

Хмельницький національний університет  
Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

### Розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів

Назва теми

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Шифр, назва

Спеціальність 131 «Галузеве машинобудування»

Шифр, назва

Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

Шифр МРМА 23.00.00.000 ПЗ

Виконав студент 2 курсу  
група МБм-22-1

  
Підпис

Пірог Р.В.  
Ініціали, прізвище

Керівник

  
Підпис, дата

проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

  
Підпис, дата

доц. Тимощук О.Г.  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:

Зав. кафедри МАЕЕС

  
Підпис, дата

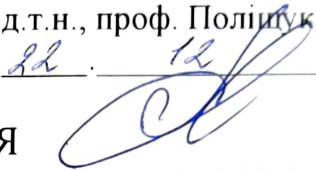
проф. Поліщук О.С.  
Ініціали, прізвище

22 12 2023 р.

Хмельницький 2023

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту і архітектури  
Кафедра машин і апаратів, електромеханічних та енергетичних систем  
Освітній рівень магістр  
Галузь знань 13 «Механічна інженерія»  
Шифр і назва  
Спеціальність 131 «Галузеве машинобудування»  
Шифр і назва  
Освітня програма «Машини і апарати легкої промисловості»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри МАЕЕС  
д.т.н., проф. Поліщук О.С.  
  
22. 12. 2023р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Пірог Роман Вадимович

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема роботи Розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів

керівник роботи д.т.н., проф. Поліщук О.С.

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 15 08 202\_\_ р. № 30

2. Строк подання студентом роботи на кафедру \_\_\_\_\_  
3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики стендів-аналогів та утеплювальних матеріалів

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. 1. Огляд та аналіз існуючих технологічних процесів та технічних рішень з тематики магістерської роботи. 2. Аналітичне дослідження коефіцієнту теплопровідності матеріалів. 3. Розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів. 4. Експериментальне визначення коефіцієнту теплопровідності утеплюючих матеріалів. Висновки. Перелік джерел посилання.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) Аркуш 1. Установка для визначення теплопровідності матеріалів. Документ оглядовий (A1). Аркуш 2. Аналітичне дослідження коефіцієнту теплопровідності. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 3. Експериментальний стенд. Документ ілюстраційний (A1). Аркуш 4. Схема експериментальної установки. Схема структурна (A1). Аркуш 5. Установка для визначення теплопровідності. Схема функціональна (A1). Аркуш 6. Визначення коефіцієнту теплопровідності. Результати розрахунків (A1). Аркуш 7. Блок-діаграма приладу. Документ ілюстраційний (A2)+Лицьова

панель приладу. Документ ілюстраційний (А2). Аркуш 8. Зразки матеріалів.  
Документ ілюстраційний (А2) + Вимірювальні прилади. Документ ілюстраційний (А2).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи


Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1. Огляд та аналіз існуючих технологічних процесів та технічних рішень	до 30.10.22р.	
2. Аналітичне дослідження коефіцієнту теплопровідності матеріалів	до 10.11.22р.	
3. Розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів	до 20.11.22р.	
4. Експериментальне визначення коефіцієнту теплопровідності утеплюючих матеріалів	до 06.12.22р.	
5. Оформлення пояснювальної записки і графічного матеріалу	до 12.12.22р.	

Студент

  
Підпис

Р.В. Пірог  
Ініціали, прізвище

Керівник роботи

  
Підпис

О.С. Поліщук  
Ініціали, прізвище

# АНОТАЦІЯ

до магістерської роботи студента  
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування».

1. Прізвище, ім'я та по батькові Шірог Роман Вадимович

2. Тема магістерської роботи Розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів

3. Прізвище, ініціали, вчена ступінь та звання опонента Міша ВВ  
к. т. н., доцент кафедри ТХМВ

4. Об'єм магістерської роботи: креслень 8 арк., сторінок записки 91

5. Сьогодні актуальним стає питання підвищення точності інструментів для вимірювання теплопровідності матеріалів, особливо в контексті сертифікації продукції, де якісна та кількісна оцінка термофізичних властивостей є важливою. Вивчаючи зміни в процесах розподілу тепла, можна отримати інформацію про структуру, склад матеріалів, виявити дефекти та домішки, а також прогнозувати термін служби і надійність складних систем. Це дослідження фокусується на підвищенні точності вимірювання коефіцієнта теплопровідності матеріалів. Для дослідження термофізичних властивостей ізоляційних матеріалів було розроблено спеціалізований експериментальний стенд. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності на цьому обладнанні є надійним і універсальним, особливо завдяки використанню передових технологій мікропроцесорної та комп'ютерної техніки, що дозволяє досягти високої точності. Такий підхід ефективно економить час та ресурси, не вимагаючи додаткового обладнання. В першому розділі проведено огляд та аналіз існуючих технологічних процесів та технічних рішень з тематики магістерської роботи. В другому здійснюється Аналітичне дослідження коефіцієнту теплопровідності матеріалів. В третьому розділі проводиться розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів. В четвертому розділі здійснюється експериментальне визначення коефіцієнту теплопровідності утеплюючих матеріалів.

Підпис студента

Шірог  
"22" 12 2023 р.

## РІШЕННЯ ЕК:

Протокол 2 від "29" 12 2023р.

Оцінка проекту ЕК відмінно 5,0/А

Рекомендації ЕК роботу рекомендуємо до  
впровадження у навчальний  
процес

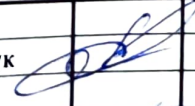
Особливі відмітки \_\_\_\_\_

Технічний секретар

Шірог  
"29" 12 2023 р.

## ЗМІСТ

	стор.
Вступ	6
1 Огляд та аналіз існуючих технологічних процесів та технічних рішень з тематики магістерської роботи	8
1.1 Основні поняття теорії теплопровідності	8
1.2 Ефективність теплоізоляційних матеріалів	25
1.3 Обладнання для визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом труби	30
1.4 Висновки до першого розділу	38
2 Аналітичне дослідження коефіцієнту теплопровідності матеріалів...	39
2.1 Визначення температурного градієнту	39
2.2 Визначення кількості теплової енергії, яка проходить через циліндричну стінку	46
2.3 Висновки до другого розділу	47
3 Розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів	48
3.1 Розробка конструкції установки для дослідження коефіцієнту теплопровідності	48
3.2 Розробка блоку електронного керування температурою нагрівального елемента установки	50
3.3 Висновки до третього розділу	61
4 Експериментальне визначення коефіцієнту теплопровідності утеплюючих матеріалів	62
4.1 Розробка блоку вимірювання температури	62
4.2 Розробка блок-діаграми віртуального приладу в середовищі LabView	72

<b>МРМА23.00.00.000 ПЗ</b>								
Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Аркуш	Аркушів	
Розроб.		Пірог			Розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів	м	4	91
Перевір.		Поліщук				ХНУ		
Т. контр.					гр.МБм-22-1			
Н. контр.		Поліщук						
Затв.		Поліщук						

4.3 Вибір обладнання для вимірювання струму, напруги та потужності споживання установки	75
4.4 Опис лабораторного стенду для визначення коефіцієнту теплопровідності	76
4.5 Вибір та підготовка зразків для проведення лабораторних досліджень	77
4.6 Опис методики експериментальних досліджень	81
4.7 Підготовка протоколу експериментальних досліджень	88
4.8 Результати експериментальних досліджень	83
4.9 Порівняння отриманих результатів з довідниковими	86
4.10 Розробка методичних вказівок до виконання лабораторної роботи	87
4.11 Висновки до четвертого розділу	87
Висновки	88
Перелік джерел посилання	89
Додаток А	
Додаток Б	
Додаток В	

## ВСТУП

Термофізичні характеристики ізоляційних матеріалів є ключовими для визначення їхньої якості та сфери використання. Основним робочим параметром ізоляційних матеріалів виступає їх теплопровідність. Ця властивість, яка показує здатність матеріалу передавати теплову енергію, є важливою для виробів легкої промисловості, впливаючи на їхнє використання та експлуатаційні властивості. Також важливо відзначити, що теплопровідність тісно пов'язана з таким важливим параметром, як щільність матеріалу, від якої залежить теплота одягу чи взуття. Основною перевагою ізоляційних матеріалів є їх низька теплопровідність.

У сучасному світі істотно зросла потреба в детальному моніторингу термофізичних параметрів різних матеріалів, таких як температуропровідність, теплопровідність та теплоємність, які відіграють ключову роль у процесах передачі та абсорбції тепла. Сьогодні актуальним стає питання підвищення точності інструментів для вимірювання цих параметрів, особливо в контексті сертифікації продукції, де якісна та кількісна оцінка термофізичних властивостей є важливою. Вивчаючи зміни в процесах розподілу тепла, можна отримати інформацію про структуру, склад матеріалів, виявити дефекти та домішки, а також прогнозувати термін служби і надійність складних систем. Це дослідження фокусується на підвищенні точності вимірювання коефіцієнта теплопровідності матеріалів.

Для дослідження термофізичних властивостей ізоляційних матеріалів було розроблено спеціалізований експериментальний стенд. Вимірювання коефіцієнта теплопровідності на цьому обладнанні є надійним і універсальним, особливо завдяки використанню передових технологій мікропроцесорної та комп'ютерної техніки, що дозволяє досягти високої точності. Такий підхід ефективно економить час та ресурси, не вимагаючи додаткового обладнання.

Результати цих досліджень будуть інтегровані у навчальний процес Хмельницького національного університету, зокрема у вигляді лекцій та лаборатор-

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

них робіт для курсів, які стосуються "Хімічної технології та обладнання підприємств", а також в контексті вивчення "Швейного матеріалознавства".

Тема є надзвичайно актуальною у світлі різноманітності швейних та взуттєвих матеріалів, які зараз представлені на ринку. Серед цих матеріалів, багато використовуються для утеплення одягу, взуття, шкіргалантерейних виробів і кожен з них має унікальні властивості та характеристики, такі як стійкість форми, вага, теплопровідність, що відіграють важливу роль при їх виборі. Постійне зростання асортименту утеплювальних матеріалів на ринку збуту розширює можливості для вибору оптимальних рішень при проектуванні швейної продукції, хоча відсутність детальних характеристик ускладнює підбір найбільш підходящих матеріалів.

*Ціль дослідження:* створення експериментального пристрою для вимірювання коефіцієнта теплопровідності ізоляційних матеріалів.

Дослідницькі завдання включають:

- вивчення різних методів та обладнання для оцінки теплопровідності матеріалів;
- теоретичне вивчення показників теплопровідності;
- конструювання спеціалізованого стенду для оцінки теплопровідності;
- аналіз коефіцієнта теплопровідності для різних видів ізоляційних матеріалів.

Об'єкт дослідження: методологія визначення коефіцієнта теплопровідності ізоляційних матеріалів.

Предмет дослідження: пристрій для вимірювання коефіцієнта теплопровідності ізоляційних матеріалів.

Результати магістерської роботи були представлені на науковій студентській конференції кафедри машин та апаратів, електромеханічних та енергетичних систем у 2023 році. На основі них було підготовлено тези у Збірник наукових праць «Технічна творчість» №7, 2023р.

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						7
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 1 ОГЛЯД ТА АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ З ТЕМАТИКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

## 1.1 Основні поняття теорії теплопровідності

Теплопровідність описує процес передачі теплової енергії від більш теплих частин об'єкта до менш теплих, або між двома об'єктами, що контактують, через молекулярний транспорт. Цей процес включає дифузію вільних електронів у металах, рух теплової енергії між сусідніми молекулами та атомами в неметалах і рідинах, а також обмін енергією між зіткнутими молекулами в газах.

Аналітичний аналіз теплопровідності полягає у вивченні змін температури у відповідності до часу та простору, вираженої через певну залежність:

$$t = f(x, y, z, \tau), \quad (1.1)$$

де  $x, y, z$  - просторові координати в декартовій системі;

$\tau$  - час.

Набір миттєвих значень температури, виміряних у кожній точці досліджуваної області, утворює те, що відомо як температурне поле. Поєднуючи точки в цьому полі, які мають однакову температуру, можна сформувати ізотермічну поверхню.

Вектор, який представляє собою першу похідну температури вздовж нормалі до ізотермічної поверхні та спрямований у напрямку збільшення температури, називається температурним градієнтом (рис.1.1):

$$\lim_{\Delta n \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta n} = \frac{dt}{dn} = \text{grad}t, \quad \text{‘К/м.} \quad (1.2)$$

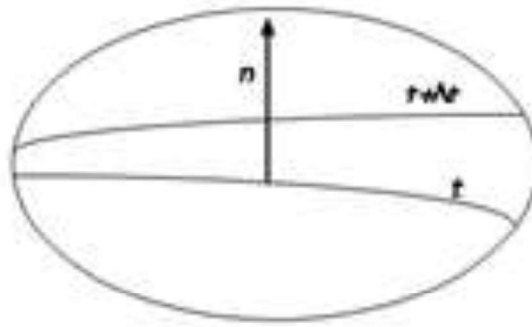


Рисунок 1.1 - Температурний градієнт

Кількість тепла, що проходить через довільну ізотермічну поверхню ( $F$ ) за одиницю часу, називається тепловим потоком ( $Q$ ), Дж/с. Тепловий потік, що віднесений до одиниці ізотермічної поверхні, називається густиною теплового потоку ( $q$ ), Вт/м<sup>2</sup>:

$$q = \frac{Q}{F} \quad (1.3)$$

або у диференціальній формі:

$$q = \frac{dQ}{dF} = \frac{d^2 Q_\tau}{dF d\tau} \quad (1.4)$$

Щільність теплового потоку визначається як вектор, який вказує на напрямок розповсюдження тепла і зорієнтований в протилежну сторону від напрямку вектора температурного градієнта.

Формулювання Закону Фур'є.

На підставі своїх експериментальних спостережень Жозеф Фур'є висунув основний принцип теплопередачі (відомий як закон Фур'є), який стверджує, що щільність теплового потоку є прямо пропорційною до градієнта температури, тобто:

$$q = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = -\lambda \operatorname{grad} t, \quad (1.5)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К.

Коефіцієнт теплопровідності для середовищ різного агрегатного стану залежить від температури:

$$\lambda_t = \lambda_0(1 \pm bt), \quad (1.6)$$

де  $\lambda_0$  - коефіцієнт теплопровідності середовища при температурі  $t=0^\circ\text{C}$ ;

$\lambda_t$  - коефіцієнт теплопровідності середовища при температурі  $t$ ;

$b$  - емпірична стала.

Диференціальне рівняння теплопровідності.

Рівняння, що відображає процес перенесення тепла через теплопровідність у присутності внутрішнього джерела або стоку тепла, відоме як диференціальне рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \pm \frac{q_v}{c_p \rho} \quad (1.7)$$

або

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t \pm \frac{q_v}{c_p \rho}, \quad (1.8)$$

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho}, \quad (1.9)$$

де  $a$  - коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с;

$c_p$  - теплоємність при постійному тиску, кДж/кг·К;

$q_v$  - потужність внутрішнього джерела (стоку) тепла Вт/м<sup>3</sup>;

$\rho$  - густина середовища, кг/м<sup>3</sup>.

Для одномірного температурного поля, наприклад, необмеженої пластини, диференціальне рівняння теплопровідності прийме наступний вигляд:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \pm \frac{q_v}{c_p \rho} \quad (1.10)$$

Крайові умови.

Для визначення констант інтеграції важливо застосовувати крайові умови, які розділяють на початкові та граничні умови. Початкова умова встановлюється шляхом визначення закону розподілу температури у тілі або середовищі на початковий момент часу, тобто:

$$t_0 = f(x, y, z, 0) \quad (1.11)$$

Граничні умови першого роду полягають у задаванні температури на поверхні тіла в будь-який момент часу:

$$t|_n = f(\tau) \quad (1.12)$$

Граничні умови другого роду полягають у задаванні густини теплового потоку для кожної точки поверхні тіла в будь-який момент часу:

$$q|_n = q(\tau) \quad (1.13)$$

Граничні умови третього роду встановлюються через задання щільності

теплогового потоку на кожній ділянці поверхні тіла відповідно до закону Ньютона-Ріхмана про конвективний теплообмін. Згідно з цим законом, кількість тепла, переданого за одиницю часу з одиничної поверхні тіла в оточуюче середовище, є прямо пропорційною різниці температур між поверхнею тіла ( $t_{\Pi}$ ) та оточуючим середовищем ( $t_c$ ):

$$q /_{\Pi} = \alpha(t_{\Pi} - t_c) , \quad d^2 Q_{\tau} = \alpha(t_{\Pi} - t_c) dF d\tau , \quad q = \frac{d^2 Q_{\tau}}{dF d\tau} = \alpha(t_{\Pi} - t_c) , \quad (1.14)$$

$$\alpha(t_{\Pi} - t_c) = -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right) , \quad \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right) = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_{\Pi} - t_c) . \quad (1.15)$$

де  $\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі ( $\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$ ).

Стационарний режим. Теплопровідність плоскої стінки

Основною характеристикою стаціонарного процесу теплопровідності є постійність температури в будь-якій точці досліджуваної області протягом часу, що, у свою чергу, призводить до незмінності теплового потоку.

Розглянемо приклад одношарової плоскої стінки, яка має певну товщину, проте ця товщина значно менша за лінійні розміри її бічної поверхні (див. рисунок 1.2).

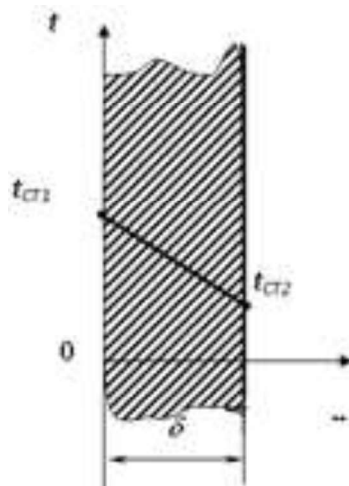


Рисунок 1.2 - Теплопровідність одношарової плоскої стінки

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
12

Температури на лівій і правій гранях постійні і рівняються відповідно  $t_{CT1}$  і  $t_{CT2}$ .

Для стаціонарного процесу  $\left(\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0\right)$  при відсутності внутрішніх джерел тепла ( $q_v = 0$ ) рівняння теплопровідності в плоскій стінці приймає вигляд :

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0. \quad (1.16)$$

Для представленої задачі температура ( $t$ ) залежить тільки від координати  $x$ . Тому у даному рівнянні часткову похідну можна замінити на повну:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0. \quad (1.17)$$

Після подвійного інтегрування даного рівняння було отримано:

$$\frac{dt}{dx} = C_1; \quad t = C_1 x + C_2. \quad (1.18)$$

Розташовуючи початок координат на лівій грані стінки, було знайдено постійні інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  з умов: при  $x=0, t=t_{CT1}$ ; при  $x=\delta, t=t_{CT2}$

$$C_2 = t_{CT1}; \quad C_1 = \frac{t_{CT2} - t_{CT1}}{\delta}. \quad (1.19)$$

Підставивши значення  $C_1$  і  $C_2$  у рішення рівняння теплопровідності, отри-

муємо лінійний розподіл температури в плоскій стінці:

$$t = t_{CT1} + \frac{(t_{CT2} - t_{CT1})}{\delta} x \quad (1.20)$$

$$\frac{dt}{dx} = C_1, \text{ отже: } \frac{dt}{dx} = \frac{t_{CT2} - t_{CT1}}{\delta} \quad (1.21)$$

Визначивши кількість переданого тепла запишемо рівняння Фур'є:

$$q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (1.22)$$

Після підстановки  $\frac{dt}{dx}$  у рівняння Фур'є, було отримано:

$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{CT1} - t_{CT2}), \text{ Вт/м}^2 \quad (1.23)$$

Відношення коефіцієнта теплопровідності до товщини стінки називається тепловою провідністю плоскої стінки, а обернена їй величина, що позначається літерою  $R$ , називається термічним опором стінки,  $\text{К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ :

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (1.24)$$

Розглянемо теплопровідність двохшарової стінки з товщинами шарів  $\delta_1$  і  $\delta_2$ . Позначаємо через  $t_{CT1}$  і  $t_{CT3}$  температури на лівій та правій гранях двохшарової стінки, а температуру на стику шарів через  $t_{CT2}$ .

У разі стаціонарного процесу, кількість тепла, яка проходить через обидві грані двошарової стінки, буде однаковою. Таким чином, кількість тепла, що проходить через перший шар  $q_1$ , буде рівною кількості тепла, що проходить через другий шар  $q_2$ , отже  $q_1=q_2=q=\text{const}$ :

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{CT1} - t_{CT2}), \quad q = \frac{\lambda_2}{\delta_2} (t_{CT2} - t_{CT3}), \quad (1.25)$$

де  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  - коефіцієнти теплопровідності шарів.

Додавши температурні перепади першого ( $t_{CT1} - t_{CT2}$ ) і другого ( $t_{CT2} - t_{CT3}$ ) шарів, було знайдено температурний перепад двошарової стінки:

$$t_{CT1} - t_{CT3} = q \left( \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right). \quad (1.26)$$

З отриманого виразу було знайдено тепловий потік через двошарову стінку:

$$q = \frac{t_{CT1} - t_{CT3}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2}}. \quad (1.27)$$

Аналогічно, для трьохшарової стінки буде справедливе рівняння:

$$q = \frac{t_{CT1} - t_{CT4}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}}. \quad (1.28)$$

Для стінки, що складається з  $n$  шарів, можна записати наступне:

$$q = \frac{t_{CT1} - t_{CT_{n+1}}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}} = \frac{t_{CT1} - t_{CT_{n+1}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}}, \quad (1.29)$$

де  $\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} = R_{\Sigma}$  – повний термічний опір багат шарової плоскої стінки.

Температура на стику першого та другого шарів рівняється:

$$t_{CT2} = t_{CT1} - q \frac{\delta_1}{\lambda_1} = t_{CT1} - qR_1, \quad (1.30)$$

де  $R_1$  - термічний опір першого шару.

З останнього рівняння випливає наступне:

$$t_{CT1} - t_{CT2} = q \cdot R_1. \quad (1.31)$$

Таким чином, різниця температур у кожному шарі є дорівнює добутку щільності теплового потоку на термічний опір цього шару.

Еквівалентний коефіцієнт теплопровідності для багат шарової стінки ( $\lambda_{екв}$ ) відповідає коефіцієнту теплопровідності для одношарової стінки з такою ж загальною товщиною, при цьому термічний опір еквівалентної одношарової стінки дорівнює загальному термічному опору багат шарової стінки. Це означає, що:

$$\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\lambda_{екв}} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}. \quad (1.32)$$

Звідси:

$$\lambda_{екв} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (1.33)$$

Теплопровідність циліндричної стінки.

Маючи одношарову циліндричну стінку із внутрішнім і зовнішнім діаметрами відповідно  $d_1=2r_1$  і  $d_2=2r_2$ . Температура на внутрішній поверхні стінки складає  $t_{CT1}$ , а на зовнішній  $t_{CT2}$  (рис.1.4).

Для необмеженого циліндра ( $m=1$ ) за відсутності внутрішніх джерел тепла ( $q_v=0$ ) рівняння (1.1) набуде наступного вигляду:

$$\frac{d^2 t}{d x^2} + \frac{1}{x} \frac{d t}{d x} = 0 \quad (1.34)$$

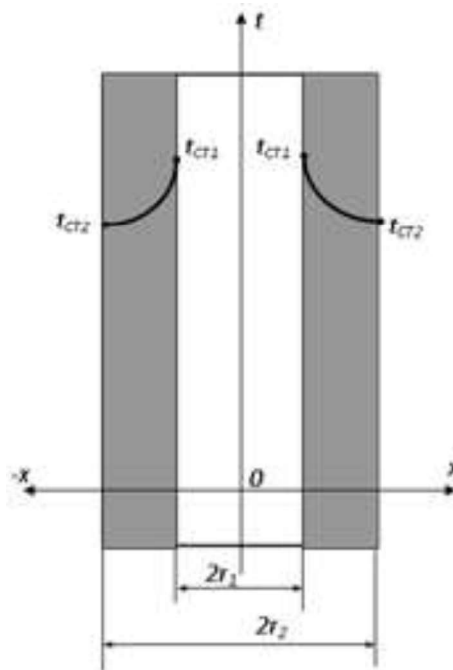


Рисунок 1.4 - Теплопровідність одно шарової циліндричної стінки

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.

17

Щоб розв'язати рівняння (1.30), потрібно зменшити його порядок введенням функції виду:

$$U = \frac{dt}{dx} . \quad (1.35)$$

Рівняння набуде вигляду:

$$\frac{dU}{dx} + \frac{1}{x}U = 0 . \quad (1.36)$$

Розділяючи змінні і проводячи операцію інтегрування, було отримано:

$$\ln U + \ln x = \ln C_1, \quad (1.37)$$

або  $\ln(Ux) = \ln C_1$ , звідки отримемо:

$$Ux = C_1 . \quad (1.38)$$

Повертаючись до первісної функції і проводячи друге інтегрування, було отримано:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{C_1}{x} ; \quad (1.39)$$

$$dt = C_1 \frac{dx}{x} ; \quad (1.40)$$

$$t = C_1 \ln x + C_2 \quad (1.41)$$

Постійні інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  було визначено з граничних умов: при  $x=r_1$

$t=t_{CT1}$ ; при  $x=r_2$   $t=t_{CT2}$ :

$$t_{CT1}=C_1 \ln r_1+C_2; t_{CT2}=C_1 \ln r_2+C_2. \quad (1.42)$$

Розв'язанням цієї системи буде наступним:

$$C_1 = \frac{t_{CT1} - t_{CT2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}}; C_2 = t_{CT1} - \frac{t_{CT1} - t_{CT2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \ln r_1. \quad (1.43)$$

Після підстановки  $C_1$  і  $C_2$  у рівняння (1.41) було отримано:

$$t = t_{CT1} - \frac{t_{CT1} - t_{CT2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \ln \frac{x}{r_1}. \quad (1.44)$$

Рівняння (1.44) показує розподіл температури по товщині циліндричної стінки. З аналізу залежності випливає, що розподіл температури в циліндричній стінці підкорюється логарифмічному закону.

Для визначення кількості теплоти, яка проходить через циліндричну поверхню ( $F$ ) за одиницю часу, як і у випадку плоскої стінки, можна скористатися законом Фур'є:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx} F. \quad (1.45)$$

Підставивши в рівняння Фур'є значення температурного градієнта (1.39) та враховвавши, що  $F=2\pi x l$ , де  $l$  - довжина циліндричної стінки, було отримано:

$$Q = -\lambda \frac{C_1}{x} 2\pi x l = -2\pi x \frac{t_{CT1} - t_{CT2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} = 2\pi l \lambda \frac{t_{CT1} - t_{CT2}}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = 2\pi l \lambda \frac{t_{CT1} - t_{CT2}}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (1.46)$$

Для визначення кількості теплоти, яка проходить через циліндричну стінку, доцільно використати тепловий потік, що віднесений до одиниці довжини стінки ( $l=1\text{м}$ ):

$$Q_l = \frac{\pi(t_{CT1} - t_{CT2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (1.47)$$

Тепловий потік, що віднесений до одиниці довжини циліндричної стінки, має розмірність Вт/м. Він називається лінійною густиною теплового потоку.

Як випливає із рівняння (1.47), при незмінному співвідношенні  $d_2/d_1$  лінійна густина теплового потоку не залежить від поверхні циліндричної стінки.

В виразі (2.47) величина  $1/(\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1})$  має назву теплової провідності циліндричної стінки, а величина обернена їй - термічним опором:

$$R = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} \quad (1.48)$$

Рівняння (1.48) можна розширити і на багатошарову циліндричну стінку. Спочатку розглянемо двохшарову циліндричну стінку із координатами  $d_1=2r_1$ ,  $d_2=2r_2$  і  $d_3=2r_3$  (рис.1.5).

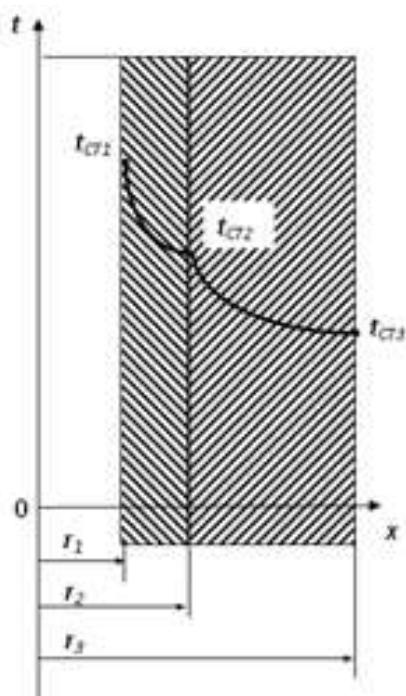


Рисунок 1.5 - Теплопровідність двохшарової циліндричної стінки

Температура на внутрішній поверхні стінки буде становити  $t_{CT1}$ , а на зовнішній буде становити  $t_{CT3}$ . Коефіцієнти теплопровідності шарів рівні, відповідно,  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ . Позначимо температуру на стику шарів через  $t_{CT2}$ . При стаціонарному процесі кількість тепла, яка проходить через перший і другий шари, є однаковою. Тоді, згідно з (1.46) можна записати:

$$Q_l = \frac{\pi(t_{CT1} - t_{CT2})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad Q_l = \frac{\pi(t_{CT2} - t_{CT3})}{\frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}} \quad (1.49)$$

Проведемо визначення часткових температурних напорів першого і другого шарів:

$$Q_l \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} = t_{CT1} - t_{CT2} \quad ; \quad Q_l \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = t_{CT2} - t_{CT3} \quad (1.50)$$

Повний температурний напір двохшарової циліндричної стінки визначається складанням часткових температурних напорів:

$$t_{CT1} - t_{CT2} = Q_l \left( \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} \right). \quad (1.51)$$

Звідси було знайдено:

$$Q_l = \frac{\pi(t_{CT1} - t_{CT3})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2}}. \quad (1.52)$$

Нескладно довести, що для трьохшарової стінки справедливим буде наступний вираз:

$$Q_l = \frac{\pi(t_{CT1} - t_{CT4})}{\frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{2\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}}. \quad (1.53)$$

Для циліндричної стінки, що складається з  $n$  кількості шарів, можна записати наступне:

$$Q_l = \frac{\pi(t_{CT1} - t_{CTn+1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}}. \quad (1.54)$$

Знаменник рівняння (1.54) показує термічний опір багатошарової циліндричної стінки:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} . \quad (1.55)$$

Температуру на стику шарів можна визначити із наступних виразів (1.48):

$$t_{CT2} = t_{CT1} - Q_l \frac{1}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} , \text{ або } t_{CT2} = t_{CT3} + Q_l \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} . \quad (1.56)$$

Нестационарний режим.

Нестационарна теплопровідність відрізняється тим, що температура в твердому тілі або у статичному рідинному середовищі змінюється не лише у просторі, але й у часі.

Ці зміни в температурі можна описати, наприклад, для необмеженої пластини, використовуючи рішення диференціального рівняння теплопровідності.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} ;$$

$$t = \sum_{n=1}^{\infty} C_1 \cdot \sin kx \cdot \exp(-\alpha k^2 \tau) + \sum_{n=1}^{\infty} C_2 \cdot \cos kx \cdot \exp(-\alpha k^2 \tau) \quad (1.57)$$

Постійна  $k$  визначається з граничних умов, а постійні  $C_1$  і  $C_2$  визначаються з початкових.

Для граничних умов третього роду при початковій температурі пластинки  $t_0$  і постійній температурі навколишнього середовища  $t_c$  вирішення рівняння теплопровідності у випадках нагрівання (рис.1.6,а) і охолодження пластини (рис.1.6,б) :

$$\frac{t_C - t}{t_C - t_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{\mu_n \cdot x}{\delta} \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo) ; \quad (1.58)$$

$$\frac{t - t_C}{t_0 - t_C} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \frac{\mu_n \cdot x}{\delta} \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo) , \quad (1.59)$$

де 
$$A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n} = (-1)^{n+1} \frac{2Bi\sqrt{Bi^2 + \mu_n^2}}{\mu_n(Bi^2 + Bi + \mu_n^2)} ; \mu_n = (2n-1)\frac{\pi}{2} .$$

коефіцієнти доданків ряду;

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{l^2} ; \quad Bi = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{CT}} - \text{критерії Фур'є і Біо;}$$

$n$  - порядковий номер доданка ряду;

$$l = \frac{1}{2} \delta - \text{характерний розмір;}$$

$\lambda_{CT}$  - коефіцієнт теплопровідності пластини.

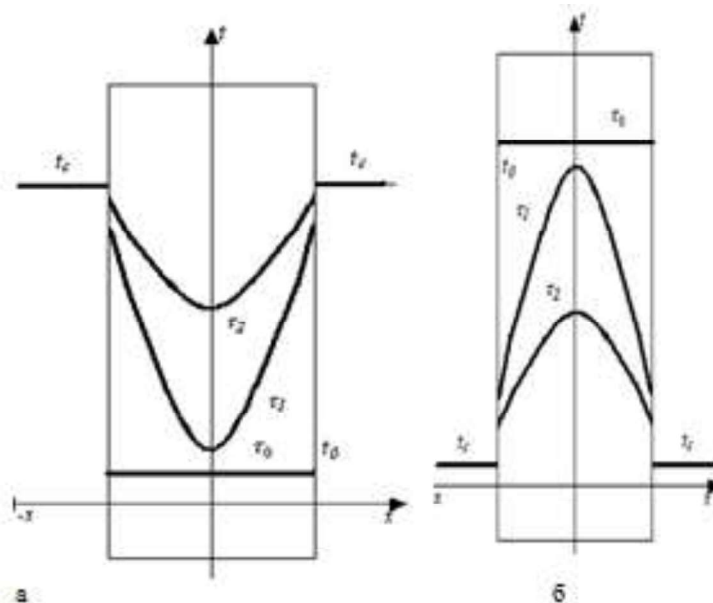


Рисунок 1.6 - Розподіл температури в середовищі і самій стінці

Інженерний підхід до розв'язання задач нестационарної теплопровідності базується на визначенні критеріїв Фур'є ( $F_0$ ) та  $Bi$ . За допомогою цих критеріїв і використовуючи відповідні графіки, можна знайти відносну надлишкову температуру ( $\Theta$ ) (див. рис. 1.6, 1.7). Кожен графік сконструйований для певного значення відносної координати ( $\eta = 2x / \delta$ ).

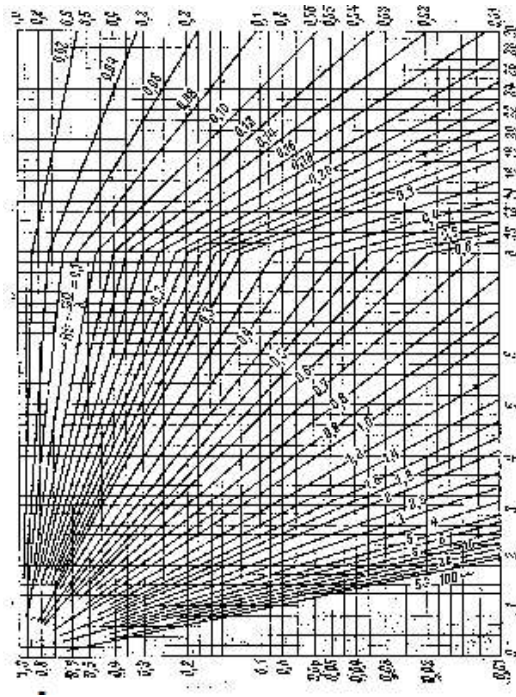


Рисунок 1.7 - Залежність  $\Theta=f(F_0, Bi)$  для середини необмеженої пластини

## 1.2 Ефективність теплоізоляційних матеріалів

### 1.2.1 Призначення теплоізоляції

Теплоізоляційні матеріали - це вид матеріалів з низькою теплопровідністю. Вони застосовуються для забезпечення теплоізоляції в стінах, дахах, інших конструктивних елементах будівель та споруд, а також в промисловому обладнанні та трубопроводах.

Ключовою властивістю цих матеріалів є їх висока пористість, що призво-

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

дять до низької середньої щільності і, відповідно, низької теплопровідності. Використання теплоізоляційних матеріалів сприяє економії на основних будівельних матеріалах, зменшує вагу і товщину стін та інших конструкцій, знижує витрати на працю та транспортування, а також зменшує загальну вартість будівництва. Також, вони знижують тепловтрати та витрати палива, необхідного для опалення будівель та підтримки технологічних процесів.

Теплоізоляційні матеріали значно підвищують рівень комфорту в житлових просторах. Основною метою використання теплоізоляції в будівельних конструкціях є зменшення енерговитрат на опалення будівель.

### 1.2.2 Види теплоізоляційних матеріалів

Рулони та мати, які використовуються в якості теплоізоляційних матеріалів, виготовляються зі скляних, мінеральних, або кам'яних волокон (рис.1.8). Їх стандартні розміри включають товщину від 80 до 200 мм, ширину до 1,2 м та довжину до 9 м. Ці матеріали часто містять шар фольги або полімеру, що забезпечує пароізоляцію. Рулони та мати зазвичай використовують для ізоляції дахів, мансард та перекриттів.



Рисунок 1.8 – Теплоізоляційні рулони та мати

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
26

Плити для теплоізоляції виготовляються з таких матеріалів як скловолокно та силікатна вовна. Вони являють собою короткі, щільні мати, розмір яких становить 0,6, 0,9, або 1,2 метра в довжину. Ці плити ідеально підходять для теплоізоляції невеликих площ.



Рисунок 1.9 – Теплоізоляційні плити

Серед основних типів теплоізоляційних матеріалів також важливе місце займає легкий утеплювач, як наприклад, вермикуліт або перліт (рис.1.10). Цей тип утеплювача використовується для заповнення порожнеч та покриття відкритих рівних горизонтальних поверхонь у приміщеннях, де немає протягів.



Рисунок 1.10 – Пухкі утеплювачі

Жорсткі плити, виготовлені з полістиролу та уретану, являють собою вид теплоізоляційного матеріалу, що виробляється з пористого пластику. Ці плити доступні у формі квадратів розміром 200 x 200 мм або великих аркушів розмі-

ром 1,22 x 2,44 м (рис.1.11). Товщина цих плит варіюється від 25 до 50 мм. Оскільки жорсткі плити є горючими матеріалами, їх часто покривають вогнетривкою штукатуркою для забезпечення додаткового захисту.



Рисунок 1.11 – Теплоізоляційні жорсткі дошки

Піноскло є ще одним ключовим типом теплоізоляційних матеріалів, який з'явився на ринку відносно недавно. Цей довговічний теплоізоляційний матеріал виробляється у формі блоків з розмірами приблизно 250×400×100 мм (рис.1.11). Висока термічна та хімічна стійкість піноскла робить його ідеальним для використання у таких застосуваннях, як утеплення басейнів.



Рисунок 1.12 – Теплоізоляційні блоки

### 1.2.3 Види теплоізоляції

Теплоізоляційні матеріали класифікують наступним чином:

- за їх об'ємною масою у сухому стані (в кг/м<sup>3</sup>), де виділяють марки: 15, 23, 35, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600 і 700.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
28

- за формою, на формовані (такі як листи, плити, мати, рулони, шкаралупи, сегменти, цеглини, блоки) та безформні (засипки, набивання, штукатурки тощо).

- за характером будови, на жорсткі (плити, камені, цеглини, шкаралупи, сегменти), гнучкі (мати, напівжорсткі плити, шнури, джгути, листи, рулони) та рихлі (волокнисті, зернисті, порошкоподібні).

- за галуззю застосування, на ізоляційно-будівельні (для утеплення конструкцій будівель та інших захисних споруд) та ізоляційно-монтажні (для теплової ізоляції промислового устаткування та трубопроводів).

Також теплоізоляційні матеріали поділяють за ступенем горючості:

1. Неспалимі матеріали, які не горять, не тліють і не обвуглюються під впливом вогню або високої температури.

2. Важкозайmistі, які важко загоряються, тліють або обвуглюються під впливом вогню або високої температури, і продовжують горіти чи тліти лише при наявності теплового джерела.

3. Спалимі, які продовжують горіти і після видалення теплового джерела при займанні.

Нормативні вимоги до матеріалів. На теплоізоляційні матеріали розповсюджуються ГОСТи 4640-66, 957372, 10499-67, 6788-62, 2694-67, 16136-70 і 18109-72.

#### 1.2.4 Властивості

Об'ємна маса теплоізоляційних матеріалів у сухому стані перевищує 700 кг/м<sup>3</sup> для деяких типів, в той час як матеріали, що використовуються в ізоляційно-монтажних цілях, зазвичай мають об'ємну масу не більше 400 кг/м<sup>3</sup>. Важливо, що теплоізоляційні матеріали не повинні втрачати своїх властивостей з часом, не повинні виділяти речовини, що можуть послабити міцність сусідніх конструкційних елементів, провокувати корозію металевих поверхонь, погіршу-

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						29
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

вати якість обробки приміщень, а також виділяти шкідливі для здоров'я людини речовини або сприяти псуванню харчових та інших продуктів.

Теплоізоляційні матеріали в основному виготовляються з мінеральних матеріалів, таких як азбест, гіпс, цемент, вапно, пемза, гірські породи та інші.

Основні характеристики теплоізоляційних матеріалів, такі як низька об'ємна маса, теплопровідність та висока здатність до водопоглинання, зумовлені їхньою великою пористістю. Методи формування пор включають:

- вільне розсіпання порошкоподібних, зернистих або волокнистих частинок, як-от діатоміт, шлак, скляне або мінеральне волокно, спучений перліт або вермикуліт.

- випаровування природної або доданої води, як у випадку з гіпсом, що містить надмірну вологу (наприклад, мікропорит).

- випалювання органічних домішок з неорганічних формованих виробів.

- утворення повітряних або газових бульбашок у застиглому цементі чи гіпсі, як механічним шляхом (наприклад, за допомогою збивання повітря, створюючи пінобетон), так і хімічним шляхом (шляхом додавання алюмінієвого порошку або перекису водню, виробляючи газобетон).

- теплова обробка при підвищених температурах до досягнення піропластичного стану деяких природних порід або штучних мінеральних сумішей, як-то виробництво керамзиту, спученого перліту, вермикуліту, аглопориту тощо.

### 1.3 Обладнання для визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом труби

У лабораторних роботах з визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл за методом труби використовуються різноманітні конструкції установок. Одна з таких конструкцій представлена на рисунку 1.13.

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Ця установка має на передній панелі восьмиканальний вимірювач температури типу УТК-38 (1), який підключений до шести хромель-капельевих термопар. Присутній також тумблер (5) для включення УТК-38, універсальний вольтметр типу МУ-68 (2) з автоматичним перемикачем меж вимірювань, тумблер (3) для включення електроживлення установки. Є роз'єми (V) для підключення мультиметра (2), тумблер (6) для перемикання вольтметра на вимірювання падіння напруги на зразковому опорі ( $U_o$ ) та напруги на циліндричному нагрівачі ( $U_n$ ). Регульоване джерело живлення ЛАТР (4) включається за допомогою тумблера (7).

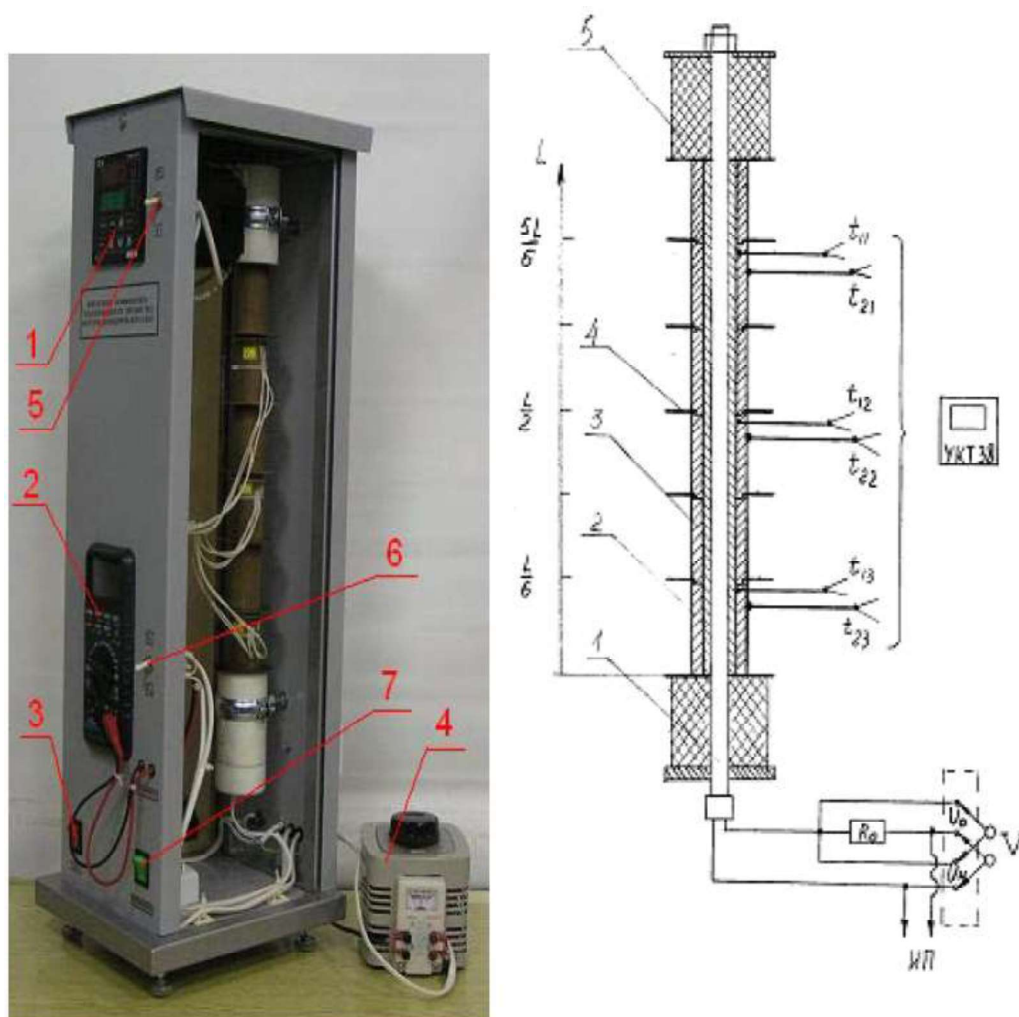


Рисунок 1.13 – Зовнішній вигляд установки і схема системи живлення і вимірювань

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

На рисунку 2 представлено принципову схему робочої зони та електричну схему живлення і вимірювань. У центрі конструкції розташований циліндричний нагрівач (1), на якому встановлена мідна термостатуюча труба (2). На зовнішній поверхні цієї труби розміщені шість досліджуваних зразків (3) із однаковими розмірами. Для мінімізації вертикальних конвективних потоків між зразками встановлені тонкі пластини (4). На кінцях нагрівача розміщені теплоізолюючі втулки (5) з пінопласту для зниження теплових втрат.

Електроживлення подається до нагрівача від джерела живлення - ЛАТР (4), причому вихід від ЛАТР з'єднаний з нагрівачем за допомогою електричного кабелю, що проходить через задню стінку. В електричний ланцюг нагрівача послідовно включено зразковий опір ( $R_0$ ), що дозволяє визначати величину електричного струму в ланцюзі шляхом вимірювання падіння напруги на  $R_0$ . На зовнішній та внутрішній поверхнях досліджуваних зразків встановлено шість хромель-копелевих термопар (по три на кожній поверхні), які вимірюють температури в точках перерізів.

Розглянемо іншу конструкцію установки для визначення коефіцієнту теплопровідності. Загальний вигляд установки для визначення - коефіцієнта теплопровідності циліндричного шару матеріалу представлений на рис. 1.

Установка складається з металевої циліндричної труби 1; на зовнішній поверхні, якої поміщається досліджуваний шар ізоляційного матеріалу 2. Труба має довжину 1000 мм; циліндричний шар досліджуваного матеріалу має внутрішній діаметр  $d_{\text{вн}} = 12,5$  мм і зовнішній діаметр  $d_{\text{н}} = 25,5$  мм. Всередині труби закладений електричний нагрівач 3, що створює рівномірний обігрів. Сила струму регулюється лабораторним автотрансформатором 4, а потужність, що втрачається, вимірюється точним ваттметром 5.

Температура досліджуваного матеріалу вимірюється за допомогою термопар (6), виготовлених з хромелю та алюмелю. Гарячі спаї цих термопар розміщені на внутрішній ( $t_1, t_3, t_5$ ) та зовнішній ( $t_2, t_4, t_6$ ) поверхнях ізоляційного шару, при цьому на кожній поверхні знаходиться по три спаю (див. рис. 1.14).

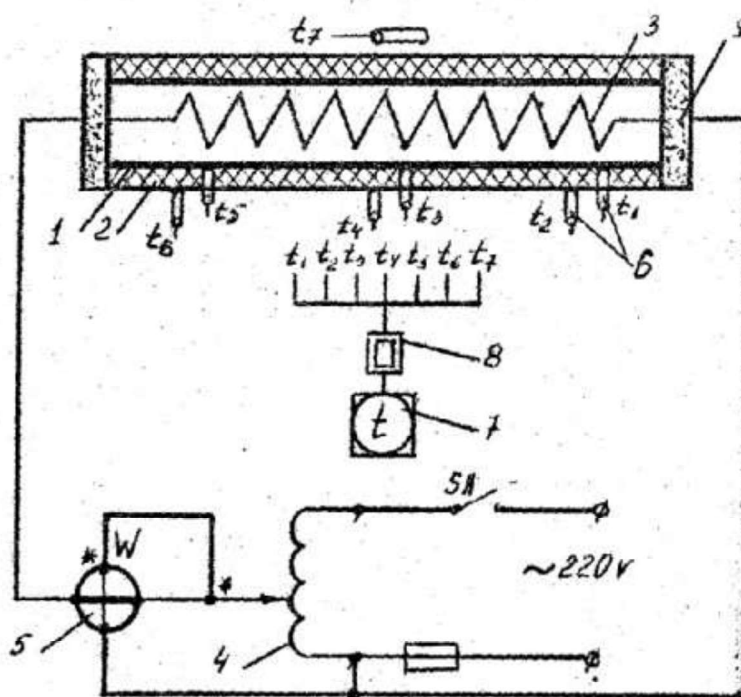
					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						32
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Електрорушійна сила термопар вимірюється з допомогою потенціометра (7), каліброваного у градусах Цельсія, через перемикач (8).

Торцеві частини циліндричної труби ізолювані за допомогою теплоізоляції (9) для створення одновимірного температурного поля.

На рис. 1.15 представлена лабораторна установка, в якій досліджуваний матеріал (7) поміщений у вигляді циліндричного шару на металеву трубу (8). Всередині труби встановлений електричний нагрівач (9) з ніхромового дроту, що забезпечує рівномірне виділення тепла вздовж труби. Кількість тепла  $Q$ , яка виділяється нагрівачем і передається через шар матеріалу в оточуюче середовище при стаціонарному тепловому режимі, можна визначити за споживаною потужністю  $W$  електронагрівача:

$$Q = W.$$



- 1 - циліндрична труба, 2 - ізоляція, що досліджується, 3 - електричний нагрівач, 4 - автотрансформатор, 5 - ватметр, 6 - термопари, 7 - потенціометр, 8 - перемикач, 9 - тепловий захист торців труби

Рисунок 1.14 - Схема установки для експериментів:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

У цій установці потужність нагрівача регулюється за допомогою автотрансформатора (13) і вимірюється ваттметром (14).

Для визначення температур на зовнішній та внутрішній поверхнях шару (7) використовуються хромель-копелеві термопари (1 - 6). Всі ці термопари по черзі підключаються до цифрового мілівольтметра (11) через перемикач (10). Загальний холодний спай термопар підключений до металевої пластини (12), яка знаходиться при кімнатній температурі. Переведення показників мілівольтметра у градуси Цельсія відбувається за допомогою довідкової таблиці термопар, з урахуванням кімнатної температури.

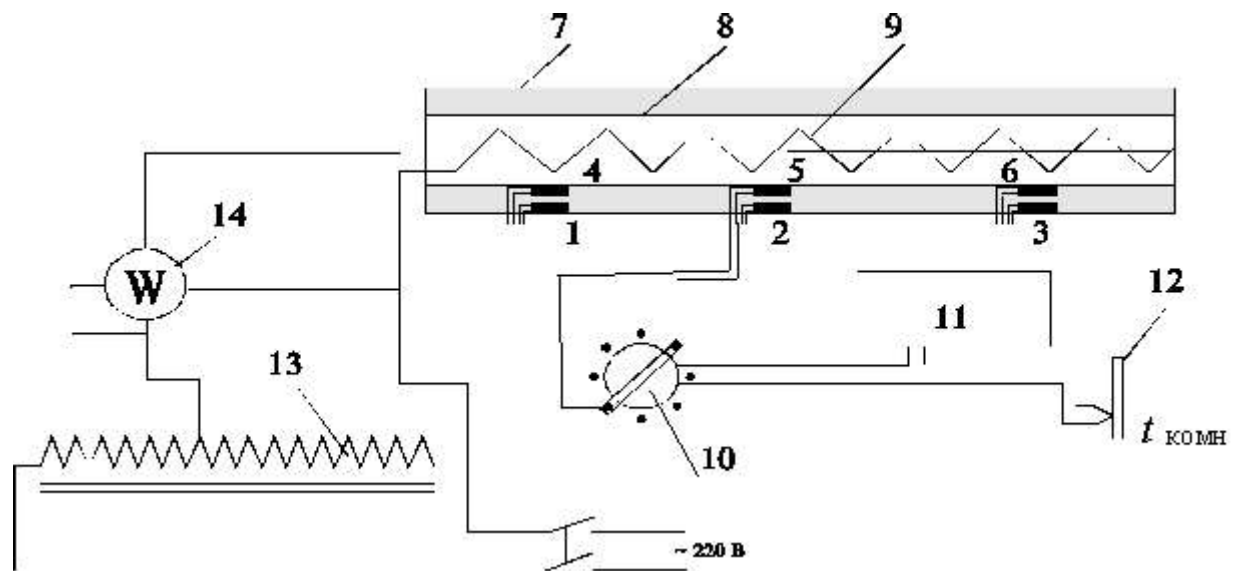


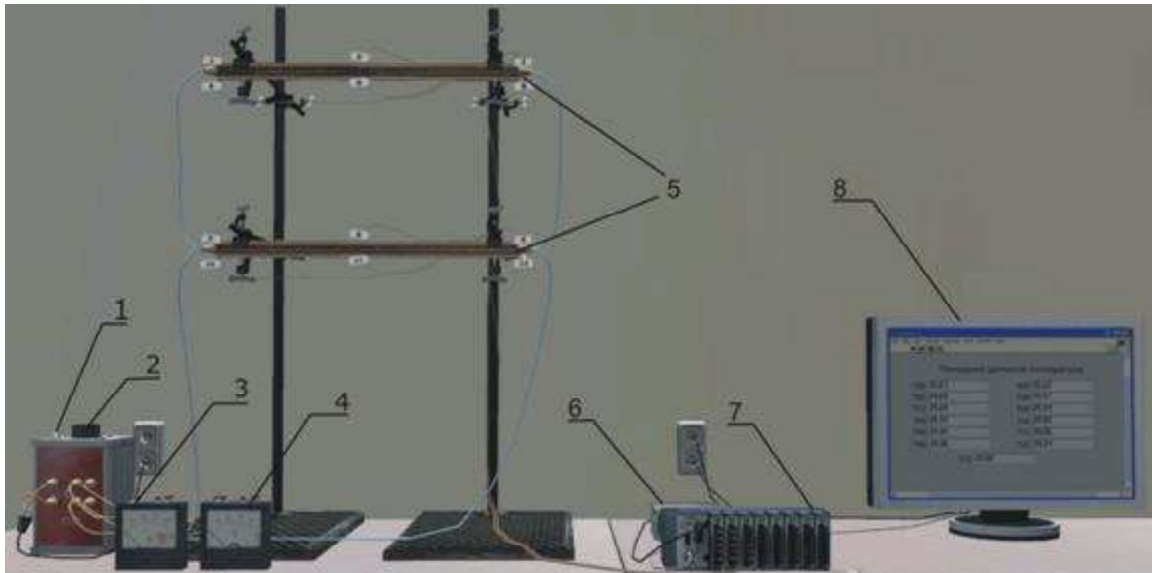
Рисунок 1.15 - Схема лабораторної установки

Експериментальна установка, схема якої зображена на рис. 1.16, призначена для вимірювання коефіцієнтів теплопровідності двох різних матеріалів. Вона містить два випробувальних елементи, які відрізняються лише за матеріалом випробуваної ізоляції. Далі буде описано пристрій одного з цих елементів (див. рис. 1.17).

Цей елемент складається з мідної труби (1) зовнішнім діаметром  $d_1=12$  мм і довжиною  $L=350$  мм, на яку нанесено шар випробуваної ізоляції (2) діаметром  $d_2=24$  мм. У середині труби знаходиться спіраль (3), через яку пропускається

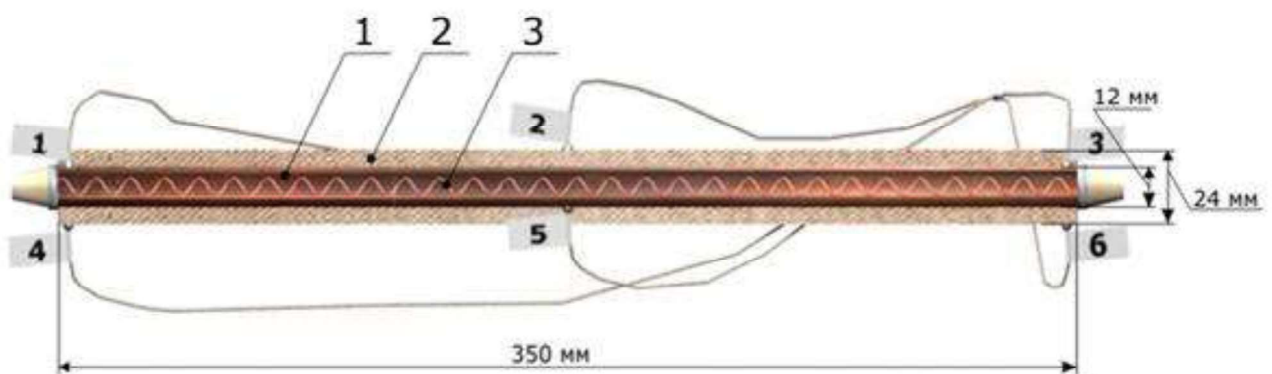
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

електричний струм, що служить джерелом тепла. Все тепло  $Q$ , що виділяється, передається через циліндричну поверхню випробуваної ізоляції. Величина  $Q$  визначається на підставі показів вольтметра та амперметра.



- 1 - тумблер включення / виключення реостата; 2 - реле-регулятор; 3 - амперметр; 4 - вольтметр; 5 - випробувальні елементи пристрою з термопарами;  
 6 - блок живлення; 7 - контролер CompactRIO + модулі MIO 9481;  
 8 - промисловий монітор

Рисунок 1.16 - Лабораторна установка:



- 1 - мідна труба; 2 - шар ізоляції, що випробовується; 3 - нагрівальний елемент (спіраль)

Рисунок 1.17 - Схема елемента установки:

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
35

Основним компонентом установки, зображеної на рис. 1.18, є вимірювальна ділянка. Вона складається з металевої циліндричної труби (1), на яку нанесено шар матеріалу, що досліджується, з постійною товщиною. Всередині цієї труби розташований електричний нагрівач (3) з рівномірно розподіленими витками по всій довжині, що забезпечує сталу щільність теплового потоку. Також передбачено тепловий захист (4) для торцевих поверхонь.

Електрорушійна сила (ЕРС) термопар вимірюється за допомогою вольтметра (6) постійного струму типу В7-38 через механічний перемикач (7) термопар. Нагрівач живиться від регульованого джерела живлення (5) типу ТЕС 14. Споживана потужність електричним нагрівачем визначається на підставі величини струму в ланцюзі нагрівача і величини падіння напруги на ньому.

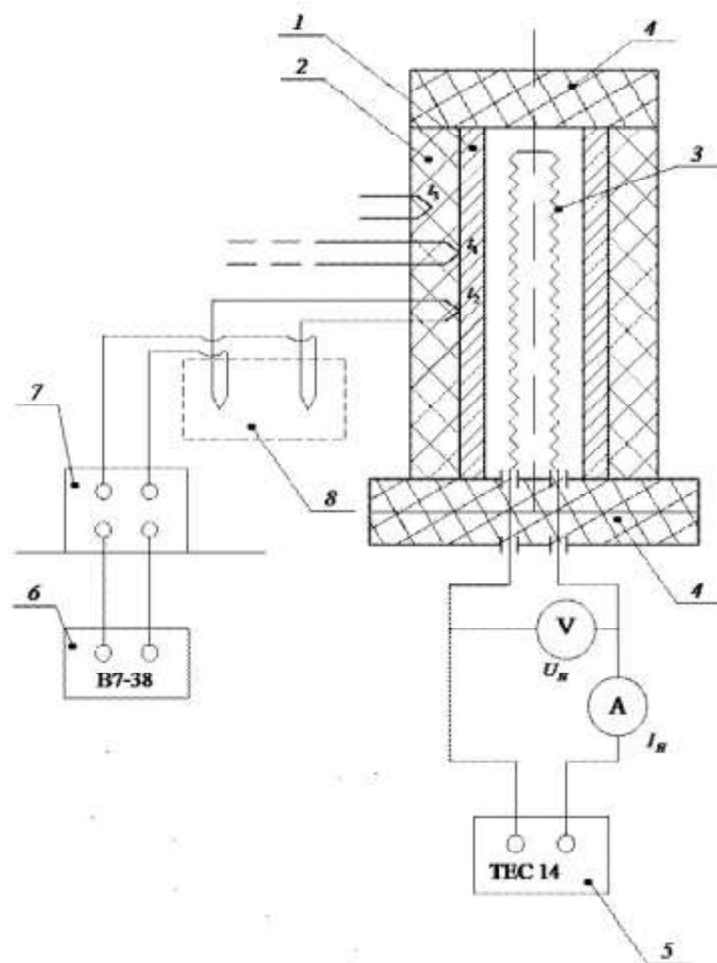


Рисунок 1.18 - Лабораторна установка

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

У представленій установці (рис. 1.19), теплоізоляційний матеріал (1) встановлено як циліндричний шар навколо зовнішньої поверхні металевої труби (2). Довжина цього циліндричного шару теплоізоляції становить 1 метр, що є значно більшим за його зовнішній діаметр.

Електричний нагрівач (3) використовується як джерело теплового потоку і підключений до електричного ланцюга через автотрансформатор (4), який дозволяє регулювати потужність електронагрівача і, відповідно, величину теплового потоку. Для визначення потужності тепловиділення використовуються вольтметр (5) і амперметр (6).

Для фіксації температур на внутрішній та зовнішній поверхнях теплоізоляції в установці використовуються хромель-копелеві термомпари (7 і 8). Ці термомпари підключаються до вторинних приладів, якими є потенціометри (9 і 10), для точного вимірювання температур.

Після того, як установка досягне стаціонарного режиму, проводять всі необхідні вимірювання, результати яких заносяться до протоколу спостережень. Стаціонарність режиму визначається на основі стабільності температурних показників протягом певного періоду часу.

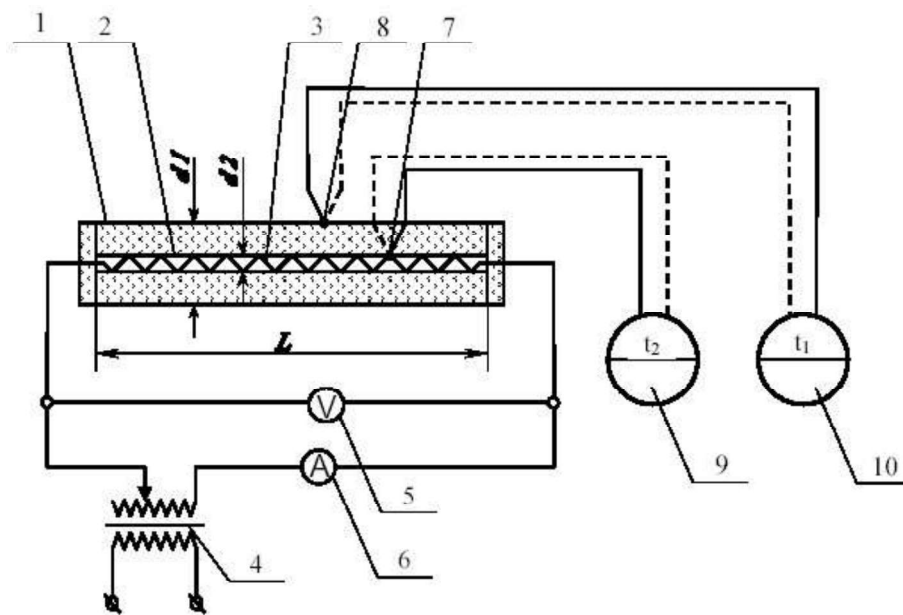


Рисунок 1.19 - Схема лабораторної установки

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

#### 1.4 Висновки до першого розділу

В даному розділі здійснено огляд та аналіз технологічних процесів та технічних рішень з тематики магістерської роботи. Наведено основні поняття теорії теплопровідності. Описана ефективність теплоізоляційних матеріалів. Розглянуто обладнання для визначення коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом труби.

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						38
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## 2 АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ МАТЕРІАЛІВ

### 2.1 Визначення температурного градієнту

Процес необоротної передачі теплоти в просторі, де існує неоднорідний розподіл температур, відомий як теплообмін. Зазвичай цей процес супроводжується зміною температури, яка відбувається як у просторовому, так і в часовому аспектах. Набір значень температури  $t$  для всіх точок простору в певний момент часу  $\tau$  становить температурне поле.

$$t = f(x, y, z, \tau) \quad (2.1)$$

Рівняння (2.1) - це математичний вираз температурного поля. Основні характеристики стаціонарних і нестаціонарних температурних полів:

Стаціонарне температурне поле не змінюється з часом, тобто температурний розподіл у просторі залишається однаковим.

Нестаціонарне температурне поле, на відміну від стаціонарного, характеризується зміною температури у часі.

Ізотермічна поверхня - це геометричне місце точок із однаковою температурою. Ці поверхні не перетинаються і можуть бути або замкнутими всередині тіла, або обмеженими його зовнішніми границями.

Коли площа перетинає ізотермічні поверхні, утворюються ізотерми - лінії однакової температури. Найбільша зміна температури на одиницю довжини відбувається у напрямку нормалі до ізотермічної поверхні (рис.1.1). Це зростання температури в напрямку до ізотермічної поверхні описується через градієнт температур.

Температурний градієнт - це вектор, який спрямований по нормалі до ізотермічної поверхні у сторону зростання температури і чисельно дорівнює

грани відношення зміни температури  $\Delta t$  до відстані між ізотермами по нормалі  $\Delta n$ :

$$\text{grad } t = \lim_{\Delta n \rightarrow 0} \left( \frac{\Delta t}{\Delta n} \right) = \frac{\partial t}{\partial n}, \text{ К/М} \quad (2.2)$$

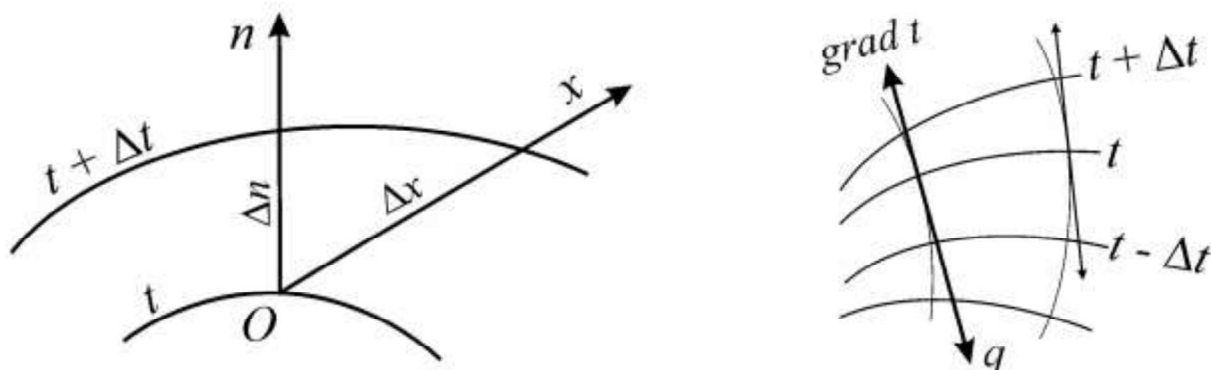


Рисунок 2.1 – Температурний градієнт

Кількість теплоти  $Q_\tau$ , яка проходить за одиницю часу через ізотермічну поверхню, відома як тепловий потік, і вимірюється у ватах  $Q$  (Вт). Щільність теплового потоку – це тепловий потік, що проходить через одиницю площі ізотермічної поверхні. Вона характеризує інтенсивність теплопередачі через дану поверхню і вимірюється у ватах на квадратний метр (Вт/м<sup>2</sup>).

$$q = \frac{\delta Q}{dF d\tau} \quad (2.3)$$

Передача теплоти дійсно відбувається кількома основними способами, і серед них ви правильно виокремили три основні форми: теплопровідність, конвекція, та теплове випромінювання.

Теплопровідність - це процес передачі теплової енергії від більш нагрітих частин тіла до менш нагрітих через безпосереднє мікроскопічне взаємодію

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

частинок речовини (атомів, молекул, іонів). Цей процес відбувається в твердих тілах, рідинах і газах і не супроводжується переміщенням речовини у цілому.

Конвекція - це процес передачі теплової енергії за допомогою масового переміщення частинок середовища (рідини або газу) з однієї області з певною температурою в іншу. При конвекції теплообмін тісно пов'язаний із фізичним переміщенням самого середовища.

Теплове випромінювання - це передача теплової енергії у формі електромагнітних хвиль. При цьому процесі внутрішня енергія одного тіла перетворюється на енергію випромінювання, яка потім поширюється у просторі і перетворюється назад у внутрішню енергію іншого тіла.

Щодо механізму теплопровідності, він справді залежить від фізичного стану тіла. У металах основним механізмом переносу теплової енергії є дифузія вільних електронів, тоді як у рідинах та твердих діелектриках перенос відбувається через безпосередню передачу теплового руху від молекул і атомів до сусідніх часток.

В газах теплопровідність відбувається через обмін енергією між молекулами, які мають різну швидкість теплового руху. Цей обмін енергією відбувається переважно через зіткнення молекул і атомів, що спричиняє їх дифузію.

Фур'є, дійсно, вивчав явище теплопровідності і встановив, що кількість переданої теплоти прямо пропорційна градієнту температури, часу та площі перетину, який перпендикулярний до напрямку поширення теплоти:

$$Q = -\lambda \cdot \text{grad} t \cdot F \quad (2.4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К).

Для щільності теплового потоку закон Фур'є має вигляд:

$$\bar{q} = -\lambda \cdot \text{grad} t \quad (2.5)$$

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						41
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Знак “–” у законі Фур'є дійсно вказує на те, що вектори теплового потоку та градієнта температури спрямовані у протилежні сторони. Це означає, що тепло переходить від більш нагрітої частини до менш нагрітої.

Коефіцієнт теплопровідності  $k$  визначає кількість теплоти, яка передається через одиницю площі ізотермічної поверхні за одиницю часу при одиничному температурному градієнті. Цей коефіцієнт  $\lambda$  є мірою здатності речовини передавати теплову енергію.

Значення коефіцієнтів теплопровідності різних матеріалів зазвичай вимірюються в одиницях  $\lambda = 0,006 \dots 420 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , що дозволяє оцінити їх теплопровідні властивості.

Що стосується практичних задач з теплообміну, вони дійсно зазвичай зводяться до обчислення теплового потоку або визначення температурного поля. У випадку відсутності внутрішніх джерел теплоти для визначення температурного поля використовується диференціальне рівняння теплопровідності. Це рівняння дозволяє описати розподіл температур у різних матеріалах та конструкціях, наприклад, у циліндричній одношаровій стінці:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{qv}{c\rho} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

де  $a = \frac{\lambda}{c_p \rho}$  - коефіцієнт температуропровідності, що характеризує швидкість

зміни температури в тілі,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\rho$  - густина,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$c$  - питома масова ізобарна теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$\nabla^2 t$  - оператор Лапласа.

У циліндричних координатах рівняння (2.6) прийме вигляд:

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						42
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (2.7)$$

де  $r$  – радіус-вектор;

$z$  – вертикальна координата;

$\varphi$  – кут нахилу радіуса-вектора.

Для стаціонарного температурного поля в одно шаровій циліндричній стінці  $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ ,  $\frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} = 0$ ,  $\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} = 0$  при  $\lambda = idem$  диференціальне рівняння теплопровідності набуде вигляду:

$$\frac{d^2 t}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dt}{dr} = 0 \quad (2.8)$$

Для знаходження диференціального рівняння (2.8) було введено нову змінну:

$$u = \frac{dt}{dr}$$

Тоді рівняння (2.8) можна записати у вигляді:

$$\frac{dt}{dr} + \frac{u}{r} = 0 \quad (2.9)$$

Після інтегрування диференційного рівняння (2.9) було отримано:

$$\ln u + \ln r = \ln C_1 \quad (2.10)$$

Потенціюючи вираз (2.10) і переходячи до початкової змінної  $t$ , одержано:

$$dt = C_1 \frac{dr}{r} \quad (2.11)$$

Рівняння стаціонарного температурного поля у циліндричній одношаровій стінці було одержано після інтегрування виразу (2.11):

$$t = C_1 \ln r + C_2 \quad (2.12)$$

Постійні інтегрування  $C_1$  і  $C_2$  було визначено з граничних умов I роду:

$$r = r_1 \quad t = t_{c1}; \quad r = r_2 \quad t = t_{c2}; \quad (2.13)$$

$$t_{c1} = C_1 \ln r_1 + C_2, \quad t_{c2} = C_1 \ln r_2 + C_2. \quad (2.14)$$

Розв'язок рівнянь (2.12) дозволив знайти постійні інтегрування:

$$C_1 = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}}, \quad C_2 = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln r_1}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (2.15)$$

Після підставлення отриманих значень  $C_1$  і  $C_2$  в рівняння (2.12), остаточно було отримано рівняння одномірного стаціонарного температурного поля у циліндричній одношаровій стінці (рис.2.2):

$$t = t_{c1} - (t_{c1} - t_{c2}) \frac{\ln \frac{r}{r_2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \quad (2.16)$$

де  $r_1, r_2$  – внутрішній і зовнішній радіуси;

$t_{c1}, t_{c2}$  – температури на внутрішній і зовнішній поверхнях циліндричної стінки;

$r$  – поточний радіус ( $r_1 \leq r \leq r_2$ ).

Наведений вираз температурного поля представляє собою рівняння логарифмічної кривої.

Температурний градієнт із співвідношень (2.11) і (2.15) було визначено таким чином:

$$\text{grad}t = \frac{\partial t}{\partial r} = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\ln \frac{r_1}{r_2}} \frac{1}{r} \quad (2.17)$$

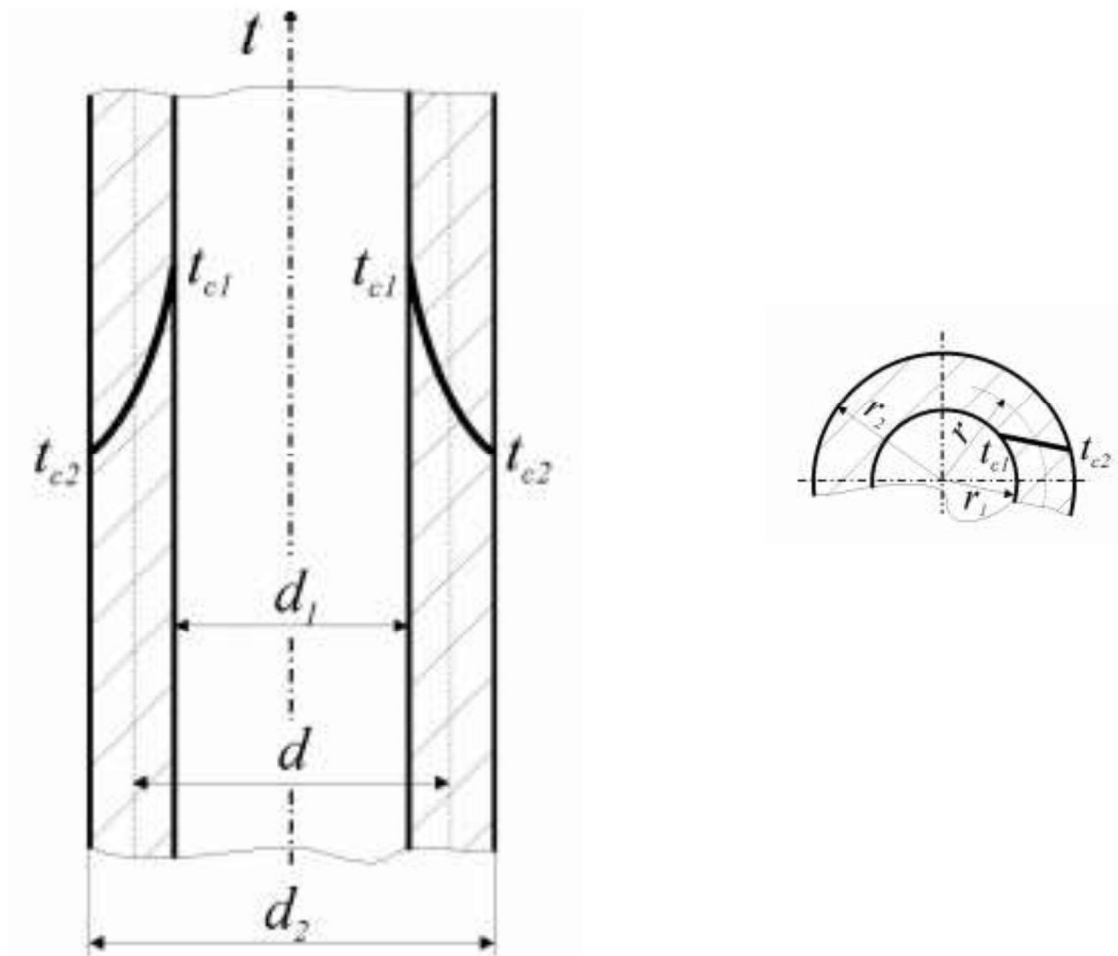


Рисунок 2.2 – Стационарне температурне поле в циліндричній одношаровій стінці

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

## 2.2 Визначення кількості теплової енергії, яка проходить через циліндричну стінку

Кількість теплової енергії, яка проходить через циліндричну стінку з одного шару завдяки теплопровідності, можна обчислити, використовуючи закон Фур'є. Цей розрахунок включає в себе врахування температурного градієнта (2.17) та площі поверхні  $F = 2\pi rl$ , через яку відбувається теплообмін.

$$Q = \frac{2\pi l \lambda (t_{c1} - t_{c2})}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{\pi \lambda (t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (2.18)$$

Тепловий потік, віднесений до одиниці довжини циліндричної стінки  $l$ , називається лінійною щільністю теплового потоку:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \frac{\pi (t_{c1} - t_{c2})}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \quad (2.19)$$

Значення теплового потоку  $Q$  та лінійної щільності теплового потоку  $q_l$  у часі і по товщині стінки не змінюються.

Формули для визначення теплового потоку (2.18) і лінійного теплового потоку (2.19) можна написати у вигляді:

$$Q = \frac{\pi (t_{c1} - t_{c2})}{R_l}, \quad q_l = \frac{\pi (t_{c1} - t_{c2})}{R_l} \quad (2.20)$$

де  $R = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$ ,  $R_l = \frac{R}{l}$  - повний і питомий лінійний термічний опори теплової провідності одно шарової циліндричної стінки.

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Зі співвідношень (2.20) видно, що при стаціонарній теплопровідності перепад температур на циліндричній стінці прямо пропорційний термічному опорі і зворотно пропорційний величині коефіцієнта теплопровідності.

Експериментальне визначення коефіцієнта теплопровідності.

Існують стаціонарні і нестаціонарні методи експериментального визначення коефіцієнта теплопровідності. Одним з розповсюджених серед стаціонарних методів є – «метод труби». За цим методом коефіцієнт теплопровідності досліджуваного матеріалу визначається відповідно до формули (2.18):

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi l(t_{c1} - t_{c2})} \quad (2.21)$$

Отже, для визначення коефіцієнта теплопровідності матеріалу необхідно забезпечити умови стаціонарного теплового потоку, а також провести вимірювання його величини. Поряд з цим, потрібно виміряти температури на обох поверхнях циліндричної стінки (або труби) та знати геометричні параметри досліджуваного зразка.

### 2.3 Висновки до другого розділу

В даному розділі здійснюється аналітичне дослідження коефіцієнту теплопровідності матеріалів. Проводиться визначення температурного градієнту. Описується визначення кількості теплової енергії, яка проходить через циліндричну стінку

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						47
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

### 3 РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ УТЕПЛЮВАЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

#### 3.1 Розробка конструкції установки для дослідження коефіцієнту теплопровідності

##### 3.1.1 Розробка конструкції нагрівальної частини установки для визначення коефіцієнту теплопровідності

Для забезпечення теплом установки, призначеної для вимірювання коефіцієнта теплопровідності, була розроблена конструкція нагрівального сегмента (згідно з рис. 3.1). Основу конструкції становить циліндрична нержавіюча труба. З одного боку труба герметично закрита за допомогою завареної заглушки, тоді як з протилежного боку встановлено нагрівальний елемент (ТЕН) із певною потужністю у кВт. На корпусі труби встановлено запобіжний клапан (див. рис. 3.2), який необхідний для контролю над тиском води всередині труби, особливо при її розширенні. Усередині труби розташована вода. Додатково до труби приварено фланець, який використовується для кріплення труби на каркасі установки.

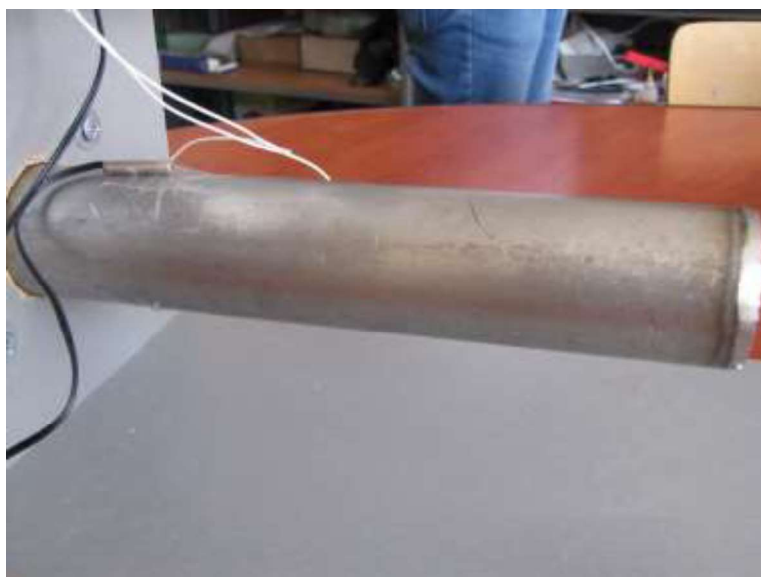


Рисунок 3.1 – Нагрівальна частина установки для визначення коефіцієнту теплопровідності



Рисунок 3.2 – Запобіжний клапан в нагрівальній частині стенду

### 3.1.2 Розробка каркасу установки

Конструкція каркасу установки була зроблена з деревно-стружкової плити (ДСП) товщиною 18 мм. Елементи ДСП потрібних розмірів були з'єднані між собою за допомогою конфірматів. Для захисту країв ДСП від вбирання вологи та уникнення розшарування на торці плити було наклеєно захисну стрічку. Також у вертикальній частині каркасу з ДСП було зроблено отвір для монтажу нагрівального елемента установки.



Рисунок 3.3 – Каркас установки

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
49

### 3.1.3 Закріплення нагрівальної частини установки на каркасі

Нагрівальна частина, яка була спроектована для установки, була надійно закріплена на каркасі за допомогою чотирьох болтів (див. рис. 3.4). Фланець цієї частини був приєднаний до каркасу також за допомогою болтів. Для цих цілей були використані болти розміром М8 із довжиною 65 мм.



Рисунок 3.4 – Кріплення нагрівальної частини на установці

## 3.2 Розробка блоку електронного керування температурою нагрівального елемента установки

### 3.2.1 Загальні відомості про терморегулятор температури та приклад її практичного використання

Для ефективного регулювання температури було розроблено багато пристроїв. Ці пристрої самі по собі є корисними, але їхній потенціал значно підвищується завдяки системам управління, які забезпечують більшу економічність у використанні - це терморегулятори або термостати. Хоча терморегулятори та

термостати фактично є різними за своєю функціональністю та конструкцією, у повсякденному вжитку ці терміни часто використовуються як взаємозамінні, тому ми теж використовуватимемо їх таким чином.

Терморегулятор – це пристрій, який використовується для моніторингу та підтримки стабільної температури в заданому діапазоні. Його можна застосовувати у різноманітних системах, включаючи конвектори, котли, інфрачервоні обігрівачі, кабельні системи опалення, інкубатори та інші. Деякі прилади, наприклад електричні конвектори, вже оснащені вбудованими терморегуляторами. Економічна ефективність використання терморегулятора полягає в тому, що він активує опалювальний пристрій лише тоді, коли температура в приміщенні нижча за задану, і вимикає його, коли бажана температура досягнута. Враховуючи, що кожен градус зміни температури може впливати на споживання електроенергії на 5-6%, адекватне управління опаленням може забезпечити економію до 30%. Часто ми не контролюємо температуру в приміщеннях, перегрівуючи їх. Якщо, наприклад, ви виходите з дому, немає необхідності підтримувати високу температуру, і зниження на 5 градусів може призвести до значної економії. Контроль температури та витрат електроенергії може бути легко досягнутий за допомогою терморегулятора. Такий підхід може бути також корисним для регулювання температури нагрівальних елементів в лабораторній установці, яка використовується для визначення коефіцієнта теплопровідності.

На сучасному ринку можна знайти широкий асортимент терморегуляторів, від простих механічних до складних програмованих електронних моделей. Програмовані термостати, зазвичай оснащені цифровими дисплеями, пропонують кілька стандартних програм, які користувачі можуть адаптувати для своїх потреб. Електронні програмовані термостати дозволяють не лише підтримувати задану температуру, але й автоматично змінювати її відповідно до заданого або самостійно розробленого алгоритму. Вони можуть знижувати температуру, коли ви виходите на роботу чи навчання, та підвищувати її перед вашим поверненням додому. Якщо використовувати багатотарифні лічильники електроенергії, такі

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

термостати можуть включати опалювальні прилади тільки в періоди з найнижчими тарифами. Електронні терморегулятори також характеризуються вищою точністю, що сприяє більшій економії енергії.

3.2.2 Вибір терморегулятора температури для лабораторної установки, що розробляється

Для лабораторної установки було обрано розумний цифровий LED-термостат, який є продуктом китайського виробництва від компанії OEM. Такий вибір забезпечує точне регулювання температури, необхідне для точних експериментів та вимірювань, проведених за допомогою цієї установки.

Даний термостат регулятор представлений на рис.3.5, 3.6.

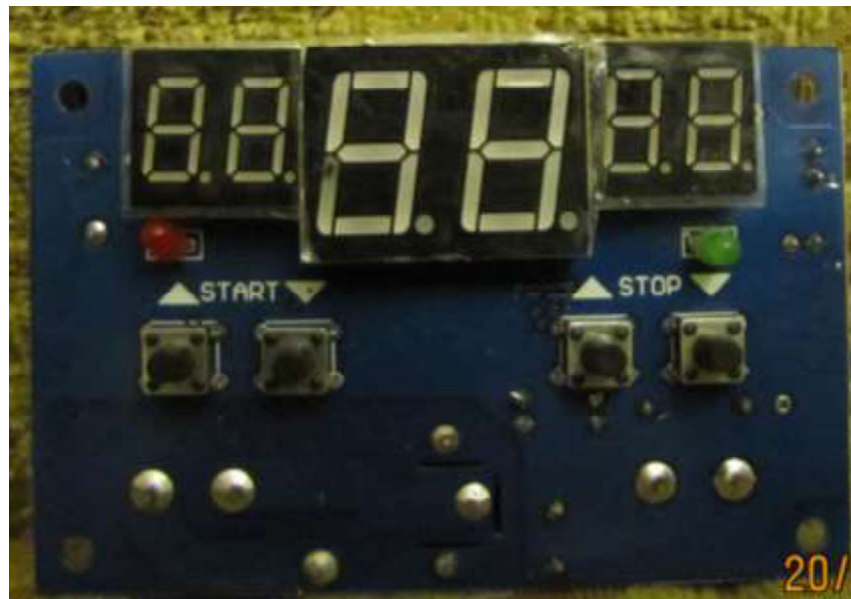


Рисунок 3.5 - Інтелектуальний цифровий світло діодний термостат (зовнішня сторона)

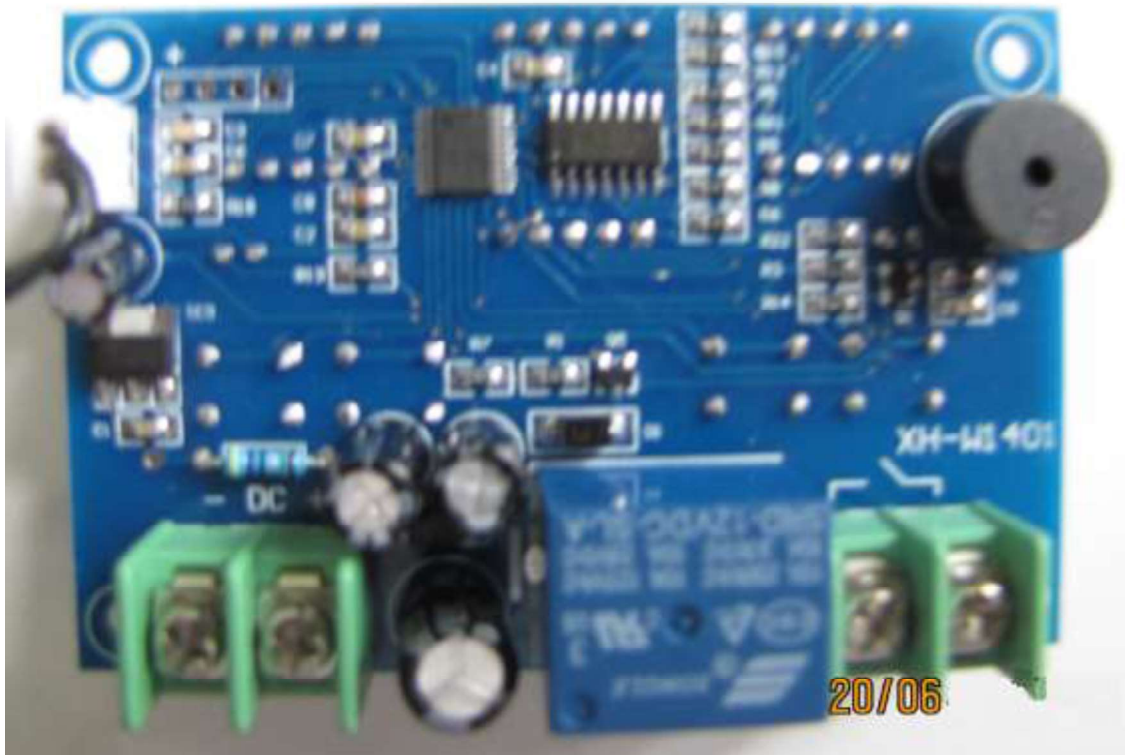


Рисунок 3.6 - Інтелектуальний цифровий світло діодний термостат  
(внутрішня сторона)

Технічні характеристики пристрою.

1. Якість вимірювання - висока.
2. Температурний діапазон: 9 - 99 °С.
3. Точність керування: 1 °С.
4. Точність регулювання: 1 °С.
5. Частота оновлення: 0,5 с.
6. Діапазон налаштування: 9- 99 °С.
7. Напруга живлення: 15V постійного струму.
8. Датчик температури: NTC (3950-10, похибка вимірювання до 1%).
9. Вихід: релейний вихід, ємність 220 В 10А / 12 В 10А.
10. Розмір плати: 7,8 см x 5,1 см x 3 см.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.

53

Світлодіодні (LED) та рідкокристалічні індикатори є ключовими компонентами в сучасних терморегуляторах, які дозволяють зручно відслідковувати та регулювати робочі параметри.

Червоний індикатор запуску вказує на активний режим роботи пристрою. Коли червоний світлодіод горить, це означає, що реле замкнуто і пристрій починає свою роботу.

Зелений стоп-сигнал інформує про відключення реле та зупинку пристрою. Коли зелене світло вмикається, це свідчить про те, що пристрій перестає працювати.

Центральний червоний світлодіодний дисплей відображає поточну температуру. Ліворуч розташований зелений цифровий дисплей, що показує задану стартову температуру, а праворуч - зелений цифровий дисплей для відображення температури зупинки пристрою.

Кнопки регулювання дозволяють налаштувати стартову температуру та температуру зупинки. За допомогою цих кнопок можна легко змінити температурні налаштування вгору або вниз відповідно до потреб користувача.

### 3.2.3 Опис датчика температури, що використовується в терморегуляторі

#### 3.2.3.1 Загальні відомості про датчики температури

Існує багато типів датчиків температури, кожен з яких базується на певних фізичних властивостях матеріалів. Ось основні типи:

- резистивні детектори температури. Ці датчики працюють на принципі зміни електричного опору дроту або плівки (зазвичай з платини) при зміні температури. Платина є популярним вибором через її стабільність та точність, але також можуть бути використані й інші метали;

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

- термістори (терморезистори). Ці датчики також вимірюють температуру через зміну електричного опору, але вони виготовляються з напівпровідникових матеріалів, що робить їх дуже чутливими до невеликих змін температури;

- термоелектричні датчики (термопари). Термопари вимірюють температуру, використовуючи термоелектричний ефект, який виникає на стику двох різних металів. Коли одне з'єднання нагрівається, воно виробляє електричний струм, що може бути виміряний та перетворений у показник температури.

- інтегральні датчики температури. Ці датчики містять не тільки чутливий елемент, але й інтегровану схему, яка перетворює сигнал датчика. Вони зазвичай пропонують цифровий вихід та можуть включати додаткові функції, такі як самодіагностика чи цифрове відображення.

Резистивні температурні перетворювачі (РТП), хоч і мають низьку чутливість та повільну динамічну реакцію через свої конструктивні особливості, є важливими у вимірюванні температури. Ці перетворювачі часто виявляються вразливими до вібрацій та ударів, що може призвести до їх виходу з ладу.

Існують два головних типи платинових РТП:

- зонди, які занурюються в середовище: Ці перетворювачі занурюються безпосередньо в середовище, температуру якого необхідно виміряти;

- чуттєві елементи, які монтується на поверхні: Вони призначені для монтажу на поверхні об'єктів.

Дротові елементи зазвичай монтується на керамічній основі з мінімальним натягом і покриваються захисним матеріалом, що захищає їх від впливу навколишнього середовища.

Плівкові РТП, в яких використовується металева фольга, розміщена на ізолюючій підкладці, не так поширені, але вони знаходять все більше застосувань через свої малі розміри, поліпшену динамічну відповідь, вищу чутливість і порівняно низьку вартість.

Платинові резистивні температурні перетворювачі (ПРТП) часто інтегрують у одне з плечей моста Уїнстона, що дозволяє досягти високої точності вимірювань. Однак низький опір таких перетворювачів (близько 100 Ом) створює певні труднощі при їх підключенні до вимірювального обладнання, оскільки опір з'єднувальних проводів може бути порівняно великим та впливати на точність вимірювань.

Термістори, які є напівпровідниковими резистивними приладами, відрізняються зміною опору в залежності від температури. Вони зазвичай мають зворотній температурний коефіцієнт, тобто їх опір знижується при зростанні температури. Термістори використовуються в діапазоні температур від  $-50$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ , але за допомогою спеціальних інтерфейсних рішень можна розширити цей діапазон. Основною проблемою термісторів є їх висока нелінійність характеристик, яка обмежує температурний діапазон їх застосування (рис.3.6).

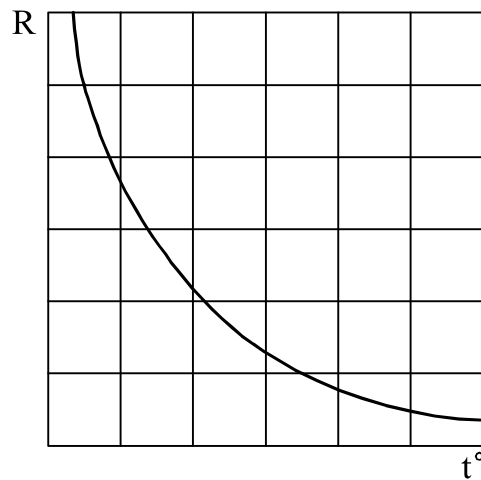


Рисунок 3.6 – Температурна характеристика терморезистора

Термістори, які є особливим типом терморезисторів, виготовляються зі спеціальних напівпровідникових матеріалів і можуть приймати різноманітні форми, такі як кульки, диски, стержні чи шайби. Ці елементи зазвичай розміщуються у захисних капсулах, які можуть бути виготовлені зі скла, пластику, або металу. Малі розміри чуттєвих елементів термісторів забезпечують їм швидку

реакцію, причому деякі мініатюрні моделі можуть мати динамічну відповідь навіть у кілька мікросекунд.

Терморезистори можуть бути класифіковані за їхнім призначенням на кілька категорій:

- термометри опору. Ці пристрої мають широке застосування для вимірювання температури;
- термокомпенсатори. Використовуються для компенсації температурних змін у електронній апаратурі;
- терморезистори для теплового контролю. Ці пристрої застосовуються в системах контролю температури з високою точністю ( $\pm 0,5$  °C) та для сигналізації на основі релейного ефекту;
- вимірювальні терморезистори. Використовуються для вимірювання потужності випромінювання.

Серед різноманітних типів термісторів особливо поширення отримали зондові та базові чуттєві елементи. За своєю конструкцією вони схожі на стандартні резистори, але відрізняються тим, що їх матеріали чутливі до змін температури. Термістори зазвичай не вимагають складного налаштування інтерфейсних схем через їх широкі допуски. Деякі моделі термісторів можуть мати точність близько  $\pm 0,2$ °C у певному температурному діапазоні, але для досягнення такої точності може бути потрібне спеціальне калібрування.

Термопари працюють на принципі термоелектричного ефекту, коли два різнорідні матеріали з'єднані разом. Коли ці два з'єднання перебувають при різних температурах, в ланцюзі між ними виникає електричний струм.

Термопари, як правило, виготовляються у формі зонда, але через необхідність мати спай з двох матеріалів, вони також можуть бути виготовлені як первинні вимірювальні перетворювачі з двома дротиками з термопарних матеріалів, спаяними разом на тонкому кінці. З'єднання здійснюється методом зварювання, пайки твердим припоєм або пайки срібним припоєм.

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						57
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Кінчик спаяних дротиків терморпар може бути розміщений або всередині зонда, або безпосередньо у середовищі, температура якого вимірюється. Існують варіанти з заземленими та незаземленими спаями, які можуть бути захищені кожухом або залишатися відкритими. Інший тип конструкції терморпар включає спай з фольги, розміщеної на підкладці. Фольга може бути магнітною, що дозволяє легко прикріплювати її до феромагнітних поверхонь для вимірювання їхньої температури.

Терморпар є міцними та економічними, забезпечуючи достатню точність, яка базується на еталонних температурних значеннях. Завдяки малому розміру чуттєвого елемента, вони мають хороші динамічні характеристики та придатні для використання у широкому діапазоні температур.

Транзистори також змінюють свої характеристики залежно від температури, що дозволяє застосовувати їх для вимірювання температури. Однак верхня межа температур, які вони можуть вимірювати, обмежується струмом витоку напівпровідникових переходів, і вони зазвичай використовуються для вимірювання температур у діапазоні від -50 до +150 °С.

Останнім часом інтегральні датчики температури здобули широке поширення завдяки своїм компактним розмірам, високій точності та зручності використання.

Інтегральні датчики температури використовують як чуттєві елементи напівпровідникові р-п переходи (емітерні переходи транзисторів) та напівпровідникові терморезистори. Ці датчики можна класифікувати за типом вихідного сигналу та характером їхнього підключення:

- двополюсні датчики: джерела струму, як-от AD590/592 від Analog Devices, де джерело живлення підключається безпосередньо до вихідних виводів, джерела напруги, як-от LM135/235/335 від National Semiconductor;
- датчики з роздільними виводами для живлення та вихідного сигналу, які поділяються за видом перетворення та характеристиками вихідного сигналу;

- з аналоговим потенційним виходом, наприклад, AD22100/103 від Analog Devices та LM60 від National Semiconductor;
- з виходом імпульсно-модульованого в часі сигналу, наприклад, ТМРО3/04 від Analog Devices;
- з виходом цифрового сигналу, як ADT33 від Analog Devices та LM75 від National Semiconductor.

Ці датчики можуть використовуватися у широкому спектрі застосувань завдяки їх точності, компактності та гнучкості у використанні.

### 3.2.3.2 Вибір датчика температури для терморегулятора

Датчик температури NTC (Negative Temperature Coefficient), відомий також як термістор, - це напівпровідниковий резистор, чий опір змінюється залежно від температури. Характеристики таких датчиків включають номінальний опір, температурний коефіцієнт опору та температурний діапазон.

NTC термістори зазвичай використовуються в котельному обладнанні, де вони можуть бути зануреними або накладними, функціонуючи для систем опалення та гарячого водопостачання. Вони вимірюють температуру в системі та подають сигнал на плату управління котла.

Датчики NTC містять термістор всередині, який змінює свій опір в залежності від коливань температури. Електронна плата котла аналізує ці дані та відповідно регулює роботу обладнання.

Однак існують певні проблеми з датчиками NTC, зокрема вони не захищені від утворення накипу чи відкладення мінералів на їх поверхні, що може впливати на їх чутливість та точність вимірювань.

Термін служби цих датчиків залежить від умов їх експлуатації, особливо від умов теплообміну та середовища, в якому вони розташовані. Серед провідних виробників температурних датчиків можна відзначити такі компанії, як Sit, Bitron, Honeywell і Grundfos.

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						59
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

Конструкція даного датчика представлена на рис.3.7.



Рисунок 3.7 - Датчики температури NTC

### 3.2.4 Розробка корпусу для розміщення плати терморегулятора

Обрано пластиковий корпус для встановлення плати терморегулятора, який використовується для з'єднання кабелів (див. рисунок 3.8). У цьому корпусі були виготовлені спеціальні вирізи для розміщення рідкокристалічних дисплеїв, світлодіодів та кнопок управління. Кріплення плати всередині корпусу здійснено за допомогою гвинтів розміром M2.



Рисунок 3.8 – Терморегулятор в корпусі

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
60

### 3.3 Висновки до третього розділу

В даному розділі проводиться розробка установки для визначення теплопровідності утеплювальних матеріалів. Здійснюється розробка конструкції установки для дослідження коефіцієнту теплопровідності. Проводиться розробка блоку електронного керування температурою нагрівального елемента установки.

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						61
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

# 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЕНТУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ УТЕПЛЮЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ

## 4.1 Розробка блоку вимірювання температури

### 4.1.1 Загальні відомості про вимірювальну систему для дослідження обладнання

На рисунку 4.1 представлено структурну схему лабораторної установки, призначеної для дослідження різних видів технологічного обладнання, розробленої кафедрою машин та апаратів. Установка включає наступні компоненти: аналогові датчики, модулі для узгодження сигналів, блок узгодження сигналів, плату для збору інформації, а також електронно-обчислювальну машину. Для аналізу результатів експериментів використовується програмне забезпечення LabVIEW, яке дозволяє створювати різноманітні графічні залежності та візуалізації.

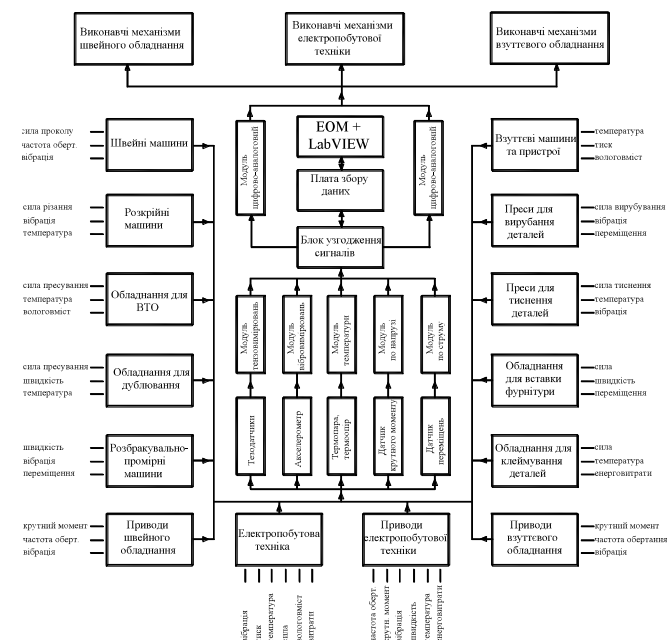


Рисунок 4.1 - Структурна схема лабораторної установки для дослідження різного технологічного обладнання

На рис.4.2 представлено схему вимірювальної системи експериментальної установки.

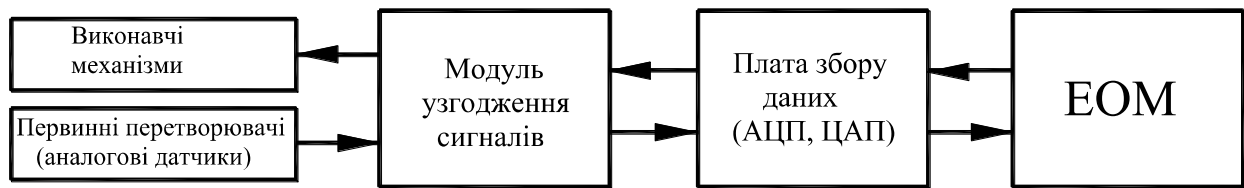


Рисунок 4.2 – Схема вимірювальної системи експериментальної установки

#### 4.1.2 Підбір датчиків для вимірювання температури

Для вимірювання температури було обрано датчик температури серії КТУ81-2. Ці датчики мають позитивний температурний коефіцієнт опору (РТС), що робить їх ідеальними для застосування у вимірювальних пристроях, а також у системах контролю та управління. Для захисту та надійного використання датчики розміщені в спеціально освинцьованому пластиковому корпусі, як зображено на рис.4.3.

Технічні характеристики:

- опір, відповідні нижньому порогу - 1980 Ом (при 1 мА);
- нижній поріг вимірюваної температури - 55 °С;
- опір, відповідні верхнього порогу - 2020 Ом (при 1 мА);
- верхній поріг вимірюваної температури - 150 °С;
- максимальна сила струму на виході - 10 мА;
- теплова постійна часу - 30 с на відкритому повітрі;
- температурний коефіцієнт - 0,79;
- похибка –  $\pm 3,02$  °С.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



Рисунок 4.3 - Датчик температури КТУ81-2

#### 4.1.3 Вибір та опис модуля узгодження сигналів

Аналогові модулі розроблені для узгодження сигналів від різноманітних вимірювальних пристроїв, включаючи термопари, термометри опору, акселерометри, тензодатчики, а також для ізольованого аналогового вводу, вводу струму в діапазоні 0-20 мА та високої напруги. Загальний зовнішній вигляд аналогового модуля можна побачити на рисунку 4.4. Технічні характеристики аналогових модулів детально описані в таблиці 4.1. Ці модулі є ключовими компонентами для точного зчитування даних в лабораторних та промислових умовах.



Рисунок 4.4 – Загальний вигляд аналогового модуля

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
64

Таблиця 4.1 - Технічні характеристики аналогових модулів

№ п/п	Модуль	Канали	Функції	Типи/ діапа- зони сигнала- лів	Ізоляція
1	2	3	4	5	6
1	SCC-AI0x	2 ISO	Ізольований підсилювач	Від $\pm 50$ мВ до $\pm 42$ В	300 В еф. напр.
2	SCC-AI1x	2 ISO	Ізольований підсилювач	$\pm 5$ В, $\pm 10$ В	300 В еф. напр.
3	SCC-AI0	2 DI	Атеннюатор	$\pm 100$ В	250 В еф. напр.
4	SCC-LP01	2 DI	Фільтр низь- ких частот	$\pm 10$ В, 25 Гц	—
5	SCC-LP02	2 DI	Фільтр низь- ких частот	$\pm 10$ В, 50 Гц	—
6	SCC-LP03	2 DI	Фільтр низь- ких частот	$\pm 10$ В, 150 Гц	—
7	SCC-LP04	2 DI	Фільтр низь- ких частот	$\pm 10$ В, 1000 Гц	—
8	SCC-FV04	2 DI	Перетворювач частота- напруга	0-100 Гц	—
9	SCC-TC01	1 DI	Термопарний підсилювач	Термопари, $\pm 100$ мВ	—
10	SCC-TC02	1 DI	Термопарний підсилювач	Термопари, $\pm 100$ мВ	—
11	SCC-RTD01	2 DI	Термоопір	Термоопір,	—

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

MPMA23.00.00.000 ПЗ

Арк.

65

				±400 мВ, за- питування 1 мА	
12	SCC-SG01	2 DI	Мостова схема (1/4-моста, 120 Ом)	±100 мВ, те- нзодатчики, датчики си- ли, моменти і т.п.	—
13	SCC-SG02	2 DI	Мостова схема (1/4-моста, 350 Ом)	±100 мВ, те- нзодатчики, датчики си- ли, моменти і т.п.	—
14	SCC-SG03	2 DI	Мостова схема (1/2-моста)	±100 мВ, те- нзодатчики, датчики си- ли, моменти і т.п.	—
15	SCC-SG04	2 DI	Мостова схема (повний міст)	±100 мВ, те- нзодатчики, датчики си- ли, моменти і т.п.	—
16	SCC-SG11	2 DI	Калібровка шунта модулів SCC-SGxx	—	—
17	SCC-SG24	2 DI	Мостова схе- ма (повний	±100 мВ, да- тчики тиску,	—

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.

66



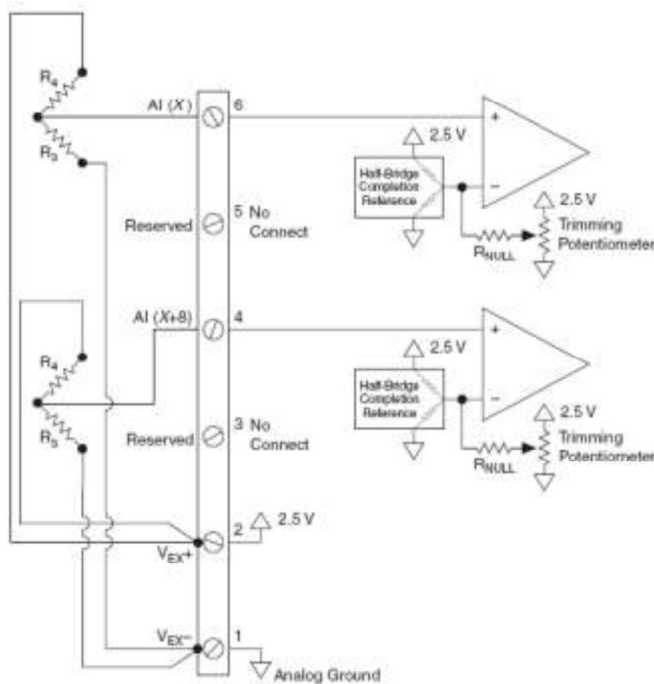


Рисунок 4.5 - Електрична схема модуля SCC-RTD01

При виборі модулів узгодження сигналів для вимірювальних систем враховуються такі фактори, як швидкість збору даних, типи сигналів (датчиків), а також кількість каналів. У цьому контексті модулі узгодження сигналів SCC від компанії National Instruments виявляються оптимальним рішенням.

SCC - це гнучка система, що підходить для узгодження сигналів у системах з невеликою кількістю каналів. Ця система сумісна з пристроями збору даних М-серії та базовими пристроями.

SCC дозволяє налаштувати кожен канал вводу/виводу окремо, використовуючи одно- та двохканальні модулі, які можна розмістити в компактному екранованому корпусі. Таке рішення забезпечує високу гнучкість конфігурації та зручність у використанні.

Загальний вигляд блоку узгодження сигналів SCC-68, який використовується в цій системі, можна побачити на рисунку 4.6.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



Рисунок 4.6 - Загальний вигляд блока узгодження сигналів SCC-68

Монтажна схема блоку наведена на рис.4.7.

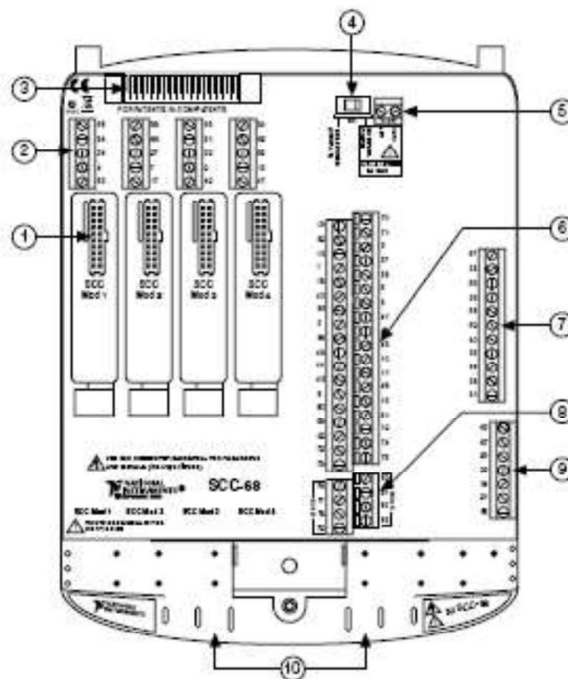


Рисунок 4.7 - Монтажна схема блоку узгодження сигналів SCC-68

Електрична схема блоку узгодження сигналів SCC-68 показана на рис.4.8.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата



Загальний вигляд плати NI PCI-6251 представлено на рис.4.9.

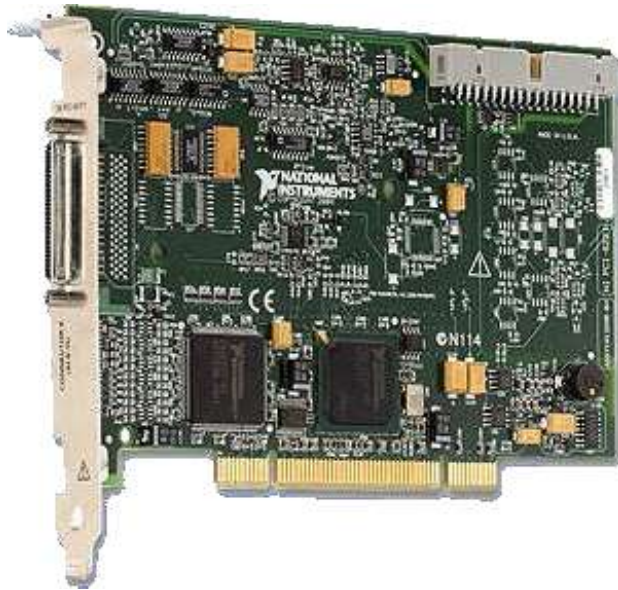


Рисунок 4.9 - Загальний вигляд плати NI PCI-6251

Функціональна схема плати зображена на рис.4.10.

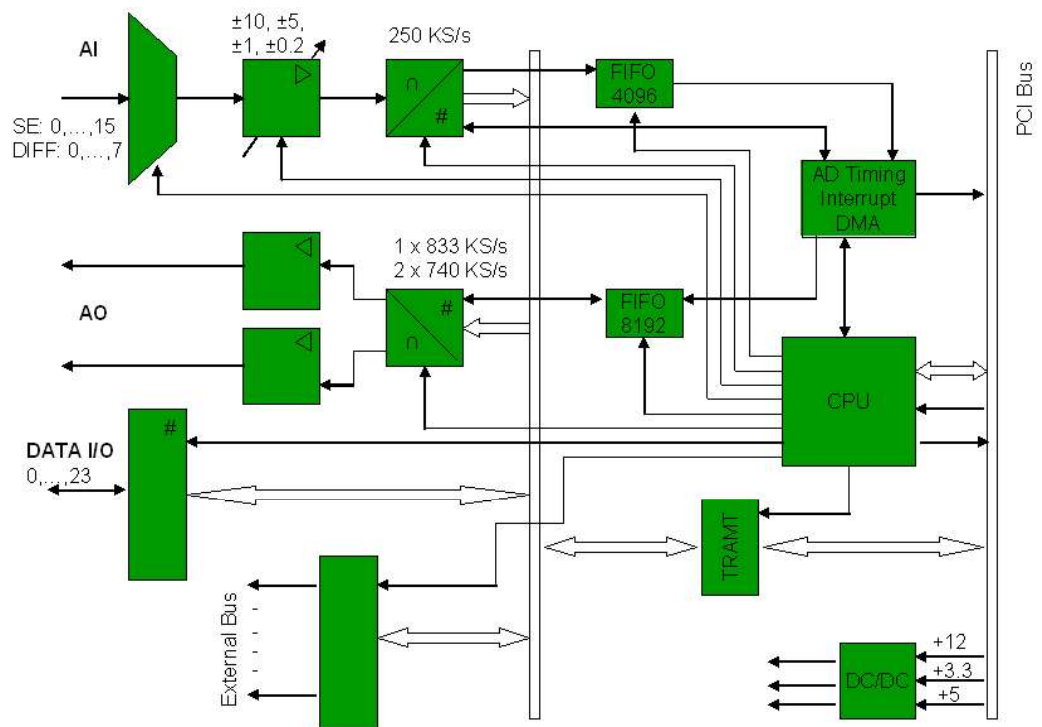


Рисунок 4.10 - Функціональна схема плати NI PCI-6251

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

Загальні характеристики плати NI PCI-6251 наведені в табл.4.2.

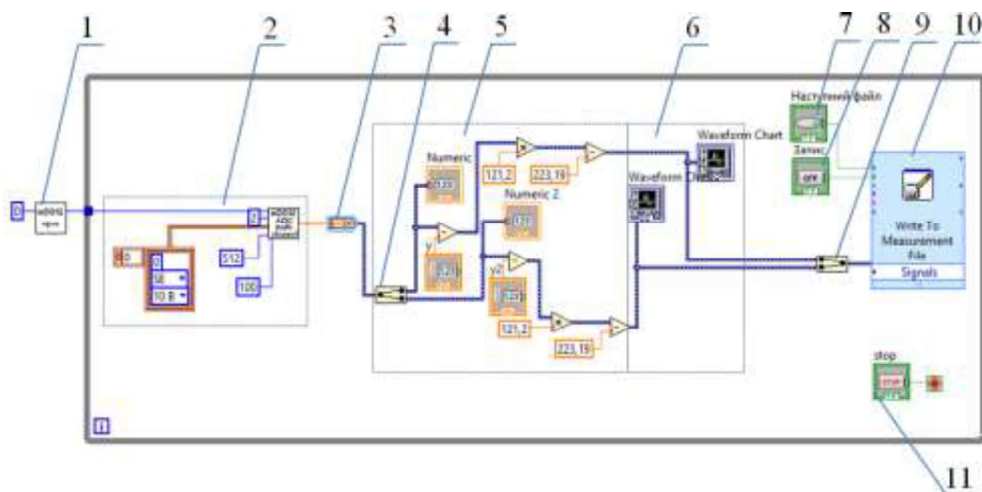
Таблиця 4.2 - Загальні характеристики плати NI PCI-6251

№ п/п	Параметр	Величина
1	2	3
1	Шина	PCI
2	Аналогові входи	16
3	Вхідне розрішення	16 біт
4	Частота оцифрування сигналів	1,25 МГц
5	Макс. вхідний діапазон	±10 В
6	Число вхідних діапазонів	7
7	Аналогові виходи	два 16-біт (833 кО/с)
8	Максимальна частота роботи ЦАП	2,8 МГц
9	Вихідне розрішення ЦАП	16 біт
10	Цифрові канали	24
11	Корельований цифровий ввід/вивід	8 ліній по 10 МГц
12	Влаштоване узгодження	фільтрів немає
13	Загальне узгодження сигналів	70
14	Кількість лічильників, розрішення, частота	2, 32, 80

#### 4.2 Розробка блок-діаграми віртуального приладу в середовищі LabView

Для реєстрації та аналізу даних температури на циліндричному корпусі нагрівального елемента та температури на поверхні утеплювального матеріалу була розроблена блок-діаграма віртуального приладу в програмному середовищі LabView. Ця блок-діаграма є представлена на рисунку 4.11.

Лицьова панель віртуального приладу в середовищі LabView приведена на рис.4.12.



- 1 – елемент управління портом аналогово-цифрового перетворювача (АЦП);
- 2 – блок керування потоками даних з АЦП;
- 3 – елемент перетворення масиву значень в сигнал, що оброблюється;
- 4 – елемент розділення сигналу на окремі потоки;
- 5 – блок тарування сигналу;
- 6 – блок виведення сигналу на графічні індикатори;
- 7, 8 – кнопка керування записом в файл;
- 9 – елемент об'єднання оброблених потоків сигналу в один;
- 10 – блок запису даних в файл;
- 11 – кнопка зупинки виконання програми

Рисунок 4.11 - Блок-діаграма віртуального приладу в програмному середовищі LabView

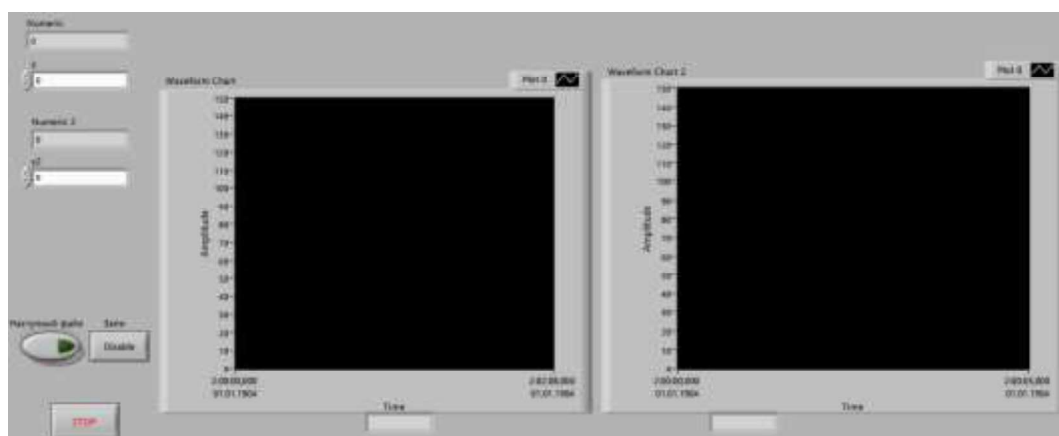


Рисунок 4.12 - Лицьова панель віртуального приладу в програмному середовищі LabView

Програма, розроблена для обробки та візуалізації даних, працює за наступним алгоритмом:

1. Відкриття Порту. На першому етапі програма ініціює свою роботу, відкриваючи комунікаційний порт через модуль 1. Це критично важливо для забезпечення зв'язку між програмним забезпеченням та фізичними компонентами системи.

2. Конфігурація АЦП: Після відкриття порту, отримана інформація передається до блоку управління потоками даних з аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) 2. На цьому етапі користувач має можливість налаштувати параметри АЦП, такі як кількість каналів для зчитування даних, частоту зчитування даних та обсяг даних, що виводяться як масив з модуля 6.

3. Перетворення і Обробка Даних: Надалі масив даних, отриманих з АЦП, обробляється в спеціалізованому елементі перетворення. Цей процес включає перетворення зібраного масиву значень в більш зручний для обробки потік даних.

4. Візуалізація та Запис: Отриманий потік даних далі виводиться на графічні індикатори блоку 6 для візуального відображення. Це дозволяє користувачам відстежувати результати вимірювань у зручній формі. Крім того, дані можна записувати для подальшого детального аналізу за допомогою блоку 9.

Цей процес демонструє, як програма ефективно здійснює збір, обробку, візуалізацію та зберігання вимірюваних даних, використовуючи для цього різні функції та компоненти програмного забезпечення LabView.

Програма, що працює з даними з двох незалежних каналів, використовує наступний процес обробки:

1. Розділення Даних на Потоки. Оскільки дані надходять з двох різних каналів, вони спочатку розділяються на два окремі потоки. Це виконується за допомогою елемента 4, що дозволяє ізолювати дані кожного каналу для окремої обробки.

2. Тарування Даних. Кожен з розділених потоків даних потім проходить через процес тарування в блоці 5. Тарування включає в себе арифметичні перетворення з використанням відповідних коефіцієнтів тарування. Через арифметичну операцію віднімання відбувається калібрування сигналу до нульового значення.

3. Візуалізація Даних. Після проведення необхідних перетворень, оброблені сигнали знову об'єднуються в один потік за допомогою елемента 9. Цей єдиний потік даних потім виводиться на графічні індикатори для візуалізації.

4. Запис Даних. Отримані дані можуть бути записані для подальшого аналізу за допомогою блоку 10, який управляється кнопками 7 та 8. Цей блок відповідає за зберігання даних у файл.

5. Зупинка Програми. Для зупинки виконання програми використовується кнопка 11. Це дозволяє користувачу контролювати процес збору даних і при необхідності зупиняти його.

Ця програма демонструє гнучкий і ефективний підхід до збору, обробки, візуалізації та зберігання даних з різних джерел у середовищі LabView.

#### 4.3 Вибір обладнання для вимірювання струму, напруги та потужності споживання установки

Обрано цифровий ватметр TS-836 А від компанії OEM (Китай) для здійснення вимірювань струму, напруги та визначення споживаної електричної потужності. Зовнішній вигляд цього ватметра можна побачити на ілюстрації 4.13.

Даний ватметр має наступні характеристики.

1. Діапазон вимірювання струму 0...15 А.
2. Діапазон вимірювання напруги 0...999 В.
3. Габаритні розміри 155x70x45 мм.



Рисунок 4.13 – Цифровий ватметр TS-836А

#### 4.4 Опис лабораторного стану для визначення коефіцієнту теплопровідності

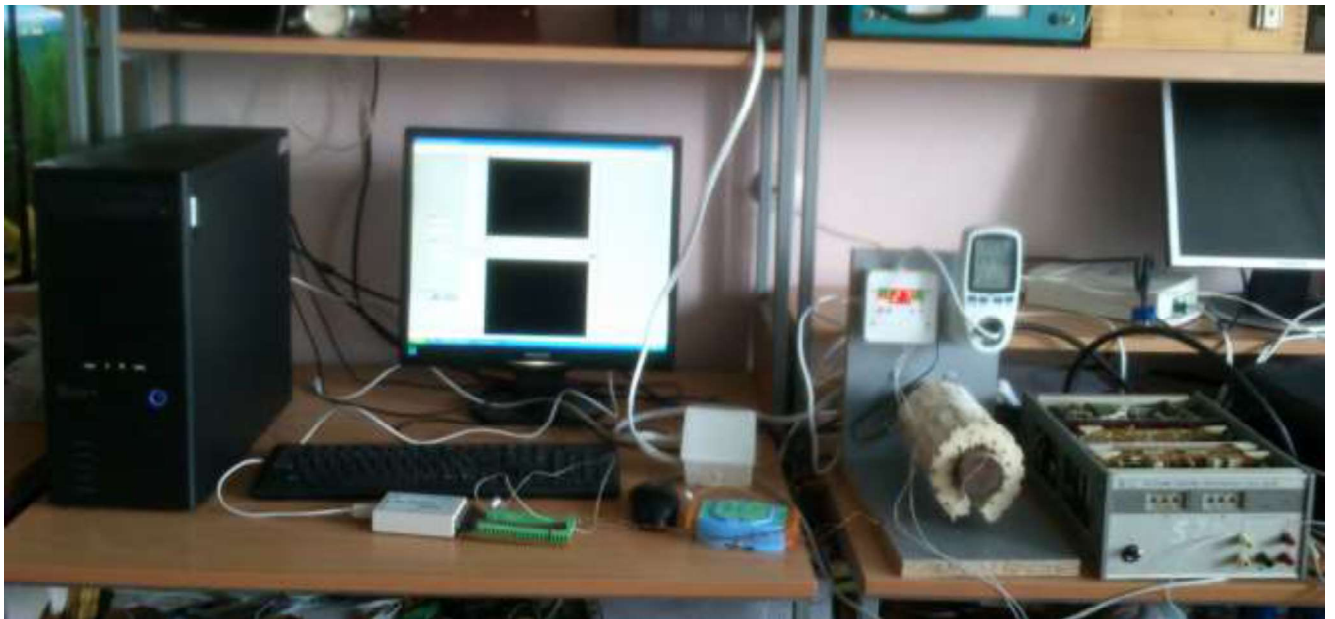
Для проведення досліджень по визначенню теплопровідності утеплюючих матеріалів розроблено лабораторний стан, який наведено на рис.4.14.

Лабораторний стан для визначення теплопровідності утеплюючих матеріалів складається з чотирьох основних частин: 1) установка для вимірювання коефіцієнту теплопровідності; 2) комп'ютер з платою АЦП для обробки даних; 3) блок живлення; 4) блок вимірювальної апаратури.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
76



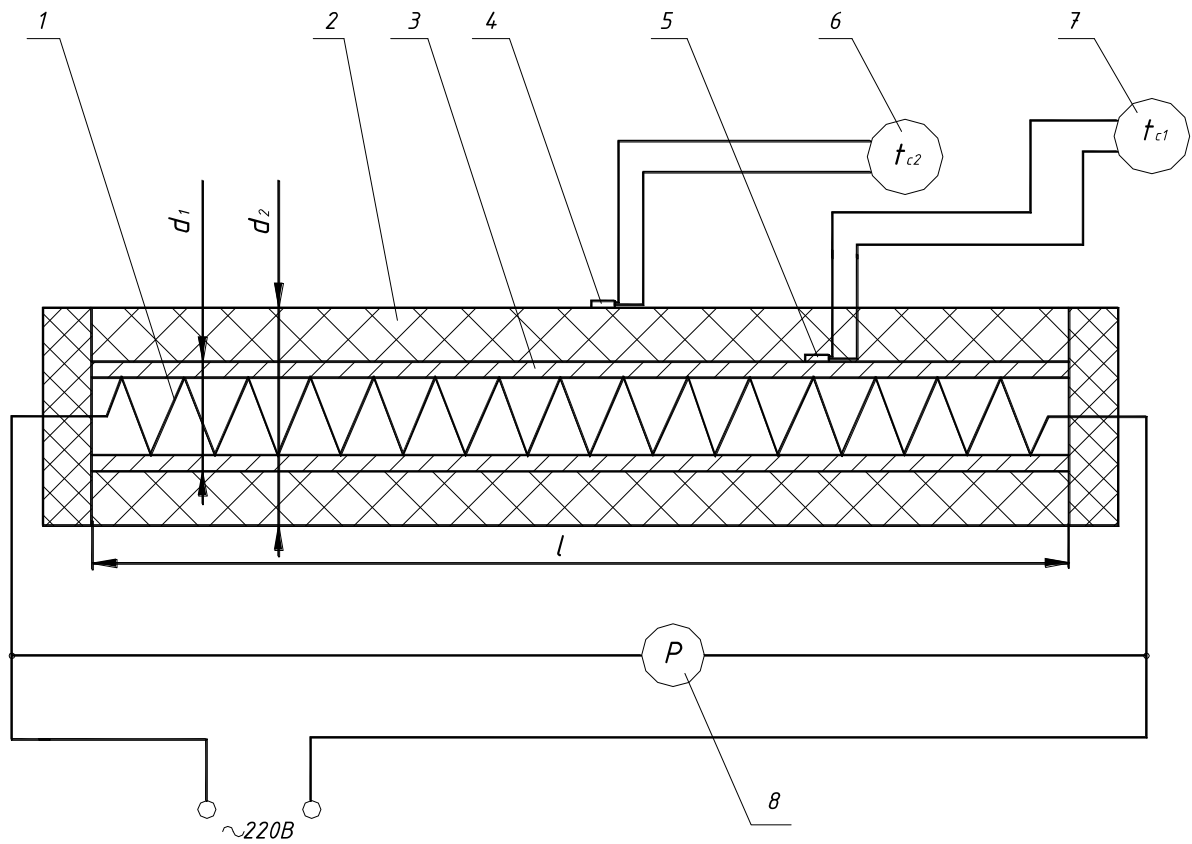
- 1 - лабораторна установка для визначення коефіцієнту теплопровідності,  
 2 - компютер з встановленою платою АЦП,  
 3 - блок живлення, 4 - блок вимірювальної апаратури

Рисунок 4.14 - Лабораторний стенд для дослідження теплопровідності  
 утеплюючих матеріалів:

На рисунку 4.15 зображено схему установки для визначення коефіцієнта теплопровідності, яка складається з досліджуваного матеріалу (1), циліндричної труби (2), ТЕНа (3), датчиків температури (4, 5), приладів для вимірювання температури (6, 7) та ватметра (8).

#### 4.5 Вибір та підготовка зразків для проведення лабораторних досліджень

Для дослідження коефіцієнта теплопровідності різних утеплюючих матеріалів було обрано кілька зразків, які представлені на рисунку 4.16. Ці матеріали мають визначену товщину та щільність і були сформовані у вигляді циліндрів, зовнішній діаметр яких відповідає внутрішньому діаметру нагрівального циліндра. Довжина кожного зразка була вибрана так, щоб вона відповідала робочій довжині нагрівального циліндра.



1 – матеріал, що досліджується; 2-циліндрична труба; 3-ТЕН; 4, 5 - датчики температури; 6, 7 – температура, яка вимірюється; 8 - ватметр

Рисунок 4.15 – Схема установки для встановлення коефіцієнта теплопровідності методом труби:

Фото отриманих зразків матеріалів для досліджень показані на рис.4.17 – 4.20.

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

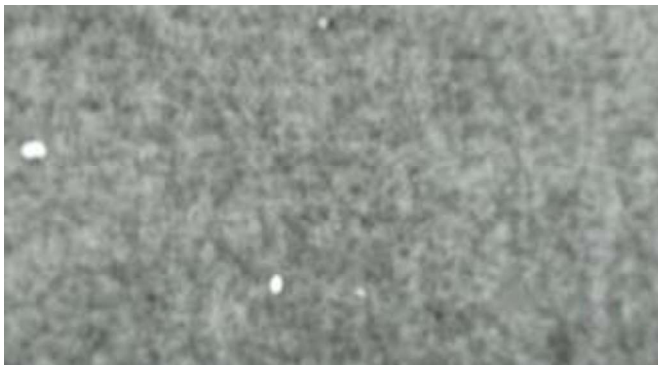
Арк.  
78



а



б



в



г

а – синтепон; б – поролон; в – войлок; г – поліізоць

Рисунок 4.16 – Зразки матеріалів для проведення експерименту



Рисунок 4.17 – Зразок із синтепону

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
79



Рисунок 4.18 – Зразок із поролону



Рисунок 4.19 – Зразок із войлока

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
80



Рисунок 3.20 – Зразок з поліізолі

#### 4.6 Опис методики експериментальних досліджень

Методика проведення експериментальних досліджень коефіцієнта теплопровідності утеплюючих матеріалів полягає у наступному: підготовлений зразок матеріалу з відомою товщиною і щільністю розміщується на нагрівальному циліндрі. Для вимірювання температури використовуються два датчики: один розміщується між нагрівальним циліндром та матеріалом, а другий - на зовнішній оболонці зразка матеріалу. Розташування цих датчиків температури можна побачити на фотографії, представленій на рисунку 4.21.



Рисунок 4.21 – Розміщення датчиків температури на установці

Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата

МРМА23.00.00.000 ПЗ

Арк.  
81

Для вимірювання теплопровідності матеріалів установка включається в мережу, ТЕН нагріває рідину в нагрівальному циліндрі, передаючи тепло матеріалу через трубу. На терморегуляторі задаються температурні межі і включається ватметр. Проводяться виміри температур кожні 5 хвилин до досягнення стаціонарного режиму, після чого виконуються необхідні виміри та розрахунки для визначення коефіцієнта теплопровідності.

#### 4.7 Підготовка протоколу експериментальних досліджень

Для фіксування визначених величин було розроблено таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Результати експериментальних досліджень

№ п/п	Величина, що вимірюється		Значення
1	Матеріал		
2	Довжина зразка $l$ , мм		
3	Діаметр циліндричної труби $d_1$ , мм		
	Діаметр зразка $d_2$ , мм		
2	Сила струму $I$ , А		
3	Напруга $U$ , В		
4	Температура на поверхні матеріалу	Всередині $t_{c1}$ , °С	
5		Ззовні $t_{c2}$ , °С	
6	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) визначений експериментально		
7	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) в довідковій літературі		
8	Похибка вимірювання, %		

#### 4.8 Результати експериментальних досліджень

Під час експериментальних досліджень було зібрано дані, необхідні для розрахунку коефіцієнта теплопровідності розглянутих матеріалів. Результати цих досліджень були внесені до таблиць 4.4-4.7. Використовуючи формулу 2.21, був розрахований коефіцієнт теплопровідності для досліджуваних матеріалів.

Таблиця 4.4 – Результати експериментальних досліджень для зразка із войлока

№ п/п	Величина, що вимірюється		Значення
1	Матеріал, що досліджується		Войлок
2	Довжина зразка $l$ , мм		0,153
3	Діаметр циліндричної труби $d_1$ , мм		0,052
	Діаметр зразка $d_2$ , мм		0,106
2	Сила струму $I$ , А		6,74
3	Напруга $U$ , В		210
4	Температура на поверхні утеплювального матеріалу	Всередині $t_{c1}$ , °С	81,6
5		Ззовні $t_{c2}$ , °С	37,2
6	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) визначений експериментально		0,039
7	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) в довідковій літературі		0,045
8	Похибка вимірювання, %		15%

Таблиця 4.5 – Результати експериментальних досліджень для зразка із поліізополі

№ п/п	Величина, що вимірюється		Значення
1	Матеріал, що досліджується		Поліізол
2	Довжина зразка $l$ , мм		0,14
3	Діаметр циліндричної труби $d_1$ , мм		0,052
	Діаметр зразка $d_2$ , мм		0,072
2	Сила струму $I$ , А		6,74
3	Напруга $U$ , В		210
4	Температура на поверхні утеплюючого матеріалу	Всередині $t_{c1}$ , °С	81,6
5		Ззовні $t_{c2}$ , °С	44,89
6	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) визначений експериментально		0,033
7	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) в довідковій літературі		0,035
8	Похибка вимірювання, %		6

Таблиця 4.6 – Результати експериментальних досліджень для зразка із поролону

№ п/п	Величина, що вимірюється		Значення
1	Матеріал, що досліджується		Поролон
2	Довжина зразка $l$ , мм		0.153
3	Діаметр циліндричної труби $d_1$ , мм		0,052
	Діаметр зразка $d_2$ , мм		0,106
2	Сила струму $I$ , А		6,74

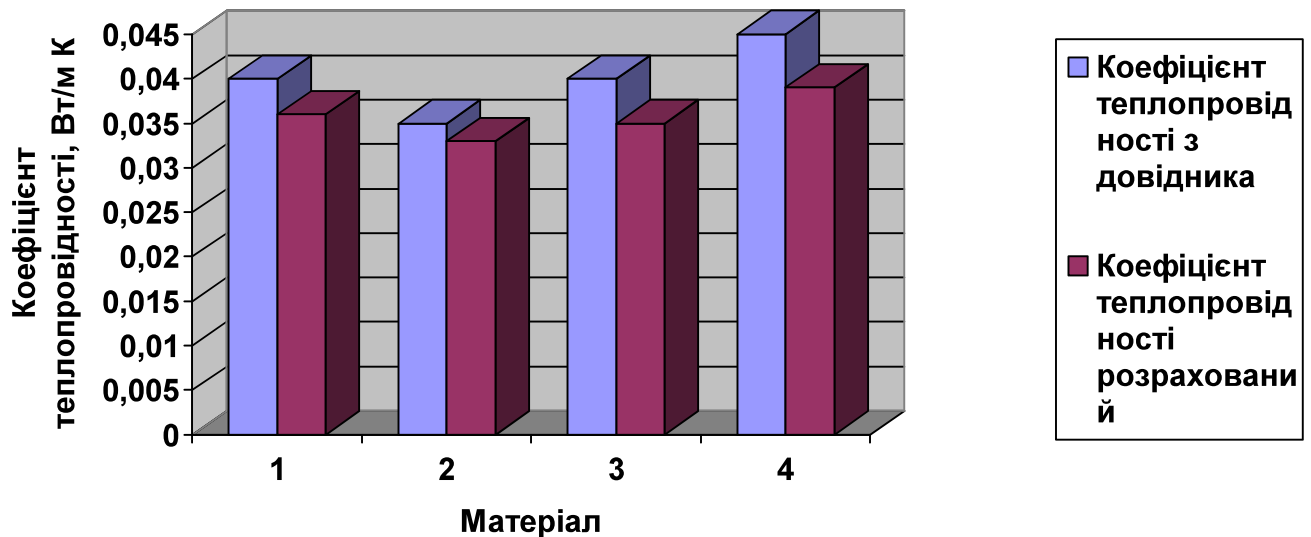
3	Напруга $U$ , В		210
4	Температура на поверхні утеплюючого матеріалу	Всередині $t_{c1}$ , $^{\circ}\text{C}$	89,87
5		Ззовні $t_{c2}$ , $^{\circ}\text{C}$	37,2
6	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ ) визначений експериментально		0,036
7	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ ) в довідковій літературі		0,04
8	Похибка вимірювання, %		11

Таблиця 4.7 – Результати експериментальних досліджень для зразка із синтепону

№ п/п	Величина, що вимірюється		Значення
1	Матеріал, що досліджується		Синтепон
2	Довжина зразка $l$ , мм		0,16
3	Діаметр циліндричної труби $d_1$ , мм		0,052
	Діаметр зразка $d_2$ , мм		0,103
2	Сила струму $I$ , А		6,74
3	Напруга $U$ , В		210
4	Температура на поверхні утеплювального матеріалу	Всередині $t_{c1}$ , $^{\circ}\text{C}$	46,67
5		Ззовні $t_{c2}$ , $^{\circ}\text{C}$	79,21
6	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ ) визначений експериментально		0,035
7	Коефіцієнт теплопровідності $\lambda$ , Вт/( $\text{m}^2\cdot\text{K}$ ) в довідковій літературі		0,04
8	Похибка вимірювання, %		14

#### 4.9 Порівняння отриманих результатів з довідниковими

З метою порівняння отриманих результатів з існуючими було побудовано гістограму, що показана на рис.4.22.



1 – поролон; 2 – поліізолю; 3 – синтепон; 4 - войлок

Рисунок 4.22 – Гістограма порівняння отриманих результатів експерименту з існуючими:

Порівняльний аналіз експериментально отриманих результатів коефіцієнта теплопровідності з довідниковими даними для досліджуваних матеріалів виявив похибку в межах 6-15%. Конкретно, для поролону похибка склала 11%, для поліізолю - 6%, для синтепону - 14%, а для волюка - 15%. З огляду на те, що отримана похибка перебуває в межах допустимих значень, можна рекомендувати дану експериментальну установку для визначення коефіцієнта теплопровідності різноманітних матеріалів.

#### 4.10 Розробка методичних вказівок до виконання лабораторної роботи.

На базі створеної експериментальної установки та розробленої математичної моделі були розроблені методичні вказівки для проведення лабораторної роботи на тему "Визначення коефіцієнта теплопровідності утеплюючих матеріалів методом труби". Ці методичні вказівки можна знайти в додатку Б.

#### 4.11 Висновки до четвертого розділу

В даному розділі здійснюється експериментальне визначення коефіцієнту теплопровідності утеплюючих матеріалів. Проводиться розробка блоку вимірювання температури, блок-діаграми віртуального приладу в середовищі LabView. Здійснюється вибір обладнання для вимірювання струму, напруги та потужності споживання установки та підготовка зразків для проведення лабораторних досліджень. Наводяться результати експериментальних даних. Здійснюється їх порівняння з довідковими.

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						87
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

В першій частині дослідження був зроблений аналіз наявних технологій та технічних підходів у контексті теми магістерської роботи. На основі цього аналізу були окреслені конкретні завдання, спрямовані на визначення коефіцієнта теплопровідності ізоляційних матеріалів.

Розроблено математичну модель, що встановлює взаємозв'язок між характеристиками експериментальної установки та властивостями ізоляційних матеріалів.

Створено експериментальний стенд для визначення коефіцієнта теплопровідності, який інтегрує в собі комп'ютерну технологію, аналогово-цифрове перетворення і програмне забезпечення LabVIEW, що сприяє підвищенню точності отриманих результатів.

Встановлено методику для оцінки коефіцієнта теплопровідності ізоляційних матеріалів.

Проведений порівняльний аналіз показав, що розбіжності між експериментально отриманими даними про коефіцієнт теплопровідності і довідковими значеннями для вивчених матеріалів коливаються від 6% до 15%. Конкретно, для поролону ця похибка складає 11%, для поліізолу – 6%, для синтепону – 14%, а для волокна – 15%. Такий розмір помилки вважається прийнятним, тому експериментальний стенд можна рекомендувати як ефективний засіб для визначення коефіцієнта теплопровідності різних утеплюючих матеріалів.

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						88
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Мигальцо І.І. Термічні процеси в швейній промисловості.- К.: Техніка, 1987. –213с.
2. А.В.Гільчук, А.А.Халатов, Т.В.Доник.- Теорія теплопровідності 2020. – 153 с.
3. А.В Гільчук, А.А Халатов — Теорія теплопровідності Частина 1. 2017.- 86 с.
4. Сьомкін С.В. Основи проектування та конструювання. – К.:Альтерпрес, 2007. – 283 с.
5. Мирончук В.Г., Орлов Л.О., Українець А.І., Пушанко М.М. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Навчальний посібник. – Вінниця: Нова книга, 2004. – 288 с.
6. Тхір І.Г., Гуменецький Т.В. Фізико-хімія полімерів: Навч. посібник – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 240 с.
7. Високомолекулярні сполуки та їх використання на транспорті і в будівництві: Метод. вказівки до самост. роботи студ. ден. та заоч. форми навч. / Уклад.: колектив авторів ХНАДУ. – Харків: ХНАДУ, 2009. – 76 с
8. Данилкович А. Г. Основні матеріали і технології виробництва шкіри: навч. посібник. Київ, 2016. – 175 с.
9. Хоменко Л.М. Обладнання швейного виробництва: Навчально-методичний посібник . –Умань: ВПЦ «Візаві», 2011. - 132 с.
10. Орловський Б.В. Технологічне обладнання галузі (швейне виробництво): навчальний посібник / Б.В.Орловський, Н.С.Абрінова.-К.: КНУТД, 2013.- 285 с.
11. О.І. Черевко, А.М. Поперечний. Процеси і апарати харчових виробництв: підручник / О. І. Черевко, А. М. Поперечний. - 2-е видання, доп. та випр. - Х.: Світ Книг, 2014. - 495 с.

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						89
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

12. Капустенський П.Г., Поліщук О.С., Лісевич С.П. Механічна технологія та обладнання легкої промисловості : конспект лекцій для студентів напрямів підготовки “Машинобудування”, “Технологія виробів легкої промисловості”, “Професійна освіта” / П. Г. Капустенський, О. С. Поліщук, С. П. Лісевич. – Хмельницький : ХНУ, 2010. – 124 с.

13. Коновал В.П., Гаркавенко С.С., Свістунова Л.Т. та ін. Універсальний довідник взуттєвика: навчальний посібник – К. : Лібра, 2006. – 720 с

14. Мікульонок І. О. Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини: монографія. – К.: ІВЦ „Видавництво «Політехніка»”, 2009. – 265 с

15. Рибаченко В.В., Коновал В.П., Хом'як М.Є., Шевченко Г.І. Матеріалознавство виробів легкої промисловості. Підручник. -К.: КНУТД, 2008. - 320 с.

16. Сучасні полімерні матеріали та їх застосування: методичні вказівки / О. Е. Марцинко. – Одеса, 2021. – 44 с.

17. Штейнберг Б.И., Брайнман Б.М. Довідник молодого інженера-конструктора / Під ред. Б.М. Брайнмана. – 2-е вид., перероб. і доп. – К.: Техніка, 1983. – 184с.

18. Навчальний посібник / І. І. Юрчишин, Я. М. Литвиняк, І. Є. Грицай, М. Л. Кукляк, Я. М. Кусий, В. В. Ступницький, В. А. Яцюк, А. М. Кук, Є. М. Махоркін, В. П. Свізінський / За ред. І. І. Юрчишина. - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. - 528 с.

19. Антонюк С. М. Світ креслення. Педагогічний програмний засіб. [Електронний ресурс] / С.М. Антонюк. – 2018. – Режим доступу: <http://kreslennja.com.ua>.

20. Малащенко В.О, Янків В.В. Деталі машин. Проектування механічних приводів: Навчальний посібник. – Львів: «Новий світ-2000», 2018. - 264с.

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						90
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

21. Горбатенко Ю.П. Деталі машин – К.: НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського», 2019. - 97 с.

22. Легка промисловість України та світу. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://surl.li/dqaар>.

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						91
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК А

					MPMA23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						92
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Б

					МРМА23.00.00.000 ПЗ	Арк.
						93
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата		