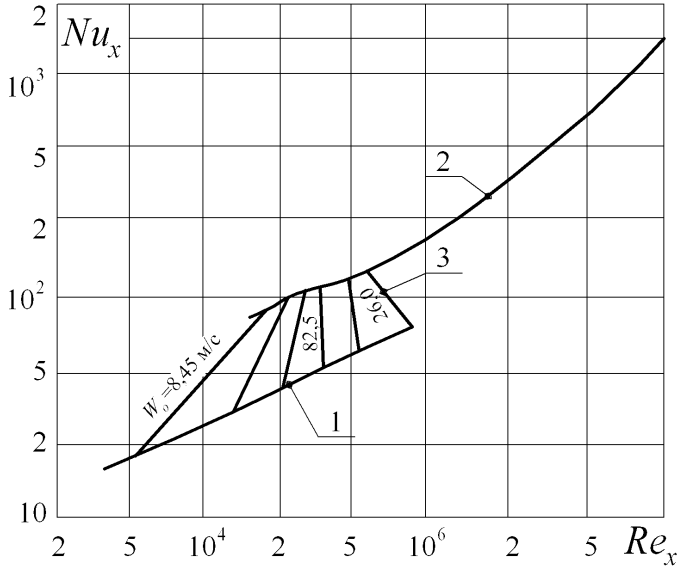
Перехід до турбулентного режиму може мати місце при значеннях Re_x приблизно від $1 \cdot 10^4$ до $4 \cdot 10^6$. Уяву про локальну тепловіддачу в перехідній області дає графік рисунок 5.2, що одержаний в експериментах з повітрям. Між кривими, що відповідні ламінарному 1 і турбулентному 2 пограничним шарам, розташоване сімейство кривих 3, що відповідають теплообміну в перехідній області. У практиці розрахунків перехідну зону замінюють точкою і приблизно приймають

$$Re_{x,KP1} = Re_{x,KP2} = Re_{x,KP} = 10^5 \quad (5.2)$$



1 – ламінарний пограничний шар; 2 – перехідна область;
3 – турбулентний пограничний шар; 4 – ламінарний в'язкий підшар.

Рисунок 5.1 – Схема пограничного шару.



- 1 – тепловіддача при ламінарному пограничному шарі;
 2 – тепловіддача при турбулентному пограничному шарі;
 3 – тепловіддача при перехідному режимі.

Рисунок 5.2 – Місцева тепловіддача від пластини, що обтікається поздовжнім потоком повітря

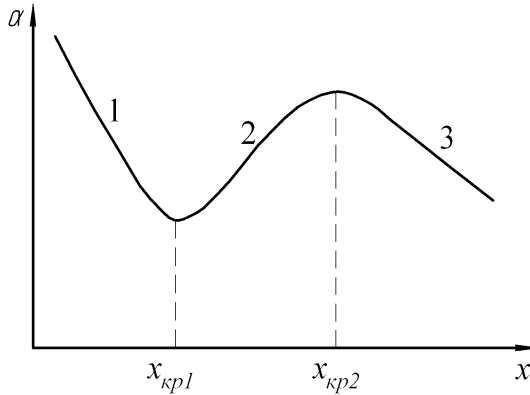
При наявності теплообміну, крім гідродинамічного, утворюється також тепловий пограничний шар. У його межах температура рідини змінюється від значення, яке дорівнює температурі t_o рідини на віддалі від пластини, до температури t_{cm} поверхні стінки.

Якісне змінювання місцевого коефіцієнта тепловіддачі вздовж пластини показано на рисунку 5.3. На початковій ділянці пластини 1 зменшення коефіцієнта тепловіддачі пов'язане з розвитком ламінарного пограничного шару. При цьому

$$Nu_{P,X} = 0,33 Re_{P,X}^{0,5} \cdot Pr_P^{0,33} \left(\frac{Pr_P}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (5.3)$$

де Nu – критерій Нуссельта;

Pr – критерій Прандтля.



1 – ламінарний режим; 2 – перехідний режим; 3 – турбулентний режим.

Рисунок 5.3 – Змінювання коефіцієнта тепловіддачі вздовж плоскої поверхні при змішаному режимі течії середовища в пограничному шарі

Перехідна зона 2 характеризується збільшенням тепловіддачі у зв'язку з появою турбулентного перемішування. Для зони розвинутого турбулентного пограничного шару 3 характерним є більш повільне змінювання α по довжині, яке описується залежністю [1]:

$$Nu_{P,X} = 0,33 Re_{P,X}^{0,8} \cdot Pr_{P,X}^{0,43} \left(\frac{Pr_p}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (5.4)$$

Для визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі до повітря можна використати більш прості співвідношення (5.5) і (5.6), що одержані на основі рівнянь (5.3) і (5.4), вважаючи $Pr = 0,71$:

а) при ламінарному режимі течії в пограничному шарі

$$Nu_{P,I} = 0,57 \cdot Re_{P,I}^{0,5}; \quad (5.5)$$

б) при турбулентному режимі течії у пограничному шарі

$$Nu_{P,I} = 0,032 \cdot Re_{P,I}^{0,8}. \quad (5.6)$$

У розрахункових формулах (5.3) ... (5.6) за визначальну

прийнято температуру набіжної на тіло рідини t_o , поміченої індексом “ p ” (виключення складає величина Pr_{cm} яка обирається за температурою у стінки). Як визначальний розмір обрано координату x , що відлічується від початку пластини, або довжину l поверхні, яка обтікається рідиною.

Формули, що визначають тепловіддачу пластини, можуть бути використаними також для розрахунку тепловіддачі при зовнішньому поздовжньому обтіканні поодинокого циліндра, якщо його діаметр істотно більше ніж товщина пограничного шару [1].

5.3 Методика проведення експерименту

В експерименті для вимірювання інтенсивності теплообміну поодинокого циліндра використовуються два методи: стаціонарний метод і метод регулярного режиму першого роду.

Стаціонарний 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

$$P = \alpha_{\Sigma} \cdot (t_{noe} - t_c) \cdot F, \text{ Вт} \quad (5.7)$$

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

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{P}{F(t_{noe} - t_c)} \quad (5.8)$$

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

$$\alpha_{\Sigma} = \alpha_{конв} + \alpha_{випр}, \quad (5.9)$$

де $\alpha_{\text{конв}}$, $\alpha_{\text{випр}}$ – конвективна і промениста складові коефіцієнта тепловіддачі, Вт/(м²·К). Величина $\alpha_{\text{випр}}$ може бути обчисленою за формулою (4.13):

$$\alpha_{\text{випр}} = \frac{\varepsilon \cdot C_o \left[\left(\frac{T_{\text{нов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right] \cdot F}{t_{\text{нов}} - t_c}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (5.10)$$

де ε – міра чорноти поверхні циліндра;

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

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

Метод регулярного режиму. У методі регулярного режиму коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулою:

$$\alpha = \frac{1}{\psi} \cdot \frac{C}{F} \cdot m_o, \quad (5.11)$$

де ψ – критерій нерівномірності температурного поля дослідного тіла;

m_o – темп охолодження, с⁻¹;

C – повна теплоємність, Дж/К;

F – поверхня теплообміну тіла, м²;

При охолодженні металевого зразка в повітряному середовищі можна вважати, що за весь час експерименту розподіл температур залишається рівномірним і $\psi = 1$. Тоді формула (5.11) приймає вид

$$\alpha = \frac{C}{F} \cdot m_o. \quad (5.12)$$

Значення темпу охолодження може бути визначеним в експерименті по охолодженню нагрітого зразка, який занурюється у середовище. У цьому випадку з початком регулярного режиму

величина температури перегріву в будь-якій точці тіла відносно температури навколишнього середовища змінюється за експоненціальним законом [5]:

$$v = v_o \cdot e^{-m_o \tau}, \quad (5.13)$$

де t – температура тіла, °C;

$v = (t - t_o)$ – величина температури тіла в момент часу τ , °C;

v_o – величина температури перегріву тіла й початковий момент часу.

Якщо побудувати графік у напівлогарифмічних координатах вздовж осі ординат відкладається $\ln v$, вздовж осі абсцис – час τ , с, то одержується пряма лінія, тангенс кута нахилу якої дорівнює темпу охолодження (рисунок 5.4), тобто

$$m_o = \frac{\ln v_1 - \ln v_2}{\tau_1 - \tau_2}. \quad (5.14)$$

Враховуючи, що температура перегріву v виражається показанням гальванометра n , поділок, чутливість гальванометра Ku , МВ/поділ, і чутливість термопари Km , К/МВ.

$$v = n \cdot Ku \cdot Km. \quad (5.15)$$

А враховуючи, що для невеликого діапазону температури ($0 < v < 30$ К) $Km = const$, формулу (5.14) можна представити у вигляді:

$$m_o = \frac{\ln n_1 - \ln n_2}{\tau_1 - \tau_2}. \quad (5.16)$$

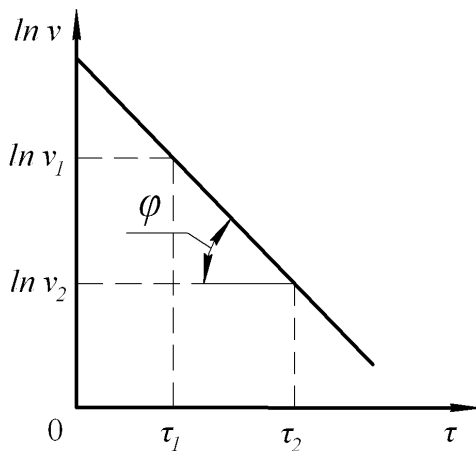


Рисунок 5.4 – До визначення темпу охолодження m_o

Таким чином, при визначенні темпу охолодження немає потреби знати ні чутливість гальванометра, ні чутливість термопари; достатньо побудувати залежність натурального логарифма показань гальванометра від часу:

$$\ln n = f(\tau). \quad (5.17)$$

5.4 Опис експериментальної установки

Зразок (рисунок 5.5) складається з мідного корпусу 1, всередині якого на керамічному трубчастому каркасі 2 намотано нагрівник 3. На поверхні циліндра монтується спай диференціальної ХА-термопари. Холодний спай термопари розташовується в аеродинамічній трубці 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). Зразок 2 (рисунок 5.6) встановлюється в центральній зоні аеродинамічної труби 1, крізь яку продувається повітря.

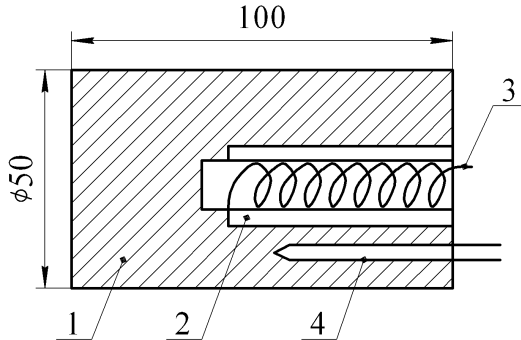
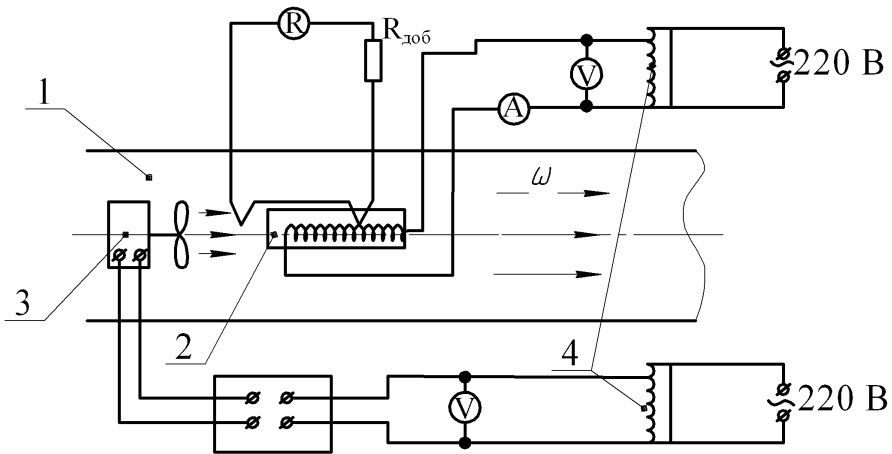


Рисунок 5.5 – Конструкція зразка



1 – аеродинамічна труба; 2 – зразок; 3 – електродвигун вентилятора; 4 – автотрансформатор

Рисунок 5.6 – Схема силового живлення (постачання) та температурних вимірювань

Швидкість потоку повітря залежить від частоти обертів крильчатки вентилятора, яка змінюється шляхом варіювання напруги на електродвигуні 3 за допомогою автотрансформатора 4. Для вимірювання напруги, яка у даному випадку є мірою швидкості

поток, використовують вольтметр.

Потужність струму, що подається на нагрівник зразка, вимірюється за допомогою вольтметра і амперметра. Різниця температур між поверхнею циліндра і повітрям вимірюється диференційною термopарою, яку з'єднано з реєструючим приладом (гальванометром).

5.5 Порядок підготовки та проведення експерименту

Вимірювання величини α_k циліндра стаціонарним методом.

1. Зафіксувати швидкість повітряного потоку на рівні $w = 10$ м/с ($U = 190$ В).

2. Подати на нагрівник зразка напругу 40 В.

3. Перевірити механічний нуль гальванометра, закоротивши термopару.

4. Дочекатись стаціонарного режиму, записати показання термopари.

5. Визначити поверхню циліндра і за формулою (5.8). розрахувати повний (сумарний) коефіцієнт тепловіддачі.

5.6 Вимірювання величини α_k циліндра методом регулярного режиму першого роду

1. Експеримент проводити при тій же швидкості повітряного потоку $w = 10$ м/с ($U = 190$ В) і тій же потужності нагрівника ($U = 40$ В).

2. Вимкнути вентилятор і дочекатися, коли "зайчик" гальванометра відхилиться на 140 поділок.

3. Ввімкнувши вентилятор (за п. 1) і вимкнувши нагрівник зразка, записувати показання гальванометра через кожну хвилину.

4. За даними дослідів побудувати зведений графік залежності $\ln n = f(\tau)$ та визначити величину m_0 .

5. За формулою (5.12) визначити значення сумарного коефіцієнта α_Σ .

6. За формулою (5.10) обчислити променисту складову (коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням) $\alpha_{\text{випр.}}$.

Величину $T_{\text{нов}}$ прийняти рівною її середньому значенню на відповідній ділянці напівлогарифмічного графіка:

$$T_{нов} = T_c + \nu = Km \cdot Ku \cdot \left(\frac{n_1 + n_2}{2} \right) + T_c. \quad (5.17)$$

8. Обчислити конвективну складову (коефіцієнт тепловіддачі конвекцією) α_k сумарного коефіцієнта тепловіддачі.

9. Порівняти значення α_k , що одержані в стаціонарному та регулярному режимах, із теоретичними розрахунками за формулами (5.5) і (5.6).

5.7 Визначення залежності

1. Повторити вимірювання α_k двома методами при інших швидкостях повітряного потоку $w = 8$ м/с і $w = 6$ м/с. Для цього установити напругу електродвигуна вентилятора 155 і 100 В відповідно.

2. За середніми значеннями α_k , що одержані двома методами, для трьох швидкостей потоку побудувати графік залежності $Nu = f(Re)$.

5.8 Контрольні запитання

1. Як здійснюється перехід від ламінарного режиму руху середовища до турбулентного?

2. Як змінюється коефіцієнт тепловіддачі по довжині плоскої поверхні?

3. За яких умов можна використати формули, що визначають тепловіддачу від пластини, для розрахунку тепловіддачі при зовнішньому поздовжньому обтіканні поодинокого циліндра?

4. Як зміниться коефіцієнт α_Σ якщо вимірювання температури поверхні зробити до встановлення стаціонарного режиму?

5. Як зміниться результат вимірювання у стаціонарному і регулярному режимах, якщо спай термопар розташувати за циліндром по ходу обтікального потоку повітря?

6. У чому полягають основні теоретичні передумови теорії регулярного режиму першого роду?

7. Що таке темп охолодження m_o ?

8. Чому в даній роботі критерій ψ приймається рівним одиниці?

9. Як враховується промениста складова сумарного коефіцієнта

тепловіддачі від циліндра?

10. Як впливає неточність значення чутливості термопари і гальванометра (реєструючого приладу) на вимірювання темпу охолодження?

11. Як впливає на кінцеві результати вимірювань, що проводяться у стаціонарному та регулярному режимах, положення спаю термопари на поверхні циліндра при нерівномірному розподіленні температури по його довжині?

12. Чи існує відмінність (різниця) у фізичній моделі пограничного шару для випадків вільної та вимушеної конвективної тепловіддачі?

13. Якими критеріями подібності можна охарактеризувати вільну і вимушену конвекцію?

5.9 Література

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1981. – 1985. – 416 с.
2. Эккерр Э., Дрейк Р. Теория тепло- и массообмена. – М.: Энергоиздат, 1961. – 680 с.
3. Михеев М. А., Михеева П. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – 320 с.
4. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. – М.: Машгиз, 1957. – 304 с.
5. Кондратьев Г. М. Регулярный тепловой режим. – М.: ГИТТЛ, 1994. – 408 с.
6. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высшая школа, 1979. – 469 с.

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

Дослідження стаціонарних процесів теплопровідності в твердих тілах методом електротеплової аналогії

Мета роботи: експериментальне вирішення двовимірних задач теплопровідності за даних граничних умов.

6.1 Програма роботи

1. Вивчити метод електротеплової аналогії.
2. Ознайомитись з експериментальною установкою.
3. Виготовити модель (або ознайомитися з методами її виготовлення) з електропровідного паперу.
4. Зібрати та налагодити вимірювальну схему.
5. Виміряти потенціал у визначених точках моделі, побудувати ізотерми.
6. Обробити експериментальні дані та порівняти одержані значення температури з точними (дійсними) значеннями. Навчитись знаходити розподіл температури у дослідному об'єкті.
7. Скласти звіт про виконану роботу.

6.2 Електротеплова аналогія

Розрахунок процесів теплопровідності в багатьох випадках пов'язаний з математичними труднощами і великою обчислювальною роботою. Розв'язок конкретних задач шляхом прямого експерименту потребує значної витрати коштів і часу. У зв'язку з цим набувають великого значення посередні (непрямі) методи досліджень, одним з яких є метод електротеплової аналогії (ЕТА).

Метод ЕТА є в теперішній час одним і з самих розповсюджених експериментальних методів вирішення рівняння теплопровідності Лапласа.

Між розподілом електричного потенціалу в провіднім середовищі і розподілом температури в тілі (об'єкті), існує аналогія. Для виявлення її необхідно порівняти диференційні рівняння потенціалу

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = RC \frac{\partial U}{\partial \tau} \quad (6.1)$$

і температури

$$\frac{\partial^2 t}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial Y^2} = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \quad (6.2)$$

Стационарне електричне потенціальне поле $U(x, y)$ може розглядатися як аналог стаціонарного температурного поля.

Еквіпотенціальні лінії у полі напруги відповідають ізотермам у температурному полі, а ортогональні до них лінії електричного струму відповідають лініям теплового потоку.

Метод ЕТА використовується, коли аналітичне розв'язання задачі теплопровідності неможливе, а числове вирішення виявляється дуже громіздким. Метод ЕТА дозволяє установити розподіл температури в області, що досліджується, щодо розподілу електричного потенціалу, що легко вимірюється на моделі об'єкта, оскільки математичні описи розподілу температури та електричного потенціалу аналогічні, а в безрозмірній формі однакові.

Підводячи підсумок, сформулюємо достатні умови подібності при вивченні задач теплопровідності на електричних моделях.

1. Геометрична подібність: електрична модель повинна являти собою у деякому масштабі область, що вивчається без усякого спотворення.

2. Фізична подібність: коефіцієнти електропровідності моделі $\sigma(x^*, y^*)$ повинні бути пропорційними відповідним коефіцієнтам теплопровідності

$$\sigma(x^*, y^*) = n\lambda(x, y). \quad (6.3)$$

Для однорідного середовища умова фізичної подібності має місце при будь-якому значенні σ .

3. Динамічна подібність: граничні умови для моделі і натури повинні бути подібними.

6.3 Теорія експерименту

Розглянемо однорідне та ізотропне тіло, яке простягається вздовж осі Z у безкрайність і має в площині XY довільну геометричну форму (див. рисунок 6.1a). Хай на поверхні тіла F_1 підтримується однакова температура t_1 , а на поверхні F_o – температура t_o , при цьому $t_1 > t_o$ – граничні умови 1-го роду.

Поверхні A_1 і A_2 не мають теплообміну із навколишнім середовищем. Якщо всередині тіла відсутні джерела теплоти, а фізичні параметри його не залежать від температури, то стаціонарний розподіл температури у тілі описується рівнянням Лапласа:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial Y^2} = 0. \quad (6.4)$$

Крайові умови в даному випадку можна записати так:

на поверхні F_1 : $t = t_1 = \text{const}$;

на поверхні F_o : $t = t_o = \text{const}$;

(6.5)

на поверхнях A_1 і A_2 : $\left. \frac{\partial t}{\partial n} \right|_{n=0} = 0$,

де n – зовнішня нормаль до поверхні тіла.

За допомогою рівняння Лапласа описується не тільки явище теплопровідності, але й ряд інших явищ різної фізичної природи. Йому підпорядковується також розподіл електричного потенціалу у провідникові, розподіл потенціалу швидкості при русі ідеальної рідини та інші.

Розглянемо тонку електропровідну пластину, конфігурація якої в площині XY (рисунок 6.1) подібна до конфігурації тіла в тій же площині. На ділянках периметра пластини, які позначені F_1 та F_o , підтримуються відповідно потенціали U_1 та U_o , а ділянки периметра A_1 та A_2 електрично ізольовані.

Розподіл електричного потенціалу в пластині описується рівнянням Лапласа:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = 0. \quad (6.6)$$

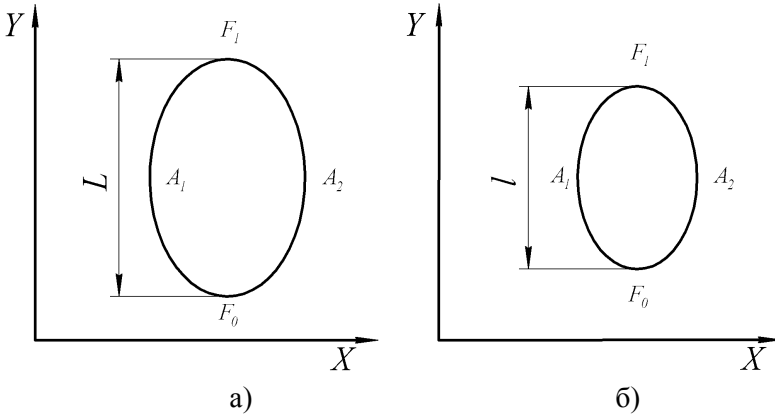


Рисунок 6.1 – До поняття електротеплової аналогії

Крайові умови запишемо у вигляді;

– на ділянці периметра F_l : $U = U_l = \text{const}$;

– на ділянці периметра F_o : $U = U_o = \text{const}$;

(6.7)

– на ділянках периметра A_l і A_2 : $\frac{\partial U}{\partial n} \Big|_{n=0} = 0$.

Рівняння (6.4) та (6.6) і крайові умови (6.5) та (6.7) зведемо до безрозмірного вигляду.

Як масштаб для лінійних розмірів тіла «а» оберемо його розмір L , а як масштаб лінійних розмірів пластини «б» – схожий розмір l . Тоді за умов геометричної подібності безрозмірні координати схожих точок тіла «а» і пластини «б» будуть однаковими:

$$\frac{X_a}{L} + \frac{X_b}{l} = \text{idem};$$

$$\frac{Y_a}{L} + \frac{Y_b}{l} = \text{idem};$$

(*idem* – одне і те ж, однаково).

Температури і потенціали будемо відраховувати відповідно від t_o та U_o , а як масштаби для t і U оберемо $(t_l - t_o)$ і $(U_l - U_o)$.

Тоді безрозмірні температури і потенціали будуть мати такий вигляд;

$$T = \frac{t - t_o}{t_1 - t_o}; \quad U = \frac{U - U_o}{U_1 - U_o}.$$

Рівняння (6.4) та (6.6) з віднесеними до них крайовими умовами в безрозмірній формі мають вигляд:

Для тіла «а»:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} = 0; \quad (6.8)$$

$$\begin{aligned} & \text{- на ділянці периметра } F_1: T_1 = 1; \\ & \text{- на ділянці периметра } F_o: T_1 = 0; \\ & \text{- на ділянках периметра } A_1 \text{ і } A_2: \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{n=0} = 0. \end{aligned} \quad (6.9)$$

Для пластини «б»:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} = 0 \quad (6.10)$$

$$\begin{aligned} & \text{- на ділянці периметра } F_1: U_1 = 1; \\ & \text{- на ділянці периметра } F_o: U_1 = 0; \\ & \text{- на ділянках периметра } \left. \frac{\partial U}{\partial n} \right|_{n=0} = 0. \end{aligned} \quad (6.11)$$

Таким чином, ми одержали однакові диференціальні рівняння (6.8) та (6.10) за чисельно однакових крайових умов (6.9) та (6.11). Тобто рішення цих рівнянь повинні співпадати як по формі функціональних залежностей, так і по числовим значенням змінних

$$T = U = f(x, y). \quad (6.12)$$

Формальна аналогія між диференціальними рівняннями, які описують процеси різної фізичної природи, за відомих умов

призводять до формально однакових рішень (6.12).

Це дозволяє вивчити процес теплопровідності, який протікає в натурі (тіло «а»), на його електричній моделі (пластині «б»).

При цьому температурне поле натури «моделюється» електричним полем моделі. Якщо модель і натура відповідають всім вимогам аналогії, то вимірюючи розподіл електричного потенціалу в моделі і представляючи результати вимірювань у безрозмірній формі рівняння (6.12) – наприклад, у виді сітки ізопотенціальних ліній, ми можемо розглядати одержане поле U , як поле T , а ізопотенціальні лінії, як ізотерми. Інакше кажучи, для будь-яких схожих точок натури і моделі, що мають безрозмірні координати x, y , є дійсним співвідношення

$$\frac{t - t_o}{t_l - t_o} = \frac{U - U_o}{U_l - U_o}. \quad (6.13)$$

Крім температурного поля натури, звичайно представляє інтерес кількість теплоти, яка передається в натурі від поверхні F_l до поверхні F_o .

Кількість теплоти, яка протікає в натурі за одиницю часу на ділянці довжиною B вздовж осі Z , – тепловий потік, який визначається співвідношенням:

$$P = - \int_s \lambda \frac{\partial t}{\partial n} B \cdot \partial \bar{S} = \lambda \llcorner -t_o \ggcurly B \int_s \frac{\partial T}{\partial N} \partial \underline{S} = \lambda \llcorner -t_o \ggcurly B \cdot \theta, \quad (6.14)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу натури, Вт/м · К;

S – контур будь-якої ізотерми в площині, м;

n – нормаль до ізотермічної поверхні, м;

$$\underline{S} = \frac{\bar{S}}{L}; \quad N = \frac{n}{l}.$$

Безрозмірна величина

$$\theta = \int_s \frac{\partial T}{\partial N} \partial \underline{S} \quad (6.15)$$

називається коефіцієнтом форми.

З другого боку, за законом Ома, сила струму, що протікає в моделі (тобто в пластині), становить

$$I = \frac{\delta}{\rho} \int_S \frac{\partial U}{\partial n} \partial \bar{S} = \frac{\delta}{\rho} \left(U_1 - U_o \right) \int_S \frac{\partial U}{\partial N} \partial \bar{S} = \frac{\delta}{\rho} \left(U_1 - U_o \right) \bar{\theta}. \quad (6.16)$$

Тут δ – товщина пластини, м;

ρ – питомий електричний опір матеріалу пластини, Ом·м.

Безрозмірні інтервали в рівняннях (6.14) та (6.16), внаслідок тотожності полів T і L однакові. Таким чином, маємо два вирази:

$$P = \lambda \left(-t_o \right) \bar{B} \cdot \bar{\theta}, \text{ Вт}; \quad (6.17)$$

$$I = \frac{\delta}{\rho} \left(U_1 - U_o \right) \bar{\theta}, \text{ А}, \quad (6.18)$$

у яких $\bar{\theta}$ чисельно однакові.

Приймаючи $B = 1$ м, одержуємо лінійну густину теплового потоку

$$q_l = \lambda \left(-t_o \right) \bar{\theta}, \text{ Вт/м} \quad (6.19)$$

Вимірюючи силу струму I та падіння напруги $\left(U_1 - U_o \right)$ в моделі, з виразу (6.18) можна визначити коефіцієнт θ форми для відомого $\frac{\delta}{\rho}$. Одержане значення θ використовують для визначення q_l за виразом (6.19), або P – за виразом (6.17).

6.4 Опис експериментальної установки

Електричну модель досліджуваного об'єкта – натури виготовлено з електропровідного паперу, який наклеюють для міцності на лист картону або гетинаксу. Моделі надають форму, що геометричне подібна до досліджуваного об'єкта в площині XU (двовимірова задача). По контурах моделі, що відповідають

поверхням об'єкта, які сприймають і віддають теплоту (ділянки F_1 та F_o на рисунку 6.2) закріплені товсті алюмінієві шини, які щільно притиснуті до електропровідного паперу.

Джерелом струму служить акумуляторна батарея або універсальне джерело живлення (УДЖ). Вимірювання електричного потенціалу в різних точках аркуша електропровідного паперу здійснюється за схемою рівноважного моста, між шинами ввімкнуто високоомний магазин опорів МО, що складається з десяти однакових секцій і утворює два плечі моста. Два інших плечі моста утворює аркуш електропровідного паперу: одне між точкою вимірювання потенціалу М та однією з шин і друге – між точкою М та іншою шиною. У діагональ моста, тобто між якимось із проміжних затисків магазину опорів і точкою М, ввімкнуто нульгальванометр НГ. Контакт у точці М здійснюється за допомогою закріпленого на кінці дроту наконечника, який можна пересувати по поверхні електропровідного паперу.

Падіння напруги на моделі вимірюється вольтметром V, а струм – міліамперметром mA.

6.5 Підготовка та проведення експерименту

Дослід щодо вивчення розподілу ізопотенціальних ліній в електричній моделі проводять на одній з установок, що зібрано за схемами, які зображено на рисунки 6.3, 6.4, 6.5.

Для знаходження ізопотенціальних ліній, які відповідають ізотермам у натурі, нуль-гальванометр приєднують до відповідних затисків магазину опорів, наприклад, до затиску, що ділить його загальний опір у відношенні

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} = X.$$

На поверхні моделі за допомогою наконечника відшукують точки рівного потенціалу. При положенні наконечника в цих точках гальванометр повинен показувати нуль. Координати точок фіксують на аркуші паперу з нанесеною сіткою координат.

Таким чином, одержують графік ізопотенціальних ліній, що відповідають різним значенням відношення

$$\frac{U - U_o}{U_1 - U_o} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} = X.$$

Для обчислення значення теплового потоку P або лінійної густини потоку q_l в натурі і на моделі (рисунок 6.3, 6.4, 6.5) необхідно виміряти струм та падіння напруги на шинах ΔU .

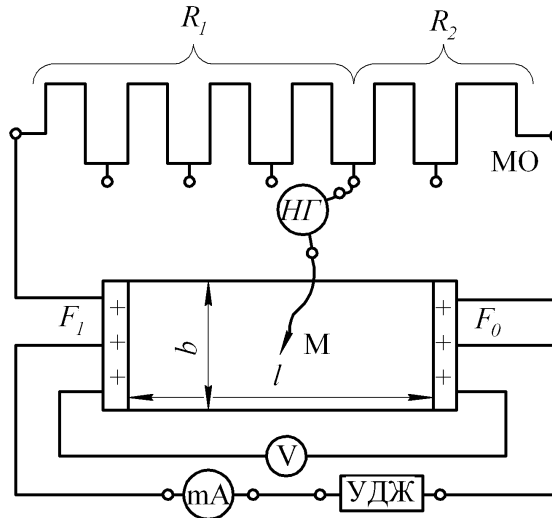


Рисунок 6.2 – Схема установки для визначення ступеня неоднорідності електропровідного паперу (відношення δ / ρ)

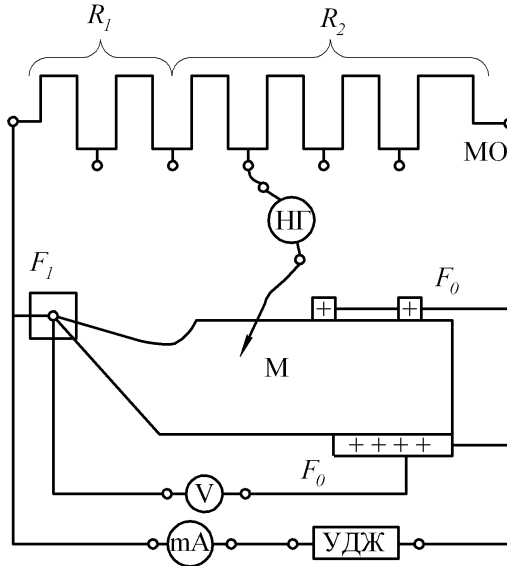


Рисунок 6.3 – Схема установки для визначення температури різальної крайки різця

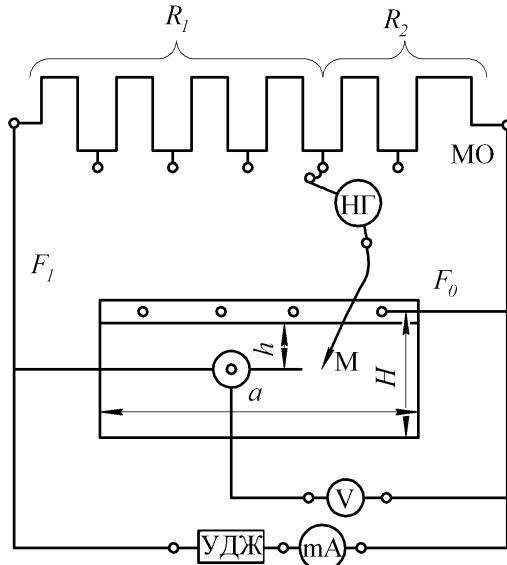


Рисунок 6.4 – Схема установки для визначення поля температур навколо труби, закладеної в ґрунт

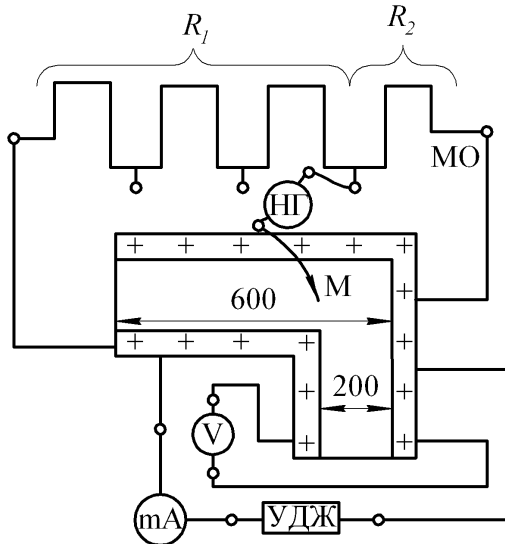


Рисунок 6.5 – Схема установки для визначення поля температур та теплового потоку в куті плавильної печі

6.6 Обробка результатів вимірювань

1. Ізопотенціальні лінії, які одержано на моделі для значень $X = 0,1; 0,2; 0,3; \dots 0,9$, стосовно натури є ізотермами, причому

$$\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} = X. \quad (6.20)$$

Обираючи одну з ізопотенціальних ліній з певним значенням X , переносять її координати на натурний зразок і закріплюють (наприклад, закарбовують) на цій лінії термопари. Стосовно різця, наприклад (рисунок 6.3), знаючи показання термопари t_x на різних режимах роботи верстата і температуру різцетримача t_o , яка практично дорівнює температурі навколишнього середовища, за виразом (6.20) обчислюють температуру різальні крайки t_1 для цих режимів.

Один із режимів можна обрати для визначення температурного поля різця. В цьому випадку з того ж виразу (6.20) за відомих значень t_1 та t_o визначають температури для всіх значень X .

2. Коефіцієнт форми $\bar{\theta}$ визначають з виразу (6.15) за формулою

$$\bar{\theta} = \frac{I \cdot \rho}{\delta(U_1 - U_o)} X, \quad (6.21)$$

де I та $(U_1 - U_o)$ – вимірюється на моделі, а $\frac{\rho}{\delta}$ визначають із попереднього досліджу.

Як остаточне значення $\bar{\theta}$ береться середнє арифметичне, яке обчислюється з трьох дослідів.

Значення теплового потоку P обчислюють за виразом (6.17), а лінійну густину потоку q_l за формулою (6.19).

6.7 Визначення температури різальної крайки різця методом ЕТА

Різець є одним із простих та найбільш розповсюджених інструментів. Відомо, що витрачена при різанні робота перетворюється в теплоту, внаслідок чого різець, особливо його різальна крайка, нагрівається. Нагрівання крайки різця викликає зниження твердості матеріалу різця і робить різець менш стійким. При вивченні роботи різця буває необхідним визначити температури різальної крайки при різних факторах, що характеризують процес різання.

Існує декілька способів вимірювання температури різальної крайки різця. В даній лабораторній роботі, схему установки якої наведено на рисунок 6.3, описується метод вимірювання температури різальної крайки відрізного різця за допомогою електротеплової аналогії (двовимірова задача).

Шиною F_l імітується підведення теплоти до різальної крайки, а шиною F_o – відведення теплоти в різцетримач, з яким різець стикається і який має температуру, що практично дорівнює температурі навколишнього середовища. Відведенням теплоти від поверхні різця до навколишнього середовища нехтуємо внаслідок дуже малої її кількості (менше 1 % від усієї теплоти, що виділяється під час різання).

6.8 Визначення поля температур навколо труби, що закладена в ґрунт, та лінійної густини теплового потоку від труби

Схему установки цієї лабораторної роботи наведено на рисунку 6.4.

Вздовж верхнього краю електропровідного паперу закріплено шину F_o , яка імітує поверхню землі, згідно з геометричною подібністю. На відстані від верхньої шини у середній частині аркуша розташована друга кругла шина, яка імітує трубу.

Через те, що ґрунт, в який закладено трубу, можна розглядати, як безмежне (безкрайне) середовище, а розміри аркуша електропровідного паперу обов'язково повинні бути обмеженими, необхідно так обирати розміри аркуша, щоб процес, який відбувається в ньому, мало відрізнявся від процесу у безмежному середовищі. Спеціальні досліди, які проводились у ЦКТІ, показали, що аркуш повинен мати розміри $H \geq 4 \cdot h$ і $a \geq 2 \cdot H$.

Результат визначення q_l на електричній моделі слід порівняти з даними обчислень за формулою, яка одержується аналітично за умовою, що $\frac{2h}{d} \gg 1$:

$$q_l = \frac{2\pi\lambda(t_o - t_{\text{г}})}{\ln \frac{4h}{d}}, \quad (6.22)$$

де q_l – лінійна густина теплового потоку від поодинокі труби, що закладена в ґрунт (однорідний напівобмежений масив), Вт/м;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу масиву, Вт/(м·К)
Можна прийняти $h = 0,9$ м і $d = 0,4$ м. В таблиці наведені значення коефіцієнта теплопровідності деяких матеріалів при різних масовій вологості W , %.

6.9 Визначення поля температур та теплового потоку в куті плавильної печі

Схему установки цієї лабораторної роботи наведено на рисунку 6.6

Шина F_1 імітує розплавлений метал, температура якого $t_1 = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Шина F_o імітує зовнішню поверхню плавильної печі, температуру поверхні t_o прийнято рівною температурі навколишньої середовища ($t_o = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Електропровідний папір імітує кладку з вогнетривкої цегли (динасова або хромомagneзитова, див. таблицю 6.1).

Таблиця 6.1

Матеріал	W, %	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Глина	15...20	0,7...0,9
Граніт	—	2,2
Ґрунт підзолистий	0,3	0,28
	8,6	0,73
	16,6	1,42
Суглинок	42	1,49
Цегла червона	0	0,77
Цегла силікатна	0	0,81
Цегла динасова	0	1,0
Цегла хромомagneзитова	0	1,9
Пісок річковий дрібний	0	0,33
	5,5	0,59
	13,9	2,0
Пісок річковий крупний	0	0,28
	4,3	0,51
	15,6	1,85
Торф	—	0,07...0,012
Шлакобетон	—	0,67

На рисунку 6.6 представлено схему електричної моделі кута печі, кладку стінок якої виконано з порожнистих блоків.

Визначення поля температур та величини теплового потоку виконують аналогічно до попередніх дослідів.

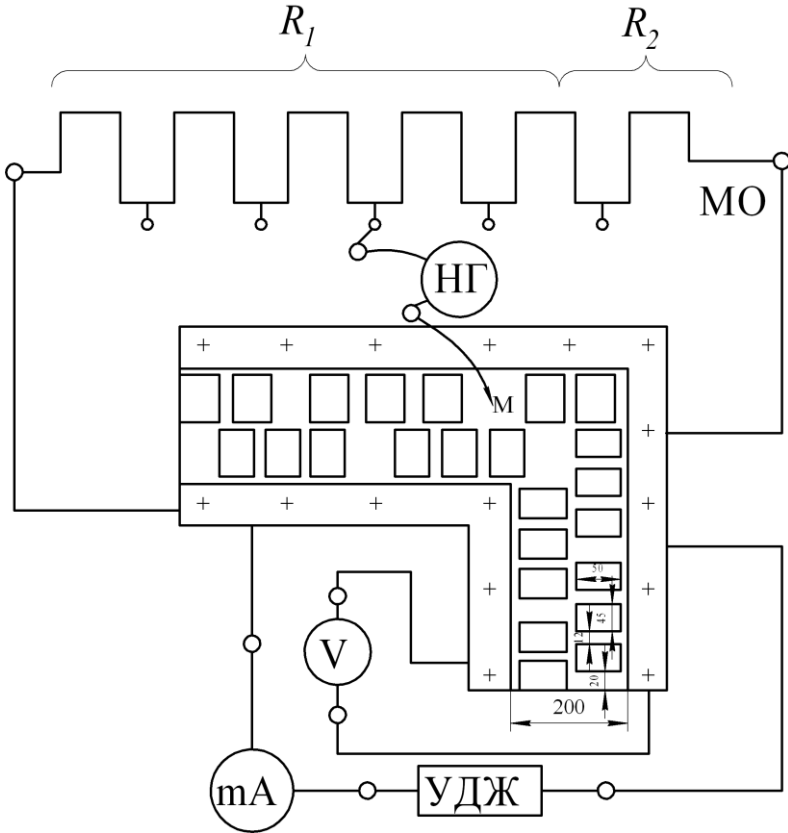


Рисунок 6.6 – Схема установки для визначення поля температур та теплового потоку в куті плавильної печі, кладку стінок якої виконано з порожнистих блоків.

6.10 Контрольні запитання

1. Які фізичні явища називаються подібними?
2. Які фізичні явища називаються аналогічними?
3. Які види аналогії вам відомі і в чому їхня суть?
4. Як моделюється температурне поле різця, труби, що закладена в ґрунт, вогнетривкої кладки у куті печі?
5. Поясніть схему установки для визначення за методом ЕТА поля температур різця, труби, що закладена в ґрунт, вогнетривкої кладки у куті печі?
6. За яких умов дотримується фізична подібність об'єкта, що досліджується, та електричної моделі для задач, розглянутих у лабораторній роботі?
7. Які методичні помилки має метод ЕТА?
8. Що впливає на точність вимірювання?
9. Що розуміється під питомим опором електропровідного паперу?
10. Як можна зменшити контактну різницю потенціалів між шиною та електропровідним папером?
11. Як можна реалізувати граничні умови третього роду?

6.11 Література

1. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент : Справочник /Под. общ. ред. чл.-корр. АН СССР В. А. Григорьева, Р. М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с.
2. Беляев Н. М. Основы теплопередачи. – К.: Вища школа, 1989. (Гл. 5.5).