

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи

**«ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНОГО ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ВІЛЬНОМУ
РУСІ ПОВІТРЯ БІЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛІНДРУ»**

для студентів спеціальностей 144 «Теплоенергетика», 131 «Прикладна
механіка», 181 «Харчові технології», 273 «Залізничний транспорт»

усіх форм навчання

Затверджено

редакційно-видавничою

радою університету,

протокол № 1 від 16.02.2023 р.

Харків
НТУ «ХПІ»

2023

Методичні вказівки до лабораторно роботи «Дослідження складного теплообміну при вільному русі повітря біля горизонтального циліндру» для студентів спеціальностей 144 «Теплоенергетика», 131 «Прикладна механіка», 181 «Харчові технології», 273 «Залізничний транспорт» усіх форм навчання / уклад.: В. Г. Павлова, О. В. Круглякова, О. В. Кошельнік, Т. М. Пугачова. – Харків: НТУ «ХПІ», 2023. – 20 с.

Укладачі: В. Г. Павлова
О. В. Круглякова
О. В. Кошельнік
Т. М. Пугачова

Рецензент О.М.Тарасенко

Кафедра теплотехніки та енергоефективних технологій

1. МЕТА ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Мета лабораторної роботи – поглиблення знань з теорії теплообміну при вільному русі рідини, здобуття навичок проведення експериментальних досліджень конвективного теплообміну та обробки результатів досліджень за допомогою узагальнених змінних.

2 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Конвективний теплообмін між рідиною та твердою поверхнею в залежності від природи виникнення поділяється на теплообмін при вимушеному та при вільному русі рідини у поверхні тіла. Процеси вільної конвекції широко поширені в різних областях сучасної техніки. Останню часто називають також теплообміном при *природній конвекції*. У цьому випадку рух рідини біля поверхні тіла викликається різницею густин холодної та нагрітої рідини. Інтенсивність природної конвекції для даної рідини визначається різницею температури стінки та рідини (температурним напором), а також формою і розмірами поверхні теплообміну.

Зміни температури рідини біля поверхні теплообміну мають місце в тонкому тепловому прикордонному шарі, так саме як і в гідродинамічному прикордонному шарі відбуваються зміни швидкості руху рідини. Але якщо в тепловому прикордонному шарі температура рідини зростає від температури середовища $t_{сер}$ до температури поверхні $t_{пов}$ при наближенні до поверхні тіла, то швидкість руху рідини w спочатку зростає до певного максимуму, а потім зменшується до нуля на поверхні тіла. Схематично це показано на рис. 1.

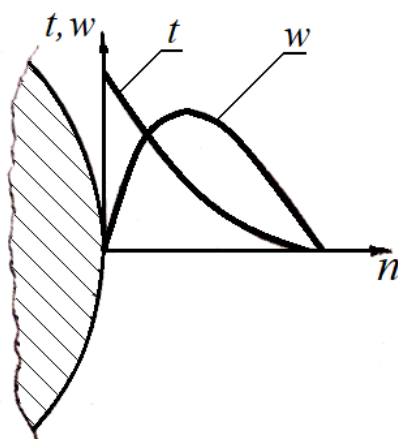


Рисунок 1 – Зміна температури та швидкості теплоносія біля циліндричної поверхні при вільній конвекції

Незважаючи на розмаїтість практичних схем, у яких використовується вільна конвекція, для всіх таких процесів умови подібності мають універсальний вигляд, обумовлений теорією подібності. Розподіл швидкості та температури в прикордонному шарі можна отримати шляхом рішення рівнянь руху та енергії. Але це операція досить важко реалізується, отже, використовуючи узагальнені змінні – числа Грасгофа (Gr), Прандтля (Pr), Рейнольдса (Re), Ралея (Ra), Нуссельта (Nu)

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot d^3}{\nu^2}; \quad Pr = \frac{\nu}{a}; \quad Re = \frac{w \cdot d}{\nu}; \quad Ra = Gr \cdot Pr; \quad Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$$

відповідно до другої теорії подібності, можна записати загальну структуру критеріального рівняння

$$Nu = f(Re, Gr, Pr). \quad (1)$$

Враховуючи, що при природній конвекції швидкість руху рідини у поверхні теплообміну не є незалежною змінною, а визначається величиною температурного напору, формою й розмірами тіла, критерій Рейнольдса виключається з числа незалежних змінних. Тоді рівняння (1) перетворюється на вираз

$$Nu = f(Gr, Pr). \quad (2)$$

При вільному русі рідини можна виділити три області конвективного теплообміну в залежності від співвідношення між силами, які діють в приграничному шарі рідини:

1-а область: сили тертя є настільки великими, що конвекція є практично відсутньою, а перенесення теплоти здійснюється тільки теплопровідністю. У цьому випадку

$$Nu = 0,5 = \text{const} .$$

Такий режим теплообміну може мати місце для тіл з дуже малими розмірами та при незначних температурних напорах ($Ra < 10^{-3}$).

2-а область: сили інерції є зневажливо малими порівняно з силами тертя та підйомною силою. В цій області

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) \text{ або } Nu = f(Ra). \quad (3)$$

3-я область: сили інерції та підйомні сили мають переважний вплив порівняно з силами тертя. Для цього випадку

$$Nu = f(Gr \cdot Pr). \quad (4)$$

Однак такий режим практично не реалізується, тому що принаймні біля самої поверхні тіла сили тертя є достатньо великими та їх впливом знехтувати неможливо.

Найбільше практичне значення має друга область, де має місце залежність (3) між критерієм Нусельта, який визначається, та незалежним критерієм Ралея. В експериментальній частині роботи має бути визначений вигляд функціонального зв'язку між критеріями подібності.

Найбільш часто експериментальні дані узагальнюються за допомогою статичної функції. Тоді рівняння (3) можна представити як

$$Nu = C Ra^n. \quad (5)$$

Кінцева мета лабораторної роботи полягає у визначенні постійних C і n у рівнянні (5).

Другий варіант виконання лабораторної роботи полягає у визначенні на основі одного експерименту коефіцієнта тепловіддачі для випадку вільної конвекції біля горизонтального циліндру.

3 ОПИС ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ

Схема лабораторної установки представлена на рис. 2.

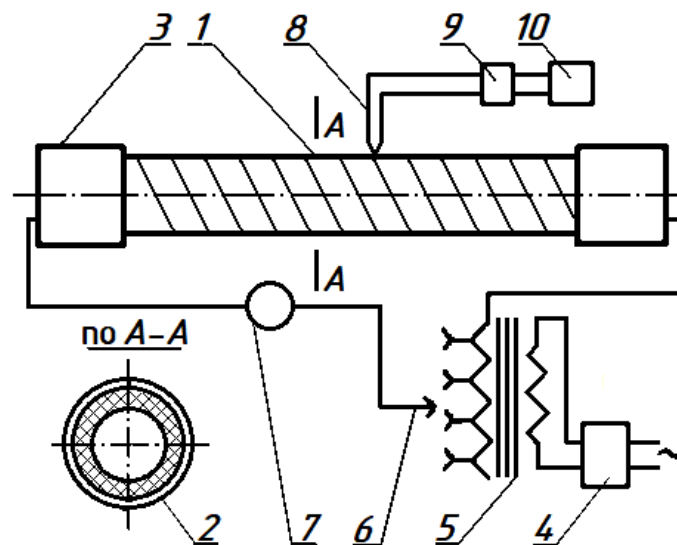


Рисунок 2 – Схема лабораторної установки

Робочим елементом установки служить горизонтально розташована трубка, що представляє собою спеціальним чином виготовлений електричний нагрівач 1. Він виконаний з константової стрічки перетином $0,5 \times 10$ мм, яка навита на тонкостінну текстолітову трубку 2. Торці трубки захищені тепловою ізоляцією 3. Така конструкція дозволяє практично виключити перетікання теплоти як в осьовому напрямку, так і за колом трубки. Омичний опір нагрівача R є відомим і має постійну величину, тому що питомий електричний опір константана не залежить від температури.

Живлення установки електричним струмом здійснюється від мережі змінного струму через стабілізатор напруги 4 і понижуючий трансформатор 5. Останній має кілька витків вторинної обмотки для зміни сили струму, що проходить через експериментальну трубку. Таким чином змінюється кількість тепла, яке виділяється в оточуюче середовище. Штекерний перемикач 6 має шість позицій, що дозволяє змінювати напругу у вторинному ланцюзі. Сила струму, який проходить через трубку, вимірюється амперметром 7.

Температура поверхні трубки неоднорідна за перерізом, тому для знаходження середньої по поверхні температури по довжині перерізу трубки вздовж її периметру встановлені шість хромель-копелевих термопар 8 (одна показана умовно), які через перемикач 9 з'єднані з цифровим мілівольтметром 10. Принцип роботи термопар наведено в додатку Б.

Температура навколишнього повітря вимірюється термометром.

4 ПОРЯДОК ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

УВАГА! Пуск, регулювання режимів роботи та вимкнення установки виконується викладачем або майстром виробничого навчання.

Після ознайомлення з лабораторною установкою та вимірювальними приладами студенти під наглядом викладача приступають до проведення роботи. Хід проведення роботи такий:

1. Включити електричне живлення нагрівального елемента та за допомогою перемикача 6 встановити задану силу струму. Максимальна сила струму досягається шляхом встановлення штекера перемикача 6 у крайнє праве положення.

Після включення нагрівача необхідно дочекатися встановлення

стаціонарного режиму, який характеризується сталістю у часі вимірювання температури на всіх точках поверхні труби. Час виходу установки робочий режим становить приблизно 15–20 хв.

2. Переконавшись, що стаціонарний режим роботи установки досягнутий, необхідно виміряти струм I , що проходить через нагрівач, температуру навколишнього середовища (повітря) $t_{\text{сер}}$, та термоЕРС термопар, встановлених за периметром на поверхні циліндра. Для вимірювання термоЕРС термопар необхідно за допомогою перемикача 9 по черзі підключати кожен термопару до цифрового мілівольтметра 10 і фіксувати його показання.

Показання приладів, отримані під час проведення вимірювань, заносять у табл. 1 На цьому проведенні одного досліду закінчується.

Таблиця 1 – Результати експерименту

Найменування величин		Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
I		2	3	4
Електричний опір нагрівача		R	Ом	
Довжина дослідної трубки		l	м	
Діаметр дослідної трубки		d	м	
Сила струму		I	А	
Температура повітря		$t_{\text{сер}}$	°С	
Виміряні ЕРС	Термопара 1	$E(t_1, t_{\text{x.c}})$	мВ	
	Термопара 2	$E(t_2, t_{\text{x.c}})$	мВ	
	Термопара 3	$E(t_3, t_{\text{x.c}})$	мВ	
	Термопара 4	$E(t_4, t_{\text{x.c}})$	мВ	
	Термопара 5	$E(t_5, t_{\text{x.c}})$	мВ	
	Термопара 6	$E(t_6, t_{\text{x.c}})$	мВ	
Поправка на холодний спай		$E(t_{\text{x.c}}, 0)$	мВ	
Приведені до нуля ЕРС	Термопара 1	$E(t_1, 0)$	мВ	
	Термопара 2	$E(t_2, 0)$	мВ	
	Термопара 3	$E(t_3, 0)$	мВ	
	Термопара 4	$E(t_4, 0)$	мВ	
	Термопара 5	$E(t_5, 0)$	мВ	
	Термопара 6	$E(t_6, 0)$	мВ	

Закінчення табл. 1

	1	2	3	4
Температури поверхні трубки	Термопара 1	$t_{п1}$	°С	
	Термопара 2	$t_{п2}$	°С	
	Термопара 3	$t_{п3}$	°С	
	Термопара 4	$t_{п4}$	°С	
	Термопара 5	$t_{п5}$	°С	
	Термопара 6	$t_{п6}$	°С	

3. У разі проведення серії вимірювань, за вказівкою викладача змінюють потужність електричного нагрівача шляхом встановлення штекера перемикача у відповідне гніздо. Час виходу установки на стаціонарний режим використовують для обробки результатів попередніх вимірювань.

Через 15-20 хвилин знову проводять вимірювання зазначених раніше величин. Всього необхідно провести не менш 4-5 вимірювань. Усі зняті показники приладів кожного вимірювання заносять в табл. 1, для цього останній стовпчик (4) дублюють відповідно до кількості проведених вимірювань.

5 ОБРОБКА РЕЗУЛЬТАТІВ ЕКСПЕРИМЕНТУ

5.1 Перший варіант виконання лабораторної роботи: експериментальне визначення коефіцієнту тепловіддачі

Для визначення температури за виміряними термоЕРС термопар необхідно показання останніх привести до нульової температури холодного спаю, для чого за табл. А.1 додатку слід визначити поправку на температуру холодного спаю $E(t_{x,c},0)$ як термоЕРС термопари при температурі $t_{x,c} = t_{сер}$ та нульовій температурі холодного спаю. Приведені до нуля термоЕРС для кожної термопари визначаються як

$$E(t_i, 0) = E(t_i, t_{x,c}) + E(t_{x,c}, 0), \quad (6)$$

де i – номер термопари.

Знайдені значення приведених термоЕРС записуються в табл. 1. За їх значеннями за допомогою табл. А.1 додатку визначають температуру поверхні трубки у відповідних точках, а також заносять ці значення до табл.1. Приклад розрахунку температури наведений в Додатку Б.

Середня за периметром температура поверхні стінки визначається як:

$$t_{\text{пов}} = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 t_{\text{п}i}, \quad (7)$$

де i – номер термопари.

Загальна кількість теплоти Q , що передається з поверхні трубки в навколишнє середовище, дорівнює електричній потужності нагрівача, Вт:

$$Q = I^2 R. \quad (8)$$

З поверхні трубки теплота передається не тільки конвекцією, але й випромінюванням. Враховуючи, що вся експериментальна трубка знаходиться в повітрі з температурою $t_{\text{сер}}$, потік теплоти випромінюванням згідно рівняння Стефана-Больцмана записується як

$$Q_{\text{в}} = C_0 \varepsilon \left[\left(\frac{T_{\text{пов}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{сер}}}{100} \right)^4 \right] F, \quad (9)$$

де $T_{\text{пов}}$, $T_{\text{сер}}$ – абсолютні температури поверхні трубки та середовища (повітря), К, $T_{\text{пов}} = t_{\text{пов}} + 273$, $T_{\text{сер}} = t_{\text{сер}} + 273$; C_0 – постійна випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²К⁴); ε – ступінь чорноти поверхні трубки, $\varepsilon = 0,3-0,4$; F – площа бічної поверхні трубки, м²:

$$F = \pi \cdot d \cdot l.$$

Тепловий потік, переданий від труби до повітря вільною конвекцією є різницею між загальним тепловим потоком та тією частиною теплоти, що випромінюється промінистим потоком

$$Q_{\text{к}} = Q - Q_{\text{в}}. \quad (10)$$

Середній коефіцієнт тепловіддачі за законом Ньютона-Ріхмана, Вт:

$$Q_{\text{к}} = \alpha (t_{\text{пов}} - t_{\text{сер}}) F, \quad (11)$$

З формули (11) отримуємо експериментальний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·°С):

$$\alpha_{\text{екс}} = \frac{Q_{\text{к}}}{(t_{\text{пов}} - t_{\text{сер}}) F}. \quad (12)$$

5.2 Другий варіант виконання лабораторної роботи: відтворення критеріального рівняння для випадку вільної конвекції біля горизонтального циліндра

Для кожного вимірювання (тобто, кожної величини сили струму) необхідно виконати обробку експериментальних даних за формулами (6)-(7), результати експерименту та його обробки необхідно занести до табл. 1, для чого продублювати останній стовпчик табл. 1 відповідно до кількості вимірювань.

Далі для кожного варіанту виконати розрахунки за формулами (8)-(12), результати занести до табл.2.

Таблиця 2 – Результати розрахунку коефіцієнту тепловіддачі

№	Q, Вт	t _{пов} , °С	t _{сер} , °С	Q _в , Вт	Q _к , Вт	α _к , Вт/(м ² ·К)
1						
...						
5						

Метою цієї частини лабораторної роботи є визначенні постійних C і n у рівнянні (5).

Критерієм, який визначається для знаходження коефіцієнту тепловіддачі, є критерій Нусельта

$$Nu = \frac{\alpha_k d}{\lambda}$$

Критерієм, який визначає особливості перебігу процесу передачі теплоти для випадку вільної конвекції, є критерій Грасгофа

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta t \cdot d^3}{\nu^2}$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$; Δt – різниця температури поверхні трубки та повітря, $\Delta t = t_{\text{пов}} - t_{\text{сер}}$.

Характерним розміром в цих критеріях є зовнішній діаметр горизонтальної циліндричної трубки d , а характерною температурою, за якою визначаються теплофізичні властивості середовища, тобто, повітря, (коефіцієнт об'ємного розширення β , коефіцієнт кінематичної в'язкості ν , коефіцієнт теплопровідності λ , тощо) є температура повітря $t_{\text{сер}}$.

Коефіцієнт об'ємного розширення повітря для повітря як газу залежить тільки від його температури та може бути знайдений як, K^{-1}

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{сер}}},$$

де $T_{\text{сер}}$ – абсолютна температура середовища (повітря).

Коефіцієнти кінематичної в'язкості ν , теплопровідності λ та число Прандтля Pr знаходяться за температурою повітря за табл. А.2 додатку.

Значення теплофізичних властивостей (λ , ν , β), критеріїв Nu , Gr , Pr , а також величин $\ln(Nu)$ та $\ln(Gr \cdot Pr)$, які необхідні для визначення C та n в критеріальному рівнянні (5), заносяться в табл.3.

Таблиця 3 – Дані для відтворення критеріального рівняння

№	λ , Вт/(м·К)	ν , м ² /с	β , 1/К	Nu	Gr	Pr	$Ra = Gr \cdot Pr$	$\ln(Nu)$	$\ln(Ra)$
1									
...									
5									

Для визначення показника ступеня при критерії Рейнольдса Re у виразі (5) потрібно скористатися тим, що це рівняння в логарифмічних координатах є прямою лінією виду $y = a + bx$ з кутовим коефіцієнтом, який дорівнює показнику ступеня n :

$$\ln(Nu) = \ln(C) + n \ln(Ra). \quad (13)$$

Постійна C являє собою відрізок, що виходить при перетині прямої з віссю ординат.

Нанісши на графіку точки, які відповідають знайденим парам значень $\ln(Nu)$ та $\ln(Ra)$, і провівши рівновіддалену від них пряму лінію, можна знайти значення показника ступеня n як тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис (при рівності масштабів за осями), $n = \text{tg}\varphi$ (рис. 3).

Значення постійної C визначається з виразу $C = Nu / (Ra)^n$ у будь-якій точці побудованої прямої.

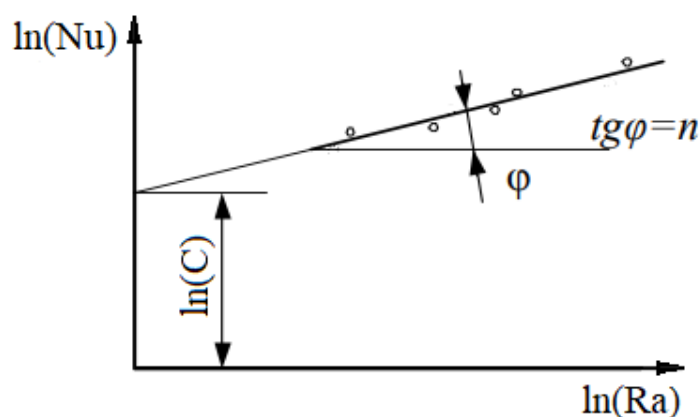


Рисунок 3 – Залежність $Nu = C(Ra)^n$ у логарифмічних координатах

У разі стаціонарної природної конвекції повітря біля горизонтального циліндра в діапазоні значень числа Ралея $10^3 < Ra < 10^8$ рекомендоване критеріальне рівняння має вигляд

$$Nu = 0,5 \cdot Ra^{0,25}. \quad (13)$$

Отже, після розрахунку значень коефіцієнтів C та n з формули (13) та графіку (див. рис. 3), необхідно порівняти їх зі значеннями, які входять у рекомендоване рівняння (з коефіцієнтами $C = 0,5$; $n = 0,25$) та зробити висновки.

6 ЗМІСТ ЗВІТУ З ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

Звіт з лабораторної роботи повинен містити наступні розділи:

1. Принципову схему лабораторної установки та її скорочений опис;
2. Таблицю результатів вимірів (табл. 1);
3. Обробку результатів вимірювань відповідно до наведеної методики (для першого варіанту виконання лабораторної роботи або зведені таблиці розрахунків (табл. 2, 3) з поясненнями для другого варіанту виконання роботи.
4. Для другого варіанту виконання роботи: графік залежності критерію Nu від Ra , побудований в логарифмічній системі координат з масштабом не менше 0,01 в 1 мм та знаходження коефіцієнтів n та C .

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Які існують способи перенесення теплоти?
2. Дати визначення природній та вимушеній конвекції.
3. Як визначається тепловий потік, яким обмінюються теплоносії та поверхня стінки, яку він омиває (закон Ньютона-Ріхмана)?
4. Що характеризує коефіцієнт тепловіддачі, його одиниця виміру?
5. Які чинники впливають на коефіцієнт тепловіддачі?
6. З якою метою застосовується теорія подібності?
7. Фізична сутність чисел Нуссельта, Рейнольдса, Грасгофа та Прандля.
8. Загальна структура критеріального рівняння. Пояснити вид критеріального рівняння для природної конвекції для газу.
9. Що таке визначальна температура та визначальний розмір у критеріальному рівнянні? Які температури та геометричні розміри тіла приймаються за визначальні при розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при природній конвекції у горизонтального циліндра?
10. Поняття теплового та гідродинамічного прикордонних шарів. Як змінюються температура та швидкість теплоносія у прикордонному шарі біля поверхні горизонтального циліндра при вільній конвекції?
11. Які сили в прикордонному шарі визначають перебіг процесу природної конвекції?
12. Які області конвективного теплообміну в залежності від співвідношення між силами, що діють у прикордонному кулі рідини, можна виділити при вільному русі рідини?
13. Чому при визначенні теплового потоку з поверхні експериментальної трубки враховується не тільки конвективна, а також й промениста складова потоку?
14. Навести та пояснити рівняння Стефана-Больцмана.
15. Визначення чорного та сірого тіла, ступеня чорноти.
16. Які вимірювальні прилади використовуються в лабораторній роботі?
17. Пояснити причини розбіжностей між знайденими та рекомендованими значеннями коефіцієнтів в критеріальному рівнянні. Пояснити причини виникнення похибок.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Погорелов А.І. Тепломасообмін (основи теорії і розрахунку): Навч. посібн. – Львів: «Новий Світ-2000», 2006. – 144 с.
2. Акмен Р. Г. Тепло- та масообмін. Текст лекцій і задачі з коментарями до розв'язання. – Харків : НТУ "ХПІ", 2009. – 148 с.
3. Лабай В. Й. Тепломасообмінні процеси в системах ТГВ : Навч. посібн. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 340 с.
4. Крот О.Ю., Коробко Б.О., Крот О.П., Вірченко В.В. Експериментальні методи досліджень: Навч. посібн. – Полтава: НУПП, 2023. – 192 с.
5. Курилов А. Ф., Козін В.М. Теплотехнічні вимірювання і прилади : навч. посіб. – Суми: Сумський державний університет, 2015. – 189 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

Довідкові дані

Таблиця А.1 – Градувальна таблиця для термопар групи хромель-копель

$t, ^\circ\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,00	0,07	0,13	0,20	0,26	0,33	0,39	0,46	0,52	0,59
10	0,65	0,72	0,78	0,85	0,91	0,98	1,05	1,11	1,18	1,24
20	1,31	1,38	1,44	1,51	1,57	1,64	1,71	1,77	1,84	1,90
30	1,97	2,04	2,11	2,17	2,24	2,31	2,38	2,45	2,51	2,58
40	2,65	2,72	2,79	2,86	2,93	3,00	3,06	3,13	3,20	3,27
50	3,34	3,41	3,48	3,55	3,62	3,69	3,75	3,82	3,89	3,96
60	4,03	4,10	4,17	4,24	4,31	4,38	4,45	4,52	4,59	4,66
70	4,73	4,80	4,87	4,95	5,02	5,09	5,16	5,23	5,31	5,38
80	5,45	5,52	5,59	5,67	5,74	5,81	5,88	5,95	6,03	6,10
90	6,17	6,24	6,32	6,38	6,46	6,54	6,61	6,68	6,75	6,83
100	6,90	6,97	7,05	7,12	7,20	7,27	7,34	7,42	7,49	7,57
110	7,64	7,72	7,79	7,87	7,94	8,02	8,09	8,17	8,24	8,32
120	8,39	8,47	8,54	8,62	8,69	8,77	8,84	8,92	8,99	9,07
130	9,14	9,22	9,29	9,37	9,45	9,53	9,60	9,68	9,76	9,83
140	9,91	9,99	10,06	10,22	10,30	10,37	10,45	10,45	10,53	10,60
150	10,68	10,76	10,84	10,91	10,99	11,07	11,15	11,23	11,30	11,38

Таблиця А.2 – Залежність теплофізичних властивостей повітря від температури

Показники	Температура, $^\circ\text{C}$			
	0	10	20	30
$\nu \times 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	13,28	14,16	15,06	16,00
$\lambda \times 10^2, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	2,44	2,51	2,59	2,67
Pr	0,707	0,705	0,703	0,701

Додаток Б

Принцип дії термопари

Вимірювання температури за допомогою термопар базується на явищі термоелектричного ефекту або ефекту Зеєбека. Явище це було відкрито вченим у 1821 році і полягає в наступному: у замкнутому ланцюзі з двох різнорідних провідників виникає електрорушійна сила (термоЕРС), якщо місця їхнього з'єднання, або спаї, знаходяться при різній температурі (рис. Б.1).

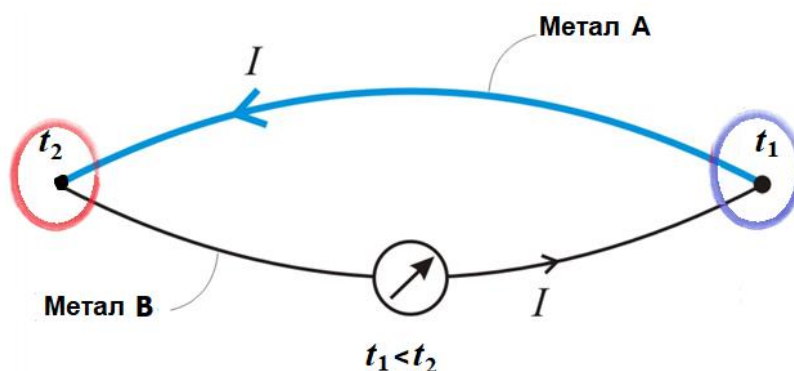


Рисунок Б.1 – Схема термопари

Величина струму буде приблизно пропорційна різниці температур двох спаїв. Вважається, що кожний спай є джерелом електрорушійної сили (ЕРС), значення якої визначається температурою. Виникнення ЕРС у місці спаю пояснюється наявністю в провідниках вільних електронів, кількість яких для різних матеріалів різна. Тому в місці спаю електрони переходять від одного провідника до іншого в більшій кількості, ніж в зворотному напрямку, внаслідок чого один з провідників заряджається позитивно, а інший – негативно. Дифузія електронів залежить від температури, тому ЕРС, які виникають в спаях з неоднаковою температурою, будуть різні. Загальна ЕРС, що діє в ланцюгу, буде рівна алгебраїчній сумі ЕРС, які виникають в спаях,

$$E_{AB}(t_2, t_1) = e_{AB}(t_2) \pm e_{AB}(t_1),$$

де $e_{AB}(t_2)$ та $e_{AB}(t_1)$ – різниці потенціалів провідників А та В відповідно при температурах t_2 та t_1 , мВ; t_2 та t_1 – температури спаїв.

ТермоЕРС цієї пари залежить тільки від температури t_2 і t_1 і не залежить від розмірів термоелектродів (довжини, діаметра), величин теплопровідності та питомого електроопору. Зазвичай t_1 підтримується постійною і рівною 0°C ,

тому, вважаючи в рівнянні $t_1 = \text{const}$, отримаємо

$$E_{AB}(t_2, t_1) = f(t_2).$$

Ця залежність може бути знайдена під час градування термопари методом порівняння її показань із показаннями зразкового вимірювача температури. Результати градування подають у вигляді таблиць або графіків.

Таким чином, термопара – це два різних металевих провідники (термоелектроди), зварені один з одним на одному кінці. Цей так званий робочий або гарячий спай термопари розміщують в середовищі, температуру якого вимірюють. Вільні кінці термопари («холодні кінці» або холодний спай) з'єднують з вторинним приладом для вимірювання термоЕРС. В даній лабораторній роботі вторинним приладом слугує мілівольтметр.

Найпоширеніші термопари це: хромель-копелеві (до 800 °С), хромель-алюмінієві (до 1000 °С) і платинородій-платинові (до 1300 °С), але існує багато інших типів. Термоелектричний ефект залежить від внутрішньої структури матеріалу. Це означає, що два різні метали будуть генерувати різну напругу, навіть коли їх нагрівають до однакової температури. Для кожної пари матеріалів існують різні таблиці градування. Наприклад, в одному сплаві температурі 200 градусів буде відповідати (умовно) напруга 0,05 В, а в іншому 0,03 В. Основне, що слід винести з ефекту Зеєбека, це те, що величина напруги, що створюється, або струму залежить тільки від типу використовуваного сплаву і різниці температур.

Хромель (84 % Ni + 9,8 % Cr + 10 % Fe + 0,2% Mn)-**копелеві** (56 % Cu + 44 % Ni) термопари (ТХК). ТХК мають найбільшу термоЕРС [$E(100^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}) = 6,88 \text{ мВ}$] порівняно з іншими термоелектричними вимірювачами температури, але порівняно невисоку верхню межу тривалого використання (500... 600°С) у повітряному середовищі.

Хромель-алюмелеві (94% Ni + 2% Al + 2,5% Mn+1% Si+ 0,5% домішки) термопари (ТХА). ТХА мають більш високу температурну межу (1000°С), але меншу термоЕРС.

Допустимі відхилення термоЕРС від стандартних градувальних значень дуже значні, але не повинні перевищувати для термопари ТХА $\Delta E_T = 0,16 \text{ мВ}$ у діапазоні температур (50...300°С) та $\Delta E_T = 0,16 \pm 2 \cdot 10^{-4} (t-300) \text{ мВ}$ в діапазоні температур 300...1300 °С, а для термопари ТХК $\Delta E_T = 0,2 \text{ мВ}$ у діапазоні температур –50...300°С.

При градуванні термопар температуру холодного спаю зазвичай

підтримують $t_1 = 0^\circ\text{C}$. Однак при технічних та лабораторних вимірах температура холодного спаю t'_1 буває постійна, але не дорівнює 0°C , що викликає необхідність введення поправки. В цьому випадку значення термоЕРС $E_{AB}(t_2, t_1)$, за яким визначається температура по градууювальній таблиці (або кривій), знаходиться з рівняння.

$$E_{AB}(t_2, t_1) = E_{AB}(t_2, t'_1) \pm E_{AB}(t'_1, t_1),$$

де знак «плюс» відповідає випадку $t'_1 > t_1$, а знак «мінус» – випадку $t'_1 < t_1$.

Зазвичай термопара з'єднується з вторинним приладом звичайними (мідними або алюмінієвими) дротами, але кожна нова точка з'єднання проводів із різнорідних металів утворює холодний спай, що може вплинути на точність показань.

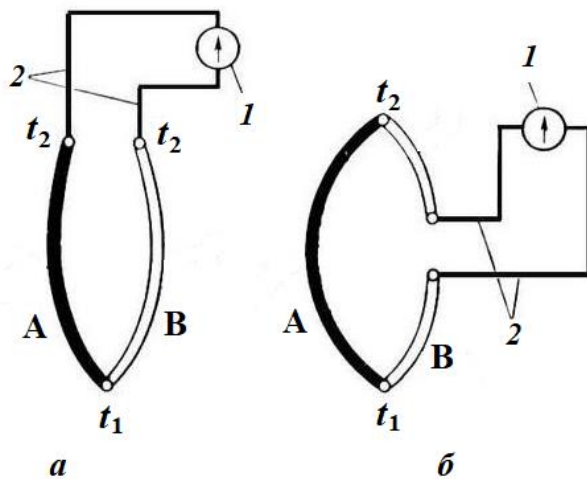


Рисунок Б.2 – Схеми включення термопар:
a – підключення вторинного приладу до вільних кінців термопари; *б* – підключення вторинного приладу в розрив термоелектроду;
 1 – вторинний прилад; 2 – подовжувальні дроти; А, В – термоелектроди

правильної полярності з'єднання).

Для включення до ланцюга термопари вимірювального приладу 2 необхідно або розірвати один із термоелектродів (рис. Б.2, *a*), або розірвати холодний спай термопари (рис. Б.2, *б*).

Незважаючи на відмінність схем *a* та *б* термоЕРС в обох випадках буде однаковою, тому що термоЕРС термопари не змінюється при введенні в її ланцюг однорідного провідника, якщо температури його спаїв однакові.

В ідеальному випадку підключення термопари виконують дротами з того ж матеріалу, що і електроди. В інших випадках, щоб уникнути похибки при з'єднанні термопари і вторинного приладу використовують «компенсаційні» дроти з двох різних металів, підібраних таким чином, щоб в парі вони мали термоелектричну характеристику таку ж (в межах до 100°C), як і сама термопара. Завдяки цьому в місці з'єднання електродів термопари з відповідним компенсаційним дротом термоЕРС не виникає (за умови збереження

Приклад визначення температури за допомогою термопарі із введенням поправки на холодний спай

Якщо холодний спай термопарі знаходиться при кімнатній температурі і ЕРС в термопарі генерується за рахунок різниці температур робочого спаю і кімнатної, то потрібно вносити поправку на холодний спай при використанні градуювальної таблиці термопарі.

Порядок визначення температури при температурі холодного спаю $t_{x.c} \neq 0$.

1. Визначити $t_{x.c}$ за термометром, наприклад, $t_{x.c} = 20$ °С.
2. За табл. Б.1 знайти термоЕРС, яка відповідає температурі $t_{x.c}$.

Для $t_{x.c} = 20$ °С $E(t_{x.c}, 0) = 1,31$ мВ.

$t, \text{°C}$	0	1
0	0,00	0,07
10	0,65	0,72
20	1,31	1,38
30	1,97	2,04

3. Визначимо термоЕРС гарячого спаю, яка показується вимірювальним приладом, наприклад, $E(t, t_{x.c}) = 2,2$ мВ.

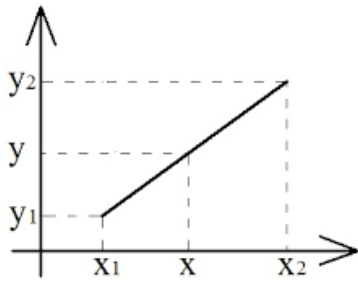
4. Знаходимо термоЕРС гарячого спаю, яка була б при $t_{x.c} = 0$:

$$E(t, 0) = E(t, t_{x.c}) + E(t_{x.c}, 0) = 1,31 + 2,2 = 3,51 \text{ мВ.}$$

5. Нарешті можна знайти температуру t за табл. А.1.

$t, \text{°C}$	0	1	2	3
0	0,00	0,07	0,13	0,20
10	0,65	0,72	0,78	0,85
20	1,31	1,38	1,44	1,51
30	1,97	2,04	2,11	2,17
40	2,65	2,72	2,79	2,86
50	3,34	3,41	3,48	3,55

Значення 3,51 мВ знаходиться між значеннями 3,48 мВ та 3,55 мВ, тобто температура, яку потрібно знайти, лежить між 52 та 53 °С. Для точно визначення цієї температури застосуємо інтерполяцію. Для цього будемо вважати, що на цьому інтервалі залежність термоЕРС від температури є лінійною, тоді можна застосувати рівняння для прямої у відрізках



звідки

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1},$$

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1) \quad \text{або}$$

$$x = x_1 + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1} (x_2 - x_1).$$

В позначеннях даного прикладу

$$t = t_1 + \frac{E(t, 0) - E_1}{E_2 - E_1} (t_2 - t_1).$$

$E_1 = 3,48$ мВ, що відповідає температурі $t_1 = 52$ °С;

$E_2 = 3,55$ мВ, що відповідає температурі $t_2 = 53$ °С,

таким чином, шукана температура

$$t = 52 + \frac{3,51 - 3,48}{3,55 - 3,48} (53 - 52) = 52 + \frac{0,03}{0,07} 1 = 52,43 \text{ °С.}$$

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторної роботи

**«ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДНОГО ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ВІЛЬНОМУ
РУСІ ПОВІТРЯ БІЛЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ЦИЛІНДРУ»**

для студентів спеціальностей 144 «Теплоенергетика», 131 «Прикладна
механіка», 181 «Харчові технології», 273 «Залізничний транспорт»

усіх форм навчання

Укладачі: ПАВЛОВА Вікторія Геннадіївна
КРУГЛЯКОВА Ольга Володимирівна
КОШЕЛЬНИК Олександр Вадимович
ПУГАЧОВА Тетяна Миколаївна

Відповідальний за випуск проф. М. П. Кунденко
Роботу рекомендував до видання проф. В. П. Суботович

В авторській редакції

План 2023 р., поз. 85

Підписано до друку 03.07.2023. Формат 60x84 1/16.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 0,52.
Наклад 50 прим. Зам. №. Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХПІ», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Надруковано у копії-центрі «МОДЕЛІСТ» (ФО-П Миронов М.В., Свідоцтво
ВО4№022953) м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1 Тел. 7-170-354