

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Є. М. Панов, Т. Б. Шилович, Я.І. Шилович

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТА

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій»
спеціальності G9 Прикладна механіка

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 621.1.016(075.8)

Автори: *Панов Євген Миколайович*, д-р техн. наук, проф.
Шилович Тетяна Борисівна, канд. техн. наук, доц.
Шилович Ярослав Ігорович, канд. техн. наук, інж.

Рецензент *Черьопкіна Р.І.*, канд. техн. наук, доц.,
каф. Е та ТРП КПІ ім. Ігоря Сікорського

Відповідальний редактор *Сокольський О. Л.*, д-р техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 9 від 26.06.2026 р.)
за поданням вченої ради факультету
(протокол № 5 від 25.05.2026 р.)*

Панов Є.М., Шилович Т.Б., Шилович Я.І.

Теоретичні основи теплотехніки. Лабораторний практикум з освітнього компонента [Електронний ресурс] : навч. посіб. здобувачів ступеня бакалавра за освіт. програмою «Інжиніринг зварювання, лазерних та споріднених технологій» спец. G9 Прикладна механіка / Є. М. Панов, Т. Б. Шилович, Я.І. Шилович ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 70 с.

В лабораторному практикуму викладено матеріали до виконання лабораторних робіт з освітнього компонента «Теоретичні основи теплотехніки». Практикум містить 3 лабораторних роботи за темами освітнього компонента. Кожній лабораторній роботі передують коротка теоретична частина, опис установки та методику обробки лабораторних робіт. Для кожної роботи наведено схему установки, хід виконання роботи та таблиці для запису отриманих даних. В кінці роботи наведено контрольні питання. Лабораторний практикум призначений для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальністю G9 Прикладна механіка, також буде також корисним здобувачам цієї спеціальності, що навчаються за спорідненими освітніми програмами

УДК 621.1.016(075.8)

Реєстр. № НП 25/26-424. Обсяг 1,28 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідectво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© Є. М. Панов, Т. Б. Шилович, Я.І. Шилович 2026
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Лабораторна робота № 1. Дослідження процесу теплопровідності в циліндричній стінці за стаціонарного режиму	5
2. Лабораторна робота № 2. Тепловіддача керамічного циліндра в умовах вільної конвекції.....	11
3. Лабораторна робота № 3. Дослідження тепловіддачі тіл радіацією	15
Додатки.....	21
Список рекомендованої літератури	68

ВСТУП

Розробка сучасної вітчизняної техніки, зокрема – лазерної техніки і обладнання, призначеної для широкого практичного застосування, є складною та важливою інженерно-технічною проблемою. Особливо це важливо для України, яка є потужною державою з розвинутою машинобудівною та приладобудівною промисловістю. Лазерна техніка дозволяє вирішувати ряд фізико-технічних та технологічних проблем щодо виготовлення високоточних та мініатюрних технічних виробів. При використанні потужного лазерного обладнання необхідними є технічні системи охолодження теплонапружених зон та елементів лазерів. Враховуючи той факт, що повітряне охолодження активних зон лазерів має певні обмеження (обумовлені, зокрема, відносно низькими значеннями коефіцієнтів тепловіддачі, типовими при охолодженні повітрям чи газами) і неможливість, таким чином, забезпечити «нормальні» теплові режими, необхідні для надійного функціонування лазерної техніки, інженерам-розробникам, разом з інженерами-конструкторами та технологами, потрібно створювати та надійно експлуатувати нові системи охолодження і термостабілізації лазерів.

Під час проведення лабораторних робіт з освітнього компонента "Теоретичні основи теплотехніки" студенти повинні набути практичних навичок та пов'язати теоретичні положення з практичними завданнями галузі. Лабораторні роботи мають дослідницький характер, прищеплюють навички самостійної роботи з конкретними апаратами, вимірювальними приладами, обчислювальною технікою, охоплюють основні розділи освітнього компоненту. До кожної роботи надано короткі теоретичні відомості, схему експериментальної установки та порядок обробки результатів дослідження.

Протоколи досліджень наведені в додатках. Результати досліджень заносяться в протокол, виконуються необхідні розрахунки, результати розрахунків заносяться до протоколу, в разі необхідності, за результатами будуються графічні залежності.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ СТІНЦІ ЗА СТАЦІОНАРНОГО РЕЖИМУ

Мета та основні завдання роботи – вивчити параметри стаціонарного процесу нагрівання циліндричної стінки; експериментальним та розрахунковим шляхом визначити температурне поле в циліндричній стінці; порівняти експериментальні дані з результатами розрахунку, визначити відносну похибку розрахунків, зробити висновки про характер одномірного температурного поля в циліндричній стінці.

1.1 Основні теоретичні відомості

Теплопровідність є способом передачі теплоти, який здійснюється за рахунок руху структурних часток речовини внаслідок нерівномірності температурного поля. Згідно гіпотези Фур'є, кількість теплоти, dQ_τ , Дж, що проходить через елемент ізотермічної поверхні dF , m^2 , за проміжок часу $d\tau$, с, пропорційна температурному градієнту $\frac{\partial t}{\partial n}$:

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{\partial t}{\partial n} dF d\tau \quad (1.1)$$

де $\lambda, \frac{Bm}{m \cdot K}$ - фізичний параметр речовини, який характеризує її здатність проводити теплоту та називається *теплопровідністю* [1].

Граничні умови – це умови теплообміну на границі між тілом та рідиною, бувають чотирьох родів:

1) першого роду, задається розподіл температури на поверхні тіла в функції часу $t = f_1(x, y, z, \tau)$;

2) другого – задається густина теплового потоку $q = f_2(x, y, z, \tau)$;

3) третього – задаються умови теплообміну на границі «тіло-рідина»:

$$\frac{dt}{dn} = -\frac{\alpha}{\lambda}(t_c - t_p), \text{ де } \alpha - \text{коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м}^2 \cdot \text{К);}$$

4) четвертого – на границі контакту двох тіл $t_{r+} = t_{r-}$.

Розглянемо граничні умови другого й третього роду для стаціонарного процесу теплопровідності в циліндричній стінці. На внутрішньому боці однорідної ізотропної стінки задано граничні умови другого роду ($q_l = \text{const}$), на зовнішньому – граничні умови третього роду (коефіцієнт тепловіддачі α_2 і температура навколишнього середовища t_{p_2}) [3].

Задача зводиться до відшукування розподілу температур у стінці. Вираз для теплового потоку, що проходить крізь одиницю довжини циліндричної стінки (лінійний тепловий потік), Вт/м:

$$\frac{Q}{l} = q_l = \frac{(t_{c_1} - t_{c_6})}{\frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_6}{d_1}} \quad (1.2)$$

де t_{c_1}, t_{c_6} – температура відповідно на внутрішній і зовнішній поверхні циліндричної стінки; λ_m – теплопровідність матеріалу стінки; d_1, d_6 – відповідно внутрішній і зовнішній діаметр стінки.

Лінійний тепловий потік від зовнішньої стінки до навколишнього середовища:

$$q_l = \alpha_2 \pi d_6 (t_{c_6} - t_{p_2}). \quad (1.3)$$

З (1.2) і (1.3)

$$q_l = \frac{(t_{c_1} - t_{p_2})}{\frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_6}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_6}}. \quad (1.4)$$

Коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої стінки до навколишнього середовища:

$$\alpha_2 = \frac{Q}{(t_{c_6} - t_{p_2})F} - \frac{\varepsilon C_0}{t_{c_6} - t_{p_2}} \left[\left(\frac{T_{c_6}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{p_2}}{100} \right)^4 \right] \quad (1.5)$$

де Q – потужність теплового потоку від нагрівника, Вт; $F = \pi d_6 L$ – площа бічної поверхні циліндричної стінки, м²; ε – ступінь чорноти поверхні

циліндричної стінки; $C_0 = 5,67 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – коефіцієнт випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла; L – довжина циліндричної стінки, м; T_{c_6}, T_{p_2} – абсолютна температура, відповідно, поверхні циліндра й рідини, К.

Температура $t_{c_{(i+1)}}$ в будь-якій точці циліндричної стінки, яка розташована на діаметрі d_{i+1} може бути визначена за формулою:

$$t_{c_{(i+1)}} = t_{c_i} - \frac{q_l}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}. \quad (1.6)$$

Критеріальне рівняння, що описує процес вільної конвекції з твердої поверхні до рідини, що її омиває, має вигляд [1] :

$$Nu = f(Gr \cdot Pr), \quad (1.7)$$

де $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ – критерій Нуссельта, l – визначальний розмір ($l = d$, якщо циліндр розміщений горизонтально, $l = L$, якщо розміщення циліндра вертикальне); λ – теплопровідність середовища, в якому здійснюється процес, Вт/(м·К); $Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta t$ – критерій Грасгофа, $g=9,81$, м²/с – прискорення вільного падіння, ν, β – фізичні параметри середовища кінематична в'язкість та коефіцієнт об'ємного розширення, які знаходять за визначальною температурою $t_0 = 0,5(t_{c_6} + t_{p_2})$, для газів $\beta = \frac{1}{T_0}$, 1/К; $\Delta t = t_{c_6} - t_{p_2}$ – температурний напір, °С; Pr – критерій Прандтля.

1.2 Опис експериментальної установки

На рис. 1.1 зображено схему експериментальної установки для дослідження теплопровідності в циліндричній стінці. Вимірювальний вузол являє собою суцільний однорідний циліндр 1, розмірами зовнішній діаметр $d_6 = 100$ мм, висота $L = 250$ мм, матеріал – алебастр з теплопровідністю $\lambda_m = 0,7$ Вт/(м·К), розташований на металевій підставці 2.

По вертикальній осі циліндра розміщено нагрівник 3 (внутрішній діаметр циліндричної стінки $d_1 = 20$ мм). У матеріал циліндра вбудовано хромель-копелеві термопари 4, що вимірюють зміну температури по товщині стінки (1-а термopapa розміщена на $d_1 = 20$ мм, 2-а на $d_2 = 36$ мм, 3-а на $d_3 = 52$ мм, 4-а на $d_4 = 68$ мм, 5-а на $d_5 = 84$ мм, 6-а на $d_6 = 100$ мм). Термopapи підключено до електронного потенціометра 5. Потужність електронагрівника регулюється ЛАТРом 6 і контролюється ватметром 7. Температуру навколишнього середовища вимірюють термометром 8.

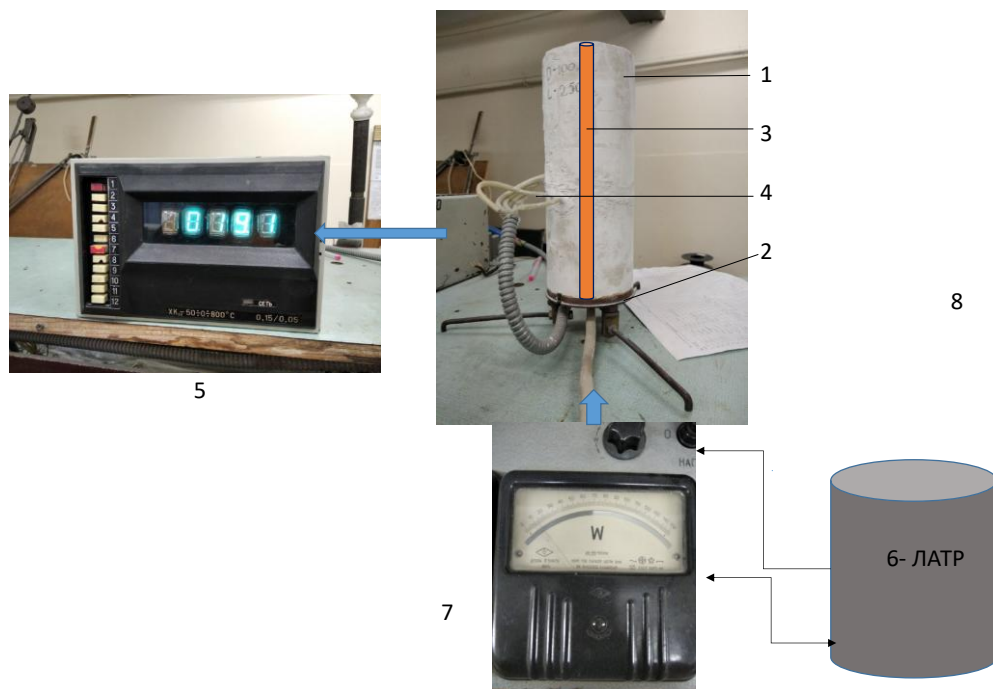


Рисунок 1.1 - Схема експериментальної установки

1.3 Порядок проведення експериментальних досліджень

Підготувавши установку до роботи й перевіривши справність усіх її вузлів, треба увімкнути нагрівник. Відрегулювати ЛАТРом потрібну потужність теплового потоку нагрівника й дочекатися встановлення стаціонарного теплового режиму. В стаціонарному режимі виконати

вимірювання температур у циліндричній стінці й на поверхні циліндра (не менше 3-х разів), а також температуру навколишнього середовища.

Результати вимірювань внести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати дослідження температурного поля циліндричної стінки

Діаметр циліндра d_6 , м	Довжина циліндра L , м	Температу- ра середо- вища t_{p_2} °С	Потужність нагрівника Q , Вт	Показання приладу по термопарах					
				1	2	3	4	5	6
Середнє значення температури, °С									

1.4. Порядок обробки результатів дослідів

Порядок обробки дослідів наведено в додатках в протоколі дослідження.

1.5. Контрольні запитання

1. Яким чином визначитися зі значенням теплопровідності стінки для виконання інженерних розрахунків, якщо відомо матеріал даної конструкції?
2. Які додаткові відомості необхідні для однозначного розв'язання диференціальних рівнянь, в т.ч. диференціального рівняння теплопровідності?
3. Як задається в умовах однозначності форма та розміри тіла простої форми (навести приклади) ?

4. Якщо задана температура на поверхні, то якого роду граничні умови задано?
5. Якщо заданий питомий тепловий потік, то якого роду задано граничні умови?
6. Який характер має розподіл температури в пласкій та циліндричній стінках?
7. Які процеси називають стаціонарними?
8. Описати конструкцію дослідної установки.

1.6 Техніка безпеки

1. До увімкнення оглянути установку, перевірити електричну схему.
2. Перед вмиканням установки, попередити про це оточуючих.
3. Заборонено залишати установку включеною без нагляду технічних працівників.
4. Дотримуватися обережності в процесі визначення показань контрольно-вимірювальними приладами.
5. Вимикаючи установку, насамперед вимикати рубильник, а потім вимірюючі прилади.
6. Акуратно поводитися з вимірювальними приладами.
7. Після закінчення роботи прибрати робоче місце.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ТЕПЛОВІДДАЧА КЕРАМІЧНОГО ЦИЛІНДРА В УМОВАХ ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Мета та основні завдання роботи – визначити температури поверхні горизонтального циліндра в умовах вільної конвекції, вивчити параметри процесу тепловіддачі в умовах вільної конвекції; одержати критеріальні залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі для керамічного циліндра, побудувати графіки та зробити висновки щодо отриманої критеріальної залежності та розподілу температури по поверхні циліндра.

2.1. Основні теоретичні відомості

В рухомих середовищах теплота поширюється шляхом **конвективного теплообміну**. За законом Ньютона-Ріхмана, тепловий потік, поширений шляхом конвективного теплообміну від нагрітої поверхні до омиваючої її рідини пропорційний різниці температур поверхні та середовища, Вт:

$$Q = \alpha(t_{\text{ст}} - t_p)F \quad (2.1)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К), який характеризує інтенсивність теплообміну між поверхнею тіла та оточуючим середовищем, $t_{\text{ст}}$ – температура поверхні (стінки), °С, t_p – температура середовища (рідини), °С, F – площа поверхні теплообміну, м².

Тепловий потік, віднесений до одиниці довжини циліндричної стінки, називається лінійною густиною теплового потоку, Вт/м:

$$q_l = \frac{Q}{l} = \alpha \pi d (t_{\text{ст}} - t_p), \quad (2.2)$$

де l – довжина циліндричної стінки, м; d – діаметр, м.

Коефіцієнт тепловіддачі α визначається із критерію Нусельта Nu [1-3]. Одержані емпіричні критеріальні рівняння для процесу вільної конвекції мають наступний вигляд:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n \quad (2.3)$$

2.2 Опис експериментальної установки

На рис. 2.1 зображено експериментальну установку для вивчення процесу тепловіддачі від керамічної труби у повітрі у випадках, коли її розміщують вертикально, нахилено чи горизонтально.

В середині дослідної труби 2 розміщено електронагрівник 1, який має таку будову: на внутрішню металеву трубу накладено тонкий шар міканіту, поверх якого намотано ніхромовий дріт. Ніхромову намотку зверху покрито міканітом і теплоізоляційним матеріалом і вставлено в металеву трубу, на яку зверху посаджено дослідну керамічну трубу. Труба ретельно теплоізолювана з торців.



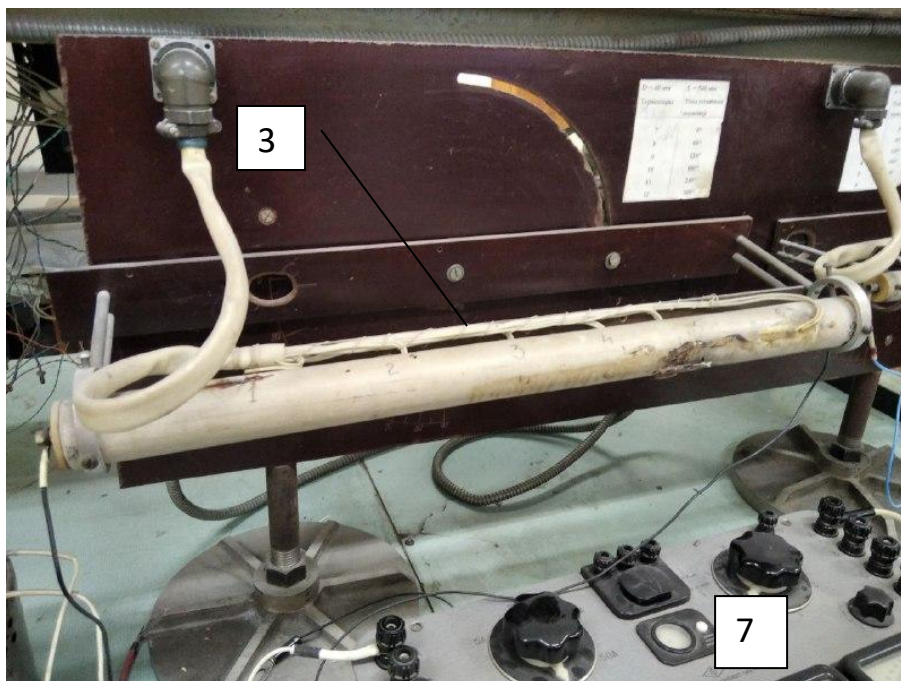


Рисунок 2.1 – Схема експериментальної установки

Для вимірювання температури на зовнішній поверхні труби закладено систему термопар 3, розміщених по спіралі. Потужність струму вимірюють приладом Д 556 (7), регулюють реостатом 6, ЕРС термопар вимірюють електронним потенціометром 4. Температуру середовища вимірюють термометром.

2.3 Порядок проведення дослідів

Підготувавши установку до роботи і перевіривши справність усіх вузлів, увімкнути нагрівник. Регулюючи потужність нагрівника, встановити потрібну температуру зовнішньої поверхні і до встановлення стаціонарного режиму підтримувати потужність постійною. Вимірювання треба проводити не менше трьох разів для визначення середньої температури поверхні труби в стаціонарному процесі тепловіддачі. Після чого встановити наступний режим шляхом підвищення потужності на нагрівачі. Через 10...15 хвилин за умови сталості в часі температури на зовнішній поверхні труби вимірювання

повторити. Рекомендоване значення потужності $Q=5\ldots 20$ Вт.

Результати вимірювань внести в табл. 2.1 протоколу (в додатку).

2.4 Порядок обробки результатів дослідів

Порядок обробки дослідів наведено в додатках в протоколі дослідження.

2.5 Контрольні запитання

1. Що являє собою процес вільної конвекції?
2. За яких умов проводяться дослідження?
3. Якими приладами вимірюється температура в дослідженні?
4. Як залежить процес тепловіддачі від геометрії поверхні, кута її нахилу?
5. Залежність між якими величинами і параметрами встановлюється критеріями Nu, Gr, Pr ?
6. Опишіть принцип роботи термопар?
7. Чим зумовлене застосування логарифмічної системи координат для побудови критеріальної залежності?

2.6. Техніка безпеки

1. Перед увімкненням оглянути установку, перевірити електричний ланцюг.
2. Перед увімкненням рубильника попередити навколишніх працівників.
3. Забороняється залишати установку ввімкнутою без нагляду.
4. Необхідно бути обережним під час електричних вимірювань.
5. Вмикаючи установку, насамперед увімкнути рубильник, потім прилади.
6. Після закінчення роботи прибрати робоче місце

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДАЧІ ТІЛ РАДІАЦІЄЮ

Мета та основні завдання роботи – дослідити процес випромінювання чорних та сірих тіл, визначити ступінь чорноти сірого тіла.

3.1 Основні теоретичні відомості

Теплообмін **випромінюванням** супроводжує всі теплові процеси, пов'язані з нагріванням або охолодженням тіл. Носіями випромінювання є електромагнітні хвилі з довжиною хвиль від частки мікрметра (наприклад, гамма-промені, рентгенівські) до багатьох кілометрів (наприклад, радіохвилі), що поширюються у вакуумі зі швидкістю світла ($3 \cdot 10^8$ м/с). У загальному випадку інтенсивність випромінювання залежить від природи тіла, його температури, стану поверхні, довжини хвилі, а для газів – від їх складу, а також від тиску й товщини шару. Промені з довжиною хвилі в діапазоні 0,8- 800 мкм (інфрачервоні), виникнення яких визначається температурою й оптичними властивостями випромінюючого тіла, називаються тепловими, а явище їхнього розповсюдження - **тепловим випромінюванням**.

Перенесення цієї енергії не вимагає безпосереднього контакту тіл або якогось спеціального середовища й може відбуватися на досить великих відстанях. Енергія випромінювання тіла зумовлюється перебігом внутріатомних процесів і залежить від абсолютної температури тіла, оскільки частина внутрішньої енергії тіла перетворюється в променисту. Потрапляючи на навколишні тіла, енергія частково поглинається, відбивається й проходить крізь тіло. Поглинута енергія перетворюється в теплоту. Тіло, яке повністю вбирає в себе променисту енергію, називають абсолютно чорним, те, яке повністю відбиває всі промені, що падають на нього, абсолютно білим. Тіло, яке пропускає всі промені, називають абсолютно прозорим [1, 3].

Абсолютно білих, чорних і прозорих тіл у природі немає. Аналогом

абсолютно чорного тіла може бути сажа або порожниста сфера з отвором. Абсолютно чорні тіла характеризуються максимальним поглинанням теплового потоку, що потрапляє на поверхню. За законом Стефана – Больцмана випромінювальна здатність абсолютно чорного тіла визначається як:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3.1)$$

де E_0 – поверхнева густина випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м²; C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴); T – абсолютна температура тіла, К.

Більшість реальних тіл у природі вважають сірими. Випромінювальна здатність таких тіл нижча, ніж у абсолютно чорних. Поверхнева густина випромінювання сірого тіла, Вт/м²,

$$E = C \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (3.2)$$

де C – коефіцієнт випромінювання сірого тіла, Вт/(м²·К⁴).

Порівнюючи енергію випромінювання тіла з енергією випромінювання абсолютно чорного тіла за однієї й тієї самої температури, дістають відносну випромінювальну здатність, або ступінь чорноти тіла:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_0} = \frac{C \left(\frac{T}{100} \right)^4}{C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4} = \frac{C}{C_0}, \quad (3.3)$$

звідки

$$C = \varepsilon C_0, \quad (3.4)$$

тоді

$$E = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4. \quad (3.5)$$

Ступінь чорноти тіла ε лежить у межах 0...1 (Додаток 6).

Знаючи ступінь чорноти тіла ε , неважко розрахувати поверхневу

густину потоку E і потужність теплового потоку випромінювання Q_v , Вт, що передається випромінювачем за одиницю часу:

$$E = \varepsilon_0 C_0 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T_{\text{серед}}}{100} \right)^4, \quad (3.6)$$

$$Q_v = \varepsilon_{\text{зв}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{серед}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \right] F, \quad (3.7)$$

де $\varepsilon_{\text{зв}}$ – зведена ступінь чорноти системи тіл, що складаються з нагрітої випромінюючої і навколишньої сприймаючої поверхонь (можна взяти $\varepsilon_{\text{зв}} = \varepsilon$); $T_{\text{серед}}$, T_p – абсолютна температура відповідно випромінюючого й сприймаючого тіла, К; F – площа випромінюючої поверхні, м².

Знаючи ступінь чорноти тіла, можна отримати значення коефіцієнта тепловіддачі випромінюванням, Вт/(м²·К):

$$\alpha_v = \frac{\varepsilon_{\text{зв}} C_0 \left[\left(\frac{T_{\text{серед}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \right]}{T_{\text{серед}} - T_p}, \quad (3.8)$$

де $T_{\text{серед}}$, T_p – абсолютна температура відповідно випромінюючого тіла і навколишнього середовища, К.

4.2 Опис експериментальної установки

Установка (рис. 3.1) складається з нагрівника 1, перемикача 10, термостовпчиків 5, двох пластин з полімерного матеріалу 3, термопар 4, електронного потенціометра, ЛАТРа, ватметра. Досліджувані пластини розміщено з двох боків нагрівника, нагрівання пластин регулюється ЛАТРОм. Перемикач 10 служить для визначення термоЕРС, яка виникає в термостовпчиках від випромінювання сірою пластиною (ліве положення) та чорною пластиною (праве положення).

На рис. 3.2 показані сіра та затемнена пластини 3, в кожному з кутів яких розташовані термопари 4.

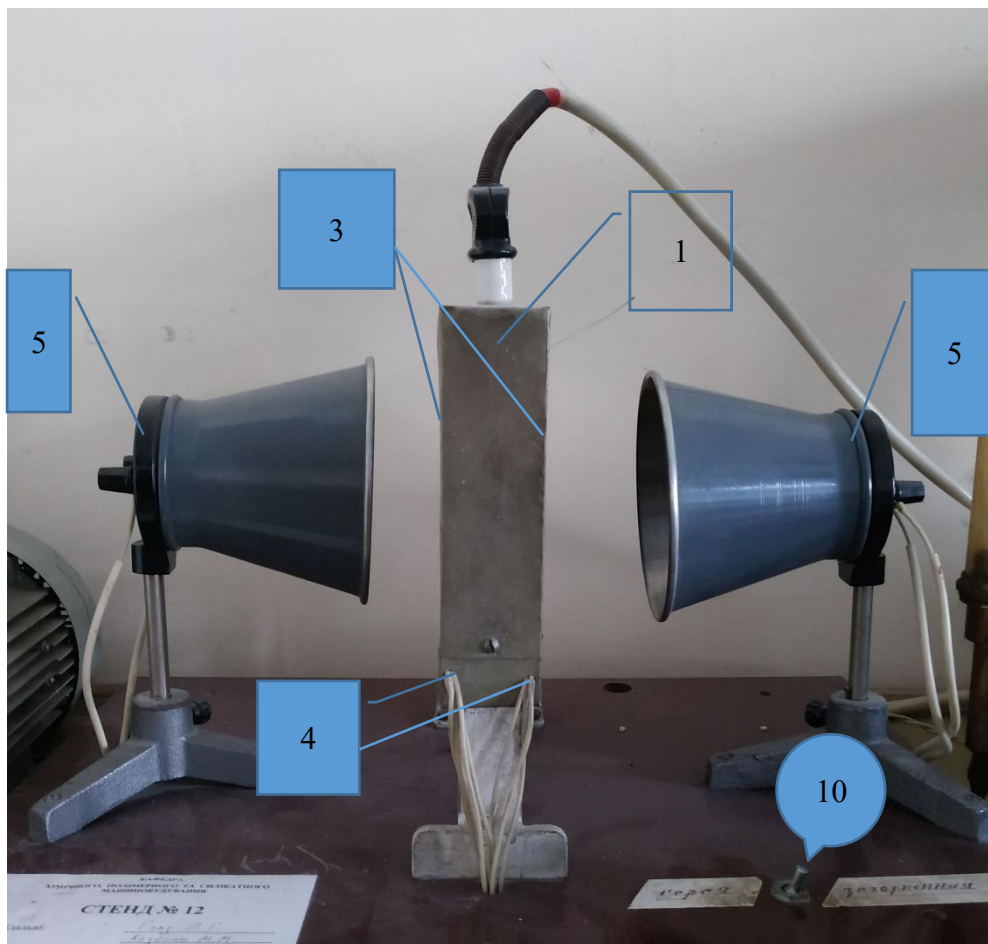
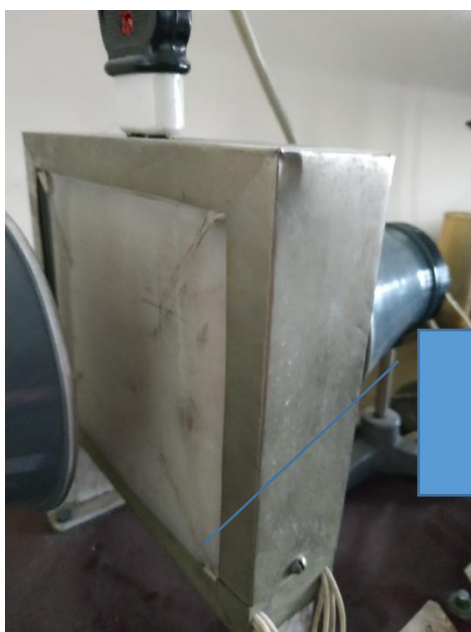


Рисунок 3.1 - Схема установки



а



б

Рисунок 3. 2 - Сіра (а) та чорна (б) пластини з термопарами 4 для визначення температури поверхні випромінюючих пластин

Електричну потужність, споживану кожним нагрівником, вимірюють ватметром, температуру пластин – за допомогою термопар, закріплених у чотирьох точках на кожній пластині. Випромінюючи кожною пластиною енергію сприймають термостовпчики (рис. 3.3) і реєструють за допомогою потенціометра.

Термостовпчик являє собою батарею з 50 послідовно зв'язаних термопар, виготовлених з тонких ніхромових і константанових стрічок. Батарею термопар розміщено в корпусі, який має вікно для пропускання теплового випромінювання і збиральний конус. Для регулювання ширини вікна призначено засувки.

Пластини встановлені для вирівнювання термопар по поверхні нагрівника.



Рисунок 3.3 - Термостовпчики

Пластини 2 слугують для вирівнювання термопар по поверхні нагрівника. Температуру зовнішнього середовища вимірюють термометром.

3.3 Порядок проведення експериментальних досліджень

Ознайомитися з експериментальною установкою, перевірити правильність увімкнення приладів. Встановити ЛАТРоm задану потужність нагрівника. При досягненні стаціонарного режиму теплового випромінювання, який визначають за допомогою потенціометра, виміряти ЕРС термостовпчиків і температуру на поверхні пластин.

ЕРС термостовпчиків і температури пластин треба вимірювати за різних значень потужності нагрівника (не менше за три). Результати вимірювань внести до табл. 3.1. протоколу.

3.4 Контрольні запитання

1. Описати експериментальну установку.
2. Яка будова термостовпчика і для чого він призначений?
3. Які тіла називають абсолютно чорне, абсолютно біле, абсолютно прозоре?
4. Як визначають в роботі коефіцієнт тепловіддачі?
5. Що встановлює закон Стефана – Больцмана?
6. Проаналізуйте отриману графічну залежність $\alpha = c(Gr Pr)^n$.

3.5 Техніка безпеки

1. Перед вмиканням установку треба уважно оглянути, перевірити правильність ввімкнення електричних кіл.
2. Заборонено порушувати положення стовпчика відносно тепловіддавальної поверхні.
3. Заборонено залишати установку ввімкненою без нагляду.
4. По закінченні роботи треба знеструмити установку.

ДОДАТКИ

Додаток 1. Фізичні властивості сухого повітря

/ $B = 760$ мм рт.ст. $\approx 1.01 \cdot 10^5$ Па/

t °C	ρ кг/м ³	C_p кДж/(кг·К)	$\lambda \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	$\alpha \cdot 10^6$ м ² /с	$\mu \cdot 10^6$ Па с	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	Pr
- 30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
- 20	1,396	1,009	2,28	16,2	16,2	12,70	0,716
- 10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,03	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	26,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,23	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,638
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,818	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677

Додаток 2. Сутність коефіцієнту теплопровідності та методика його визначення для твердих тіл

Коефіцієнтом пропорційності λ , Вт/(м·К) є фізичний параметр, який характеризує здатність речовини проводити теплоту и називається *теплопровідністю*. Теплопровідність залежить від роду речовини, температури та тиску. Для газів теплопровідність знаходиться у межах 0,006...0,6 Вт/(м·К), для крапельних рідин 0,07...0,7 Вт/(м·К), будівельних та теплоізоляційних матеріалів – у межах 0,023...2,9 Вт/(м·К). Найбільше значення теплопровідності мають метали – 10...400 Вт/(м·К). Це обумовлено розбіжностями структури речовини і, в наслідок цього, різними способами передачі теплоти.

Висока теплопровідність металів та металевих композитів пояснюється тим, що перенесення теплоти в них здійснюється в основному за допомогою передачі енергії електронами, на відміну від неметалічних речовин. Співвідношення внесків кожної складової залежить від конкретних умов сполуки композита, наприклад, у надпровідних матеріалах відносні внески цих механізмів різні в нормальному й надпровідному станах. У загальному випадку теплопровідність є сумою решіткової і електронної теплопровідності $\lambda = a \lambda_{\text{реш}} + b \lambda_{\text{електр}}$.

З таблиці Д.2 видно, що у керамічних матеріалів, що містять стеклофазу й мають кристалофазу з відносно складною будовою решітки (муліт, порцеляна, кварцове скло, стабілізована ZrO_2 і інш.), коефіцієнт теплопровідності досить малий. Він також мало міняється зі зростанням температури, при цьому розходження в складі стеклофазі розміру кристалів повинне проявлятися в незначній мірі.

Таблиця Д.2 - Значення коефіцієнтів теплопровідності різних керамічних матеріалів

Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot К)$		Матеріал	Коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot К)$	
	100°C	1000°C		100°C	1000°C
Al ₂ O ₃	30,0	6,2	Муліт	6,0	4,0
BeO	220,0	20,0	UO ₂	10,1	3,3
MgO	36,0	7,0	ZrO ₂	1,9	2,3
MgAl ₂ O ₄	15,0	5,8	Кварцове скло	2,1	2,5
ThO ₂	6,5	3,3	Фарфор	1,7	1,9

Коефіцієнт теплопровідності визначають експериментально, наприклад, використовуючи прилад вимірник теплопровідності ВТ-λ-400. Вимірник призначений для дослідження температурної залежності теплопровідності твердих механічно оброблюваних матеріалів в режимі монотонного нагрівання.

Умови експлуатації вимірника наступні:

Навколишня температура, °С.....від 10 до +35

Відносна вологість повітря при температурі 25 ос, %.....до 80

Атмосферний тиск, кПа (мм.рт.ст.).....650-800

Технічні дані вимірювача теплопровідності:

діапазон виміру теплопровідності λ , Вт/(м·К) від 0,1 до 5

температурний діапазон виміру теплопровідності, °С.....від -100 до +400

діаметр випробуваного зразка, мм 15±0,3

висота (залежно від очікуваного значення, мм) - від 0,5 до 5

тривалість вимірів у всьому температурному діапазоні, год - не більше за 2,5

межа основної погрішності виміру теплопровідності, % ± 10
споживана потужність, кВт не більше 1
електроживлення мережі змінного струму 50 Гц
напруга 220 ± 22 В.

До складу установки входить:

- блок вимірювальний ПУ.999.067,
- блок живлення й регулювання ПУ 2.087.089,
- вимірювальний комплекс, що складається з комп'ютера, модуля збору даних ICP con I-7018 та перетворювача ICP con I-7520, блока живлення. Крім того, для проведення дослідження необхідні ваги електронні та мікрометр.

Для виміру теплопровідності у вимірнику використовується метод динамічного калориметра. Теплова схема методу показана на рис.Д1

Зразок, який досліджується (4), розміщується між пластиною контактною (3) і стрижнем (5) та монотонно розігріваються тепловим потоком $Q(i)$, який поступає від основи (1). Бічні поверхні стрижня (5), зразка (4), пластин (2), (3) адіабатно ізолювані. Стрижень (5) і пластина контактна (3) виготовлені з міді, яка має високу теплопровідність, тому перепади температур на них є незначними.

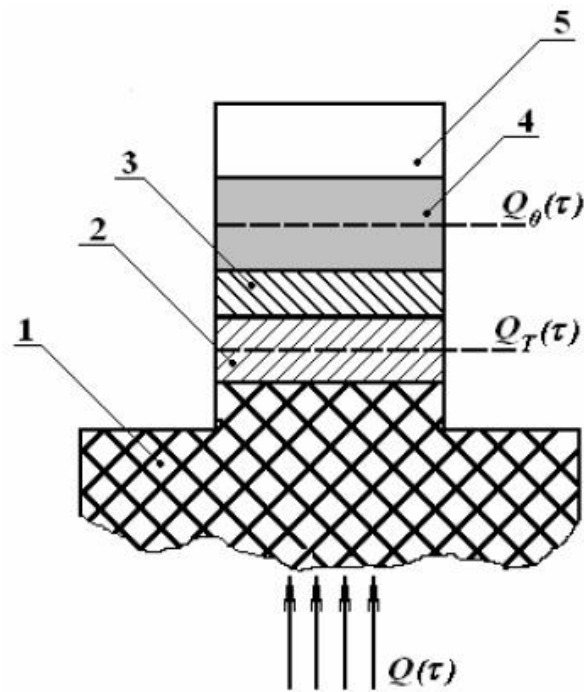


Рисунок Д.1 - Теплова схема методу: 1 - підставка; 2 - пластина; 3 - пластина контактна; 4 – зразок, що випробується; 5 - стрижень

Тепловий потік $Q(\tau)$, що проходить через середній перетин пластини (2), частково поглинається нею й далі йде на розігрів пластини (3), зразка (4) та стрижня (5). Розміри системи обрані таким чином, щоб потоки, що акумулюються зразком і пластиною були в 5-10 разів менше за ті, що поглинаються стрижнем. У цьому випадку температурне поле зразка (4) і пластини (2) виявляється близьким до лінійного стаціонарного, всі деталі системи розігріваються з близьким швидкостями, а для теплових потоків $Q_o(\tau)$ і $Q_T(\tau)$ і для будь-якого рівня температури справедливі формули:

$$Q_o(\tau) = \frac{\nu_0 S}{P} = \left(\frac{1}{2} C_0 + C_c\right) b, \quad (\text{Д.1})$$

де $Q_o(\tau)$ – тепловий потік, що проходить через зразок і поглинається стрижнем, Вт;

ν_0 - перепад температури на зразку, К;

P - тепловий опір між стрижнем і контактною пластиною, $(\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$;

C_o - повна теплоємність зразка, Дж/К;

C_c - повна теплоємність стрижня, Дж/К;

b - швидкість розігріву вимірювального стільника, К/с;

S - площа поперечного переріза зразка, м²;

$$Q_T(\tau) = K_T^* \nu_T = \left(\frac{1}{2} C_T + C_n + C_o + C_c \right) b, \quad (\text{Д.2})$$

де $Q_T(\tau)$ – тепловий потік, що проходить через середній перетин пластини 2, Вт;

K_T^* - коефіцієнт пропорційності, що характеризує ефективну теплову провідність пластини (2), Вт/К;

ν_T – перепад температури на пластині (2), К;

C_T – повна теплоємність пластини (2), Дж/К;

C_n – повна теплоємність пластини контактної (3), Дж/К;

Тепловий опір між стрижнем і контактною пластиною визначається за формулою:

$$P = P_o + P_K \quad (\text{Д.3})$$

де P_o – тепловий опір зразка,

P_K – виправлення, що враховує тепловий опір контакту, не ідентичність і тепловий опір закладення термопар,

Тепловий опір зразка визначається по формулі:

$$P_o = \frac{h}{\lambda}, \quad (\text{Д.4})$$

де h – висота зразка, м;

λ - теплопровідність зразка, Вт.

На підставі формул (Д.1 – Д.4) отримуємо робочі розрахункові формули для теплового опору зразка і його теплопровідності

$$P_0 = \frac{v_0 S(1 + \sigma_c)}{v_T K_T} - P_k \quad (Д5)$$

де σ_c - виправлення, що враховує теплоємність зразка;

$$\sigma_c = \frac{C_0}{2(C_0 + C_c)}, \quad (Д.6)$$

де C_0 – повна теплоємність випробуваного зразка, Дж/(К);

C_c – повна теплоємність стрижня, Дж/К;

$$C_0 = C_0(t)m_0, \quad (Д.7)$$

де $C_0(t)$ – орієнтовне значення питомої теплоємності зразка, Дж/(кг·К),

m_0 – маса зразка, кг;

$$C_c = C_m(t)m_c \quad (Д.8)$$

де $C_m(t)$ – питома теплоємність міді, Дж/(кг К), таблиця Д.2;

m_c – маса стрижня, кг.

Таблиця Д2 - Постійні вимірники, отримані при градуюванні

Температура, °С	$P_k, \times 10^{-4}$ ($m^2 \cdot K$)/Вт	C_c , Дж/К	$C_m(t)$, Дж/К	K_T , Вт/К
50	8,7	17,1108	392	0,118
100	6,5	17,4600	400	0,078
150	6,7	17,6783	405	0,076
200	6,7	17,8092	408	0,074

Позначення символів табл. Д.2:

P_k - виправлення, що враховує тепловий опір контакту, не ідентичність і опір закладення термопар; C_c - повна теплоємність стержня; $C_m(t)$ – теплоємність міді; K_T - теплова провідність пластин тепломіра.

В таблицях Д3- Д.4 наведено довідникові дані для експлуатації установки.

Таблиця Д.3 - Вибір висоти зразка залежно від очікуваного значення
Теплопровідності

λ , Вт/(м К)	0.1-0.3	0.3-0.5	0.5-1.0	1.0-2	більше 2
$h \cdot 10^{-3}$, м	0.5-1.0	1-2	2-3	3-5	більше 5

Таблиця Д.4.- Дані, які необхідні при експлуатації вимірювача

t_c , °C	C_M , Дж/(кг К)	λ_M , Вт/(м К)	A_t , К/мВ
-100	345	407	37,8
-75	385	401	32,5
-50	365	395	29,0
-25	373	390	26,8
0	376	387	25,0
25	385	384	24,8
50	392	381	24,5
75	396	379	24,6
100	400	377	24,7
125	403	376	24,8
150	405	375	25,0
175	406	374	25,0
200	408	373	25,0
225	410	373	24,9
250	412	372	24,8
275	415	372	24,5
300	417	371	24,2
325	420	370	24,0
350	422	368	23,8
375	423	367	22,8
400	425	365	23,75

Позначення символів таблиці Д.3:

t_c - температура стержня, °C; C_M - питома теплоємність міді, Дж/(кг К);

λ_m - теплопровідність міді, Вт/(м К); A_t - чутливість термопар хромель-алюмель, К/мВ.

Вплив σ_c звичайно не перевищує 5-10% і може оцінюватися по орієнтовним даним теплоємності зразка.

Значення теплопровідності пластини визначається за наступною формулою (10): $K_T = K^*_T \frac{C_c}{0,5C_T + C_n + C_c}$ (Д.9)

$$\lambda = \frac{h}{P_0}, \quad (\text{Д.10})$$

Обчислені значення теплопровідності зразка відносяться до середньої температури зразка, що визначається за формулою:

$$\bar{t} = t_c + 0,5A_t n_o \quad (\text{Д.11})$$

де $\bar{t}$ - середня температура зразка, °С; t_c – температура, при якій проводився вимір теплопровідності, °С; A_t – чутливість термопар хромель-алюмель, К/мВ; n_o – перепад температури на зразку, мВ.

Параметри K_T і P_k не залежать від властивостей зразка, що випробується, є «постійними» вимірника. Значення P_k зазвичай дано для матеріалу з $\lambda = 2 \div 5 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ і не перевищують 10-20% теплового опору зразка.

Визначення K_T і P_k проводиться в градуїровочних експериментах із зразковою мірою із кварцового скла й зразком з міді, що входить у комплект приладу. Для визначення теплопровідності випробуваного зразка в експерименті необхідно на різних рівнях температури вимірювати перепади температури на тепломірі v і на зразку vo – у мікровольтах, МкВ, n і no . Результати градуїровочних експериментів наведено у таблиці Д 5.

Таблиця Д.6 - Результати градуїровочних експериментів

t_c	n_0 , дел	n_t , дел	K_T , Вт/К	P_K	K_{Tt} , Вт/К
1	2	3	4	5	6
25	45	5	0,218	8,72e-4	0,062
50	170	46	0,118	7,54e-4	0,064
75	196	86	0,075	6,54e-4	0,065
100	212	92	0,078	6,28e-4	0,067
125	209	95	0,076	6,70e-4	0,068

Для визначення теплопровідності в експериментальному дослідженні в процесі безперервного розігріву на різних фіксованих рівнях температури застосовується вимірювальний комплекс з оригінальним програмним забезпеченням, який дозволяє вимірювати перепад температур на зразку P_o й пластині P_T тепломіра.

Вимірювальний блок зібраний у корпусі, виготовленому на базі типового каркаса. На двох косинцях, прикріплених до корпусу гвинтами, встановлена плата, що несе на собі вимірювальний стільник. Нижня частина вимірювального стільника закріплена на платі планками. Верхня частина вимірювального стільника встановлена на тій же платі за допомогою направляючої штанги, що має шпонковий паз і фрезеровану канавку для підйому й бічного повороту. Це дозволяє при зміні випробуваного зразка підняти й повернути убік на 90° верхню частину вимірювального стільника.

Для підйому служить упор. У спеціальному кожусі встановлені з'єднуюча колодка й міст опорів. На передній панелі блоку розміщені рукоятки керування й сигнальна лампа регулятора температури. Стільник вимірювання (рис. 3) є найважливішою частиною вимірювального блоку й складається з корпусу 9, роз'ємної теплозахисної оболонки (10) і металевого ядра (деталі (1), (2), (3), (4), (11), (13), (14)). Корпус (9) складається з 2-х частин, постачений ребрами для інтенсифікації теплообміну на його поверхні (на рис.Д3 не показані). Нижня частина корпусу закріплена на верхній

горизонтальній платі вимірювального блоку, верхня частина - на под'ємно - комірцевому штанговому механізмі. Блок нагрівальний (14) і ковпак охоронний (4) постачені системою отворів. Через патрубки (8) і (15) здійснюється подача рідкого азоту при охолодженні ядра в область негативних або кімнатних температур. Система отворів у нагрівальному блоці (14) і охоронному ковпаку (4) забезпечує досить рівномірне охолодження всього ядра в цілому. На мідній підставці (13) розміщені термopари (3), пластина (1), контактна пластина (2), яка складає тепломір, і випробуваний зразок (12). Основа (13) і блок нагрівальний (14) з'єднані гвинтами й спеціальної хрестоподібною деталлю кріпляться до нижньої половини корпусу вимірювального стільника. Охоронний ковпак (4) за допомогою аналогічної деталі кріпиться до верхньої частини корпусу. Для температурних вимірів використовуються хромель-алюмелеві термopари з діаметром електродів 0,2 мм. Електроди ізольовані в гарячій зоні ядра керамічними двухканальними трубками діаметром близько 1 мм. Останні для підвищення механічної міцності армовані трубками з нержавіючої сталі. Зразок, що випробується (12) установлюється на пластину контактну (2) і зверху підтискається стрижнем (11), притиском (6) і пружиною (7). Тепломір змонтований у мідній основі (13). Робочим шаром термометра є пластина (1) з нержавіючої сталі 12Х18Н9Т.

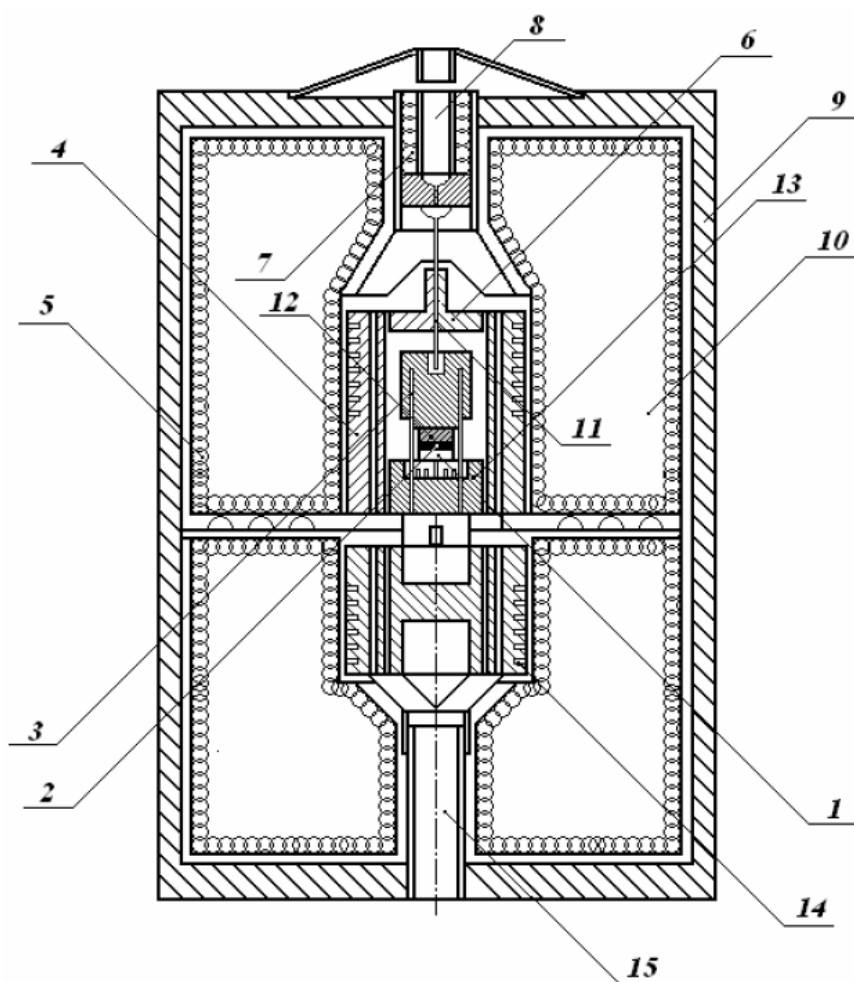


Рисунок Д.3 - Стільник вимірювання теплопровідності.

Для збільшення теплового опору й зниження теплоємності в пластині передбачені отвори й канавки. Підставка (13), пластини (1) і (2) спаяні один з одним і постачені шестиспайним термостовпчиком із хромелю та алюмелю. Для установки термостовпчика в підставці (13) і пластинах (1) і (2) передбачені отвори.

Розмір зразка для визначення теплопровідності наведено на рис. Д.4.

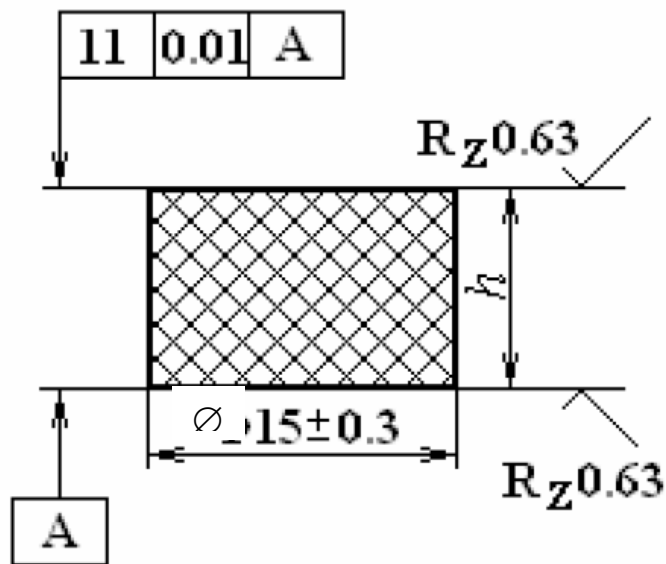


Рисунок Д.4 - Креслення зразка

Коефіцієнтом пропорційності λ , Вт/(м·К) є фізичний параметр, якій характеризує здатність речовини проводити теплоту и називається *теплопровідністю*. Теплопровідність залежить від роду речовини, температури та тиску. Для газів теплопровідність знаходиться у межах 0,006...0,6 Вт/(м·К), для крапельних рідин 0,07...0,7 Вт/(м·К), будівельних та теплоізоляційних матеріалів – у межах 0,023...2,9 Вт/(м·К). Найбільше значення теплопровідності мають метали – 10...400 Вт/(м·К). Це обумовлено розбіжностями структури речовини і, в наслідок цього, різними способами передачі теплоти. Загальний вигляд установки для визначення теплопровідності твердих матеріалів показано на рис. Д.5

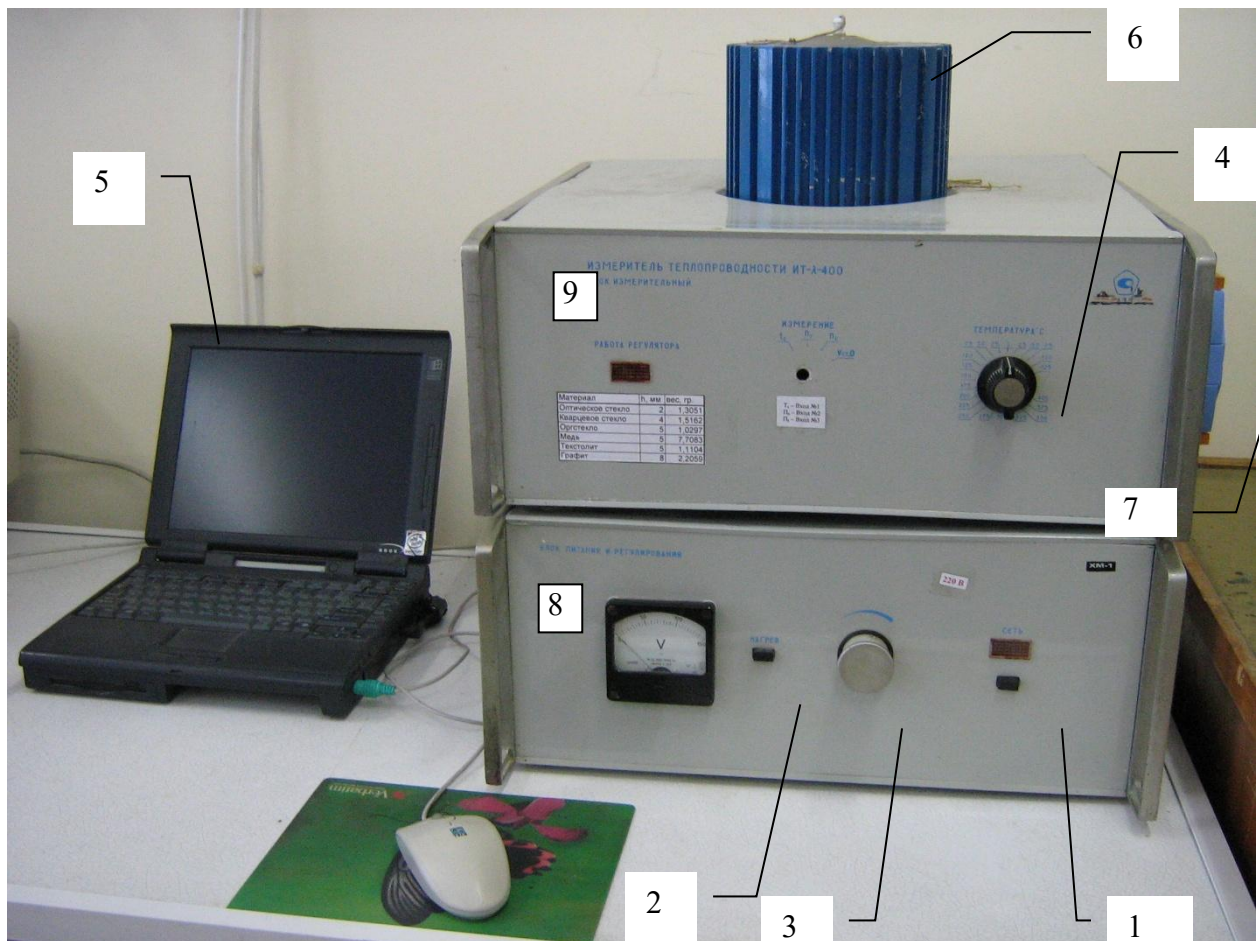


Рисунок Д.5 - Загальний вигляд установки для визначення теплопровідності твердих матеріалів. 1 – кнопка «включення в мережу»; 2 – кнопка «нагрів»; 3 – регулятор напруги; 4 – установлення температурного рівня виміру; 5 – ноутбук; 6 – комірка виміру; 7 - модуль збору даних; 8 – блок живлення; 9 – вимірювальний блок.

Зазвичай протокол дослідження має вигляд, наведений в табл. Д.6

Таблиця Д.6 - Основні параметри зразка й результати експерименту

Для дослідного зразка:

$h = \dots$ м

$d = \dots$ м

$S = \dots$ м²

$m = \dots$ кг

t_c	n_0 , дел	n_t , дел	K_T , Вт/К	P_K	P_0	C_c , Дж/К	σ_c	A_t	t	λ , Вт/(м К)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
25										
50										
75										
100										
125										

Визначена таким чином величина теплопровідності твердого матеріалу може бути використана в теплових розрахунках, наприклад, в лабораторній роботі 1 теплопровідність циліндричної стінки.

Додаток 2. Протоколи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ФАПЕ
Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування

ПРОТОКОЛИ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З ОСВІТНЬОГО КОМПОНЕНТА
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕПЛОТЕХНІКИ

Виконав _____

студент гр. _____

Перевірив _____

Оцінка _____

Київ 20__

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ В ЦИЛІНДРИЧНІЙ СТІНЦІ ЗА СТАЦІОНАРНОГО РЕЖИМУ

Мета роботи – вивчити параметри процесу теплопровідності в стаціонарному тепловому режимі; виконати розрахунок температурного поля в циліндричній стінці; порівняти дослідні дані з результатами розрахунку.

1. Виконання експериментальних дослідів

В стаціонарному режимі виконати вимірювання температур у циліндричній стінці й на поверхні циліндра (не менше 3-х разів), а також температуру навколишнього середовища.

Результати вимірювань внести до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати експериментальних досліджень

Діаметр циліндра d_6 , м	Довжина циліндра L , м	Температу- ра середо- вища t_{p_2} °C	Потужність нагрівника Q , Вт	Показання приладу по термопарах, t_{ci} °C					
				1	2	3	4	5	6
Середнє значення температури, °C									

2 Обробка результатів дослідження

Задача 1. Відомі температури t_{c_6} і t_{p_2} .

1. Знайти значення визначальної температури:

$$t_0 = 0.5(t_{c_6} + t_{p_2}) =$$

2. За температурою t_0 визначити фізичні параметри середовища (повітря):

теплопровідність, Вт/(м·К), $\lambda =$

кінематична в'язкість, м²/с, $\nu =$

коефіцієнт об'ємного розширення, 1/К, $\beta = 1/T_0 =$

число Pr =

3. Розрахувати значення критерію:

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta (t_{c_6} - t_p) =$$

та добутку $Gr \cdot Pr =$

4. Залежно від значення добутку $Gr \cdot Pr$ обрати числові значення коефіцієнтів c і n рівняння вільної конвекції (табл.1.2).

$$Nu = c(Gr \cdot Pr)^n =$$

Таблиця 1.2- Числові значення коефіцієнтів c і n залежно від $Gr \cdot Pr$

$Gr \cdot Pr$		c	n
1.	$10^3 - 1 \cdot 10^9$	0,75	0,25
2.	$\geq 10^9$	0,15	0,33

5. Розрахувати значення коефіцієнта тепловіддачі α_2 , Вт/(м²·К):

$$\alpha_2 = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} =$$

6. За рівнянням (1.2) розрахувати тепловий потік, віднесений до одиниці довжини циліндра q_l

$$q_l = \alpha_2 \pi d_6 (t_{c_6} - t_{p_2}) =$$

7. На основі рівняння (1.4) визначити температуру t_{c_1} , °С:

$$t_{c_1} = t_{p_2} + q_l \left(\frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_6}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_6} \right).$$

8. Розрахувати температури t_{c_2} , t_{c_3} , t_{c_4} , t_{c_5} за рівнянням:

$$t_{c_{(i+1)}} = t_{c_i} - \frac{q_l}{2\pi\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}:$$

$$t_{c_2} =$$

$$t_{c_3} =$$

$$t_{c_4} =$$

$$t_{c_5} =$$

9. Розрахункові дані внести в табл. 1.3.

Задача 2. Відомі встановлена потужність теплового потоку Q і температури t_{c_6} і t_{p_2} .

1. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі α_2 , приймаючи ступінь чорноти $\varepsilon = 0,95$.

$$\alpha_2 = \frac{Q}{(t_{c_6} - t_{p_2})F} - \frac{\varepsilon C_0}{t_{c_6} - t_{p_2}} \left[\left(\frac{T_{c_6}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{p_2}}{100} \right)^4 \right] =$$

2. Визначити значення q_l , Вт/м;

$$q_l = \frac{Q}{L}.$$

3. За рівнянням визначити температуру t_{c_1} :

$$t_{c_1} = t_{p_2} + q_l \left(\frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_6}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \pi d_6} \right).$$

4. Розрахувати температури t_{c_2} , t_{c_3} , t_{c_4} , t_{c_5} на основі рівняння (1.6).

5. Дані внести до табл. 1.3.

Задача 3. Відомі встановлена потужність теплового потоку Q і температури t_{c_1} і t_{p_2} .

1. На основі рівняння (1.5) розрахувати значення коефіцієнта тепловіддачі α_2 , Вт/(м²·К), де q_l прийняти за формулою (1.2):

$$\alpha_2 = \frac{q_l}{\pi d_6 (t_{c_1} - t_{p_2}) - \frac{q_l d_6}{2\lambda_m} \ln \frac{d_6}{d_1}} =$$

2. Розрахувати значення t_{c_6} :

$$t_{c_6} = t_{p_2} + \frac{q_l}{\pi \alpha_2 d_6} =$$

4. За відомою температурою t_{c_6} та q_l із рівняння $t_{ci} = t_{c(i+1)} + \frac{q_l}{2\pi\lambda_m} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}$

$\ln(d_{i+1}/d_i)$ розрахувати температури:

$$t_{c_5} =$$

$$t_{c_4} =$$

$$t_{c_3} =$$

$$t_{c_2} =$$

Розрахункові дані внести до табл. 1.3.

Таблиця 1.3- Розрахункові дані

Завдання	α_2 , Вт/(м ² ·°C)	q_l Вт/м	t_{p_2} °C	Температура					
				t_{c_1}	t_{c_2}	t_{c_3}	t_{c_4}	t_{c_5}	t_{c_6}
Задача 1			*						*
Задача 2		*	*						*
Задача 3		*	*	*					*

Зірочками у табл. 1.3 позначено графі, до яких вносять значення, що відомі з умови задачі.

5. За даними табл. 1.3 побудувати графіки зміни температури за радіусом циліндричного зразка (одномірне температурне поле).

6. Розрахункові дані порівняти з експериментальними, визначивши відносну похибку розрахунків для кожного розрахунку кожної задачі

$$\delta = \frac{|t_{\text{екс}} - t_{\text{роз}}|}{t_{\text{екс}}}.$$

Задача 1.

Задача 2.

Задача 3.

Обрахувати похибки дослідження (див. Додаток 3)

7. Зробити висновки за роботою.

Контрольні запитання

1. Яким чином визначитися зі значенням теплопровідності для інженерних розрахунків, якщо відомо матеріал конструкції?
2. Які додаткові відомості необхідні для однозначного розв'язання диференціальних рівнянь, в т.ч. диференціального рівняння теплопровідності?
3. Як задати в умовах однозначності форму та розміри тіла простої форми (навести приклади) ?
4. Якщо задана температура на поверхні, то якого роду ці граничні умови?
5. Якщо заданий питомий тепловий потік , то якого роду ці граничні умови?
6. Який характер розподілу температури в пласкій та циліндричній стінці?
7. Однаковий тепловий потік проходить через дві пласкі стінки однакової товщини, з різною теплопровідністю: одна має $\lambda_1=20$ Вт/(мК), друга $\lambda_1=1,2$ Вт/(мК). Де перепад температур має бути більший?
8. Який розподіл має температура в сферичній стінці?

9. Чому для циліндричної стінки питомий тепловий потік визначається як відношення теплового потоку до довжини і як ця величина називається?

10. Який матеріал має найбільше значення теплопровідності?

Які матеріали застосовують для зниження температури поверхні апаратів?

ПІБ студента, група **ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2**
ТЕПЛОВІДДАЧА КЕРАМІЧНОГО ЦИЛІНДРА В УМОВАХ
ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Мета роботи – вивчити параметри процесу тепловіддачі в умовах вільної конвекції; одержати критеріальні залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі для керамічного циліндра.

2.1 Дослідження тепловіддачі за умов вільної конвекції

Результати вимірювань внести в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Результати дослідження

Розміри і кут нахилу труби	Середовище, його температура $t_p, ^\circ\text{C}$	Потужність теплого потoku Q , Вт	Номер виміру	Температура поверхні, $^\circ\text{C}$					
				1	2	3	4	5	6
1.			1						
			2						
			3						
			Середнє						
2.			1						
			2						
			3						
3.			Середнє						
			1						
			2						
			3						
			Середнє						

Примітка. Термопары розміщено під кутами до вертикальної площини:
1 – 0°; 2 – 60°; 3 – 120°; 4 – 180°; 5 – 240°; 6 – 300°.

2.4 Порядок обробки результатів дослідів

Розрахувати середню температуру в кожній точці на поверхні (стовпчики 1 – 6), та середню по поверхні (строчки 1 - 3). Для кожного температурного режиму (кожного значення Q,Вт) визначити:

1) середню температуру поверхні труби, °С:

$$t_c = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}{6}; \quad (2.2)$$

2) температурний напір, °С;

$$\Delta t = t_c - t_p \quad (2.3)$$

3) конвективна складова коефіцієнта тепловіддачі від зовнішньої поверхні труби, Вт/(м²·К):

$$\alpha_2 = \frac{Q}{(t_c - t_p)F} - \frac{\varepsilon C_0}{t_c - t_p} \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_p}{100} \right)^4 \right], \quad (2.4)$$

де F – площа бокової поверхні циліндра, м², $F = \pi dL$; d – діаметр труби, м;
 L – довжина труби, м; ε – ступінь чорноти поверхні циліндра з кераміки,
 $\varepsilon = 0,85$; T_c , T_p – абсолютна середня температура відповідно поверхні циліндра і рідини, К;

4) визначальна температура середовища, за якою вибирають його теплофізичні характеристики і критерій Прандтля, °С:

$$t_0 = 0,5(t_c + t_p); \quad (2.5)$$

5) критерій Грасгофа

$$Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t, \quad (2.6)$$

де $l = d$ у випадку, коли трубу розміщено горизонтально; $l = L$, коли трубу розміщено вертикально; β - коефіцієнт об'ємного розширення для повітря К⁻¹

$$\beta = \frac{1}{273 + t_0}; \quad (2.7)$$

б) критерій Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}. \quad (2.8)$$

Результати обробки звести в табл. 2.2

Таблиця 2.2 – Результати обробки результатів дослідження

Середовище, кут нахилу	t_c , °C	t_p , °C	Δt , °C	Q , Вт	F , М²	α_2 Вт / (м²·К)	t_0 °C	v м²/с	β К ⁻¹	λ , Вт / (м²·К)	l , м	Pr	$Gr \cdot$ $\cdot Pr$	Nu
1														
2														
3														

Дослідні точки нанести на графік у координатах $\lg Nu = f(\lg Gr Pr)$, через точки провести пряму. За дослідною прямою встановити аналітичний вираз функції

$$Nu = c(Gr Pr)^n, \quad (2.9)$$

де c і n – сталі, які визначають з графіка (див. Додаток 3).

За даними табл. 2.1 побудувати графіки зміни температури керамічного циліндра залежно від кута розташування термопар для різних значень потужності.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ТІЛ РАДІАЦІЄЮ

Мета роботи – дослідити процес випромінювання чорних та сірих тіл, визначити ступінь чорноти

4.1 Експериментальне дослідження

Результати експериментального дослідження занести в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Результати експериментально дослідження теплового випромінювання

	Потужність теплового потоку, Вт	Пластина	Номер виміру	Температура пластини, К					Термо-ЕРС, мВ		Ступінь чорноти $\varepsilon = \frac{U}{U_0}$
				t_1	t_2	t_3	t_4	$t_{серед}$	U_0	U	
1		За-чер-нена	1								
			2								
			3								
			Серед								
		Сіра	1								
			2								
			3								
			Серед								
2		За-чер-нена	1								
			2								
			3								
			Серед								
		Сіра	1								
			2								
			3								
			Серед								
3		За-чер-нена	1								
			2								
			3								

			Серед								
		Сіра	1								
			2								
			3								
			Серед								
4		За- чер- нена	1								
			2								
			3								
			Серед								
		Сіра	1								
			2								
			3								
			Серед								

4.2 Порядок обробки результатів дослідів

За трьома вимірами кожної величини розраховують їх середнє значення. Для кожного значення встановленої потужності теплового потоку треба визначити:

1) середню температуру сірої, °С:

$$t_{\text{серед.с}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}; \quad (3.9)$$

та зачерненої пластини, °С:

$$t_{\text{серед}} = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + t_4}{4}$$

2) температурний напір «сіра-рідина», °С:

$$\Delta t_c = t_{\text{серед.с}} - t_p; \quad (3.10)$$

«чорна-рідина», °С:

$$\Delta t = t_{\text{серед}} - t_p;$$

3) ступінь чорноти пластини з полімерного матеріалу за температури, К:

$$T_{\text{серед}} = 273 + t_{\text{серед}}, \quad (3.11)$$

за формулою:

$$\varepsilon = \frac{U}{U_0} \quad (3.12)$$

де U , U_0 – термоЕРС відповідно сірої і зачорненої пластин;

5) поверхневі густини випромінювання чорного і сірого тіл (3.1-3.2);

6) потужність потоку теплового випромінювання, де $F = BH$ – площа випромінюючої поверхні, $B = 0,165$ м; $H = 0,135$ м (3.7);

7) коефіцієнт тепловіддачі випромінювання за (3.8);

Результати обробки дослідних даних звести в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків

Потужність теплового потоку, Вт	$t_{\text{серед}},$ °C	$t_0,$ °C	ε	$E,$ Вт/м ²	$Q_B,$ Вт	$\alpha,$ Вт/(м ² ·К)	Gr	Pr	Gr Pr

За дослідними даними побудувати графік залежності:

$$\lg \alpha = f(\lg Gr Pr),$$

через точки провести апроксимуючу пряму.

За дослідною прямою встановити аналітичний вираз функції

$$\alpha = c(Gr Pr)^n, \quad (3.13)$$

де c і n – сталі, які визначають з графіка (див. Додаток 3)

8) побудувати графіки залежностей $Q_6=f(T)$, $\alpha_6=f(T)$ та зробити висновок за роботою.

Додаток 3. МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ПОХИБКИ ЕКСПЕРИМЕНТУ. ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ

3.1 Загальні відомості про похибку вимірювань

Відомо, що похибки вимірювання фізичних величин прийнято розподіляти на систематичні, випадкові, невизначені та промахи.

Систематична похибка спостерігається у тих випадках, коли середнє значення послідовних відліків відхиляється від відомого точного значення і продовжує відхилятися незалежно від числа відліків або замірів.

Під *випадковою похибкою* вимірювання розуміють похибку, яка змінюється випадковим чином при повторних вимірюваннях.

Невизначена похибка – це похибка, яку неможливо віднести ні до випадкових, ні до систематичних, так як вона включає в себе невиключені залишки систематичних похибок, а також систематичні і випадкові похибки інструментального характеру.

Промахи виникають при незадовільному контролі за змінними в процесі їх зчитування з приладу або вимірах, при незадовільному використанні апаратури, а також при наявності похибки в алгоритмі розрахунку величини, що досліджується.

3.1.1 Систематичні похибки

Математичний характер систематичних похибок беззаперечний і, якщо він відомий, тобто мають певне значення та знак, то можуть бути зменшеними або враховані шляхом внесення відповідних виправлень.

Одним зі способів зменшення систематичної похибки є калібрування приладів та датчиків. Наприклад, це може бути перевірка термопари (приладу для вимірювання температури) по зразковій або робочій термопарі підвищеної точності у всьому діапазоні вимірювання температур.

При використанні контактних термопар систематична похибка може бути викликана порушенням температурного режиму поля об'єкта дослідження через внесення в це поле термоприймача, під впливом термоЕРС на неоднорідностях та вільних кінцях термоелектродів. Систематичні похибки при виконання експериментальних досліджень мають бути ліквідовані або мінімізовані на етапі підготовки до дослідження. Це досягається шляхом використання приладів підвищеного класу точності. Інші групи систематичних похибок враховуються у вигляді виправлень або переводяться в клас невизначених, розподілених в середині відомого інтервалу (ΔQ , ΔT і т.і.) за випадковим законом.

3.1.2 Випадкові похибки

Дослідження і визначення випадкових похибок, які виникають при проведенні експериментального дослідження, виконують на основі законів математичної статистики та теорії імовірності. Показником випадкової похибки являється *дисперсія* (розсіювання), яка дорівнює квадрату середнього квадратичного відхилення одиничного вимірювання (спостереження) від істинного або середнього значення:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n} \quad (3.1)$$

$$S_n = \sum_{i=1}^n \frac{(\mu - x_i)^2}{n} \quad (3.2)$$

де n - число вимірювань;

x_i - окреме вимірювання;

$\bar{x}$ - середнє арифметичне значення величини, що вимірюється;

S_n - дисперсія при $n \rightarrow \infty$;

μ - істинне значення величини яка вимірюється.

Очевидно, що при $n \rightarrow \infty$, $x \rightarrow \mu$ і для неперервної випадкової величини x_i справедливо наступне:

$$x \rightarrow M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xf(x)dx = \mu \quad (3.3)$$

де $M(x)$ - математичне очікування величини x ;

$f(x) = \frac{dP(x)}{dx}$ – густина імовірності випадкової величини x ;

$P(x)$ - імовірність події x .

Як правило розглядається відомий розподіл Гаусса, тобто нормальна крива помилок:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{S_n \cdot 2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2S_n}} \quad (3.4)$$

Формула (3.4) виведена на основі двох аксіом:

1. Позитивне та від'ємне відхилення від істинного значення рівноімовірні.
2. Остаточна похибка кожного вимірювання являє собою результат великої кількості дуже малих похибок, розподілених випадковим чином. Нормальна крива розподілу наведена на рис.3.1.

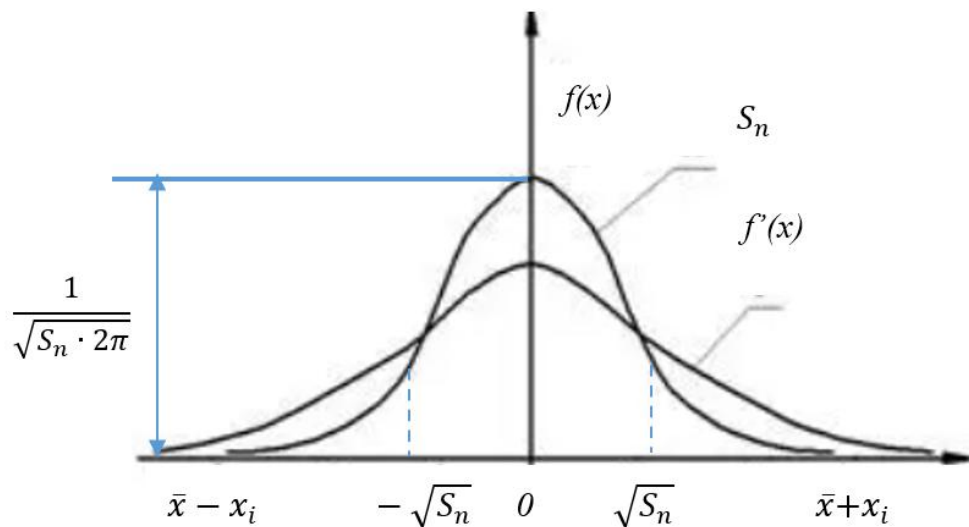


Рисунок 3.1 – Нормальна крива Гауссового розподілу помилок

Імовірність великих похибок дуже мала. Крива функції (3.4) зображена на рис.3.1. Крива побудована при постійних значеннях μ та S_n . Параметр S_n однозначно характеризує форму кривої розподілу випадкових помилок. Ордината кривої $f(x)$ зворотно пропорційна S_n . Так як площа під кривою розподілу завжди дорівнює одиниці, то при збільшенні S_n до S'_n відповідна

крива розподілу $f'(x)$ стає більш пласкою, ніж $f(x)$ і розтягується вздовж осі абсцисс. З іншого боку, при зменшенні S_n крива розподілу розтягується вгору. Таким чином, малій дисперсії S_n відповідає перевага малих випадкових похибок, а разом з тим більша точність вимірів даної величини x . При більшому значенні S_n більші випадкові похибки зустрічаються значно частіше, тобто точність вимірювань зменшується.

Графік функції $f(x)$ неперервний, тобто вона описує сукупність, яка містить нескінченну множину вимірів, яка називається генеральною сукупністю. Якщо досліджувати функцію $f(x)$ на екстремум, то отримаємо точки перегинів з координатами $-\sqrt{S_n}$ та $\sqrt{S_n}$. Площа, обмежена кривою та прямими $x=-\sqrt{S_n}$ та $x=\sqrt{S_n}$, складає 68,3 % площі, обмеженою кривою $f(x)$. Тобто, для генеральної сукупності з імовірністю 0,683 можна стверджувати, що всі відхилення $(\mu-x_i)$ знаходяться всередині інтервала $\mp\sqrt{S_n}$. Звідси витікає, що випадкова помилка окремого вимірювання з генеральної сукупності вимірів визначається як корінь квадратний із дисперсії:

$$\theta(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mu - x_i)^2} \quad (3.5)$$

Але в реальних умовах мають вибірку із кінцевого значення вимірів n . Для кінцевої вибірки даних випадкова похибка окремого вимірювання розраховується за наступною формулою:

$$\theta(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (3.6)$$

Формула (3.6) справедлива для нормального закону розподілу похибок. Зазвичай для великого n допускають нормальний закон, використовуючи деякі методи перевірки нормального розподілу.

При малій кількості спостережень ($n < 20$) і умові що розподіл інших похибок вимірів відповідає нормальному розподілу, використовують виправляючі коефіцієнти, отримані на основі розподілу Стюдента. При $n \geq$

20 розподіл Стюдента переходить в розподіл Гаусса.

Таким чином, для малого числа випадкова похибка $\theta(x_i)$ визначається наступним чином:

$$\theta(x_i) = \xi \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (3.7)$$

де ξ – коефіцієнт Стюдента, знаходиться за таблицею 3.1 за параметрами n і P .

Таблиця 3.1 – Фрагмент таблиці коефіцієнтів Стюдента

P	Кількість вимірів									
	2	3	4	5	6	7	10	50	100	∞
0,68	2	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0
0,95	12,7	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,3	2,0	2,0	2,0
0,99	63,7	9,9	5,8	4,6	4,0	3,7	3,3	2,7	2,6	2,6

В математичній статистиці показано, що середнє значення $\bar{x}$ і дисперсія середнього значення $S(\bar{x})$ також являються випадковими величинами. При чому похибка середнього $\bar{x}$ зворотно пропорційна кореню квадратному з кількості вимірів, по яким отримано це середнє. Тобто, наприклад, якщо при 16 вимірів точність лише в 2 рази вища, ніж при 4, а при 64 вимірах – лише в 3 рази. Однак, всього лише при 4 вимірах точність в 2 рази вища, ніж при одному. Тому на практиці проводять 4-5 повторних вимірювання. Остаточно випадкова помилка середнього результату прямих вимірювань визначається наступним чином:

$$\theta(\bar{x}) = \frac{\theta(x_i)}{\sqrt{n}} = \xi \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2} \quad (3.8)$$

Тобто, можна стверджувати, що з імовірністю $P=0,68$ за межі $\pm\theta(\bar{x})$ не вийдуть значення випадкових відхилень $(\bar{x} - x_i)$ для скінченної виборки з n спостережень.

В інженерних дослідженнях застосовується також значення імовірності $P=0,95$ та $P=0,997$. При цьому величина випадкової помилки буде, відповідно, $2\theta(\bar{x})$ та $3\theta(\bar{x})$.

3.1.3 Невизначені похибки

Невизначені похибки виникають внаслідок неідеальної точності приладів, інструментів та датчиків. В цей клас похибок включають також похибку зчитування результатів зі шкали приладів, похибка заокруглення констант і довідникових даних, і т.і., тобто похибки які можуть бути названі конкретно. Для спрощення невизначені похибки можна назвати похибками дослідно-експериментального характеру і позначити δ . Дослідно-експериментальна похибка середнього вимірювання $\bar{x}$ визначається за формулою:

$$\delta(\bar{x}_i) = \sqrt{\delta_{\text{дат}}^2 + \delta_{\text{прил}}^2 + \delta_{\text{заок}}^2} \quad (3.9)$$

Де $\delta_{\text{дат}}$ - похибка датчика, $\delta_{\text{прил}}$ - похибка приладу, $\delta_{\text{заок}}$ – похибка заокруглення, які визначають наступним чином:

$$\delta_{\text{дат}} = \frac{\delta_{\text{дов}}}{3}; \delta_{\text{пр}} = \frac{KA}{3}; \delta_{\text{заок}} = \frac{\Delta}{\sqrt{12}} \quad (3.10)$$

Де $\delta_{\text{дов}}$ - довідникова похибка приладу;

K – клас точності, в долях одиниці;

A – розмах шкали приладу;

Δ - ціна ділення шкали приладу або одиниця останнього десятичного знака при заокругленні констант або довідникових даних.

Приклад:

Для міліамперметра з безнульвою шкалою і діапазоном вимірювання 25-50 МВ, клас точності 0,5 указані межі допустимої похибки $\delta_0 = \pm 0,5\%$. Клас точності є максимальною похибкою, абсолютне її значення для $P=0,683$ дорівнює:

$$\delta_{\text{пр}} = \frac{0,005(50 - 25)}{3} = 0,042 \text{ мВ}$$

Тобто при використанні мілівольтметра в комплекті з термопарой ТХА (хромель-алюмелева) похибка $\delta_{\text{пр}}$ становить приблизно 0,01 К, а похибка термопари, як датчика становить:

$$\delta_{\text{дат}} = \frac{0,4}{3} = 0,13 \text{ К}$$

Розрахунок $\delta_{\text{дат}}$ за формулою (3.10) впливає із закону рівномірного (прямокутного) розподілу густини імовірності $f(x)$ для Δ , як показано на рис. 3.2

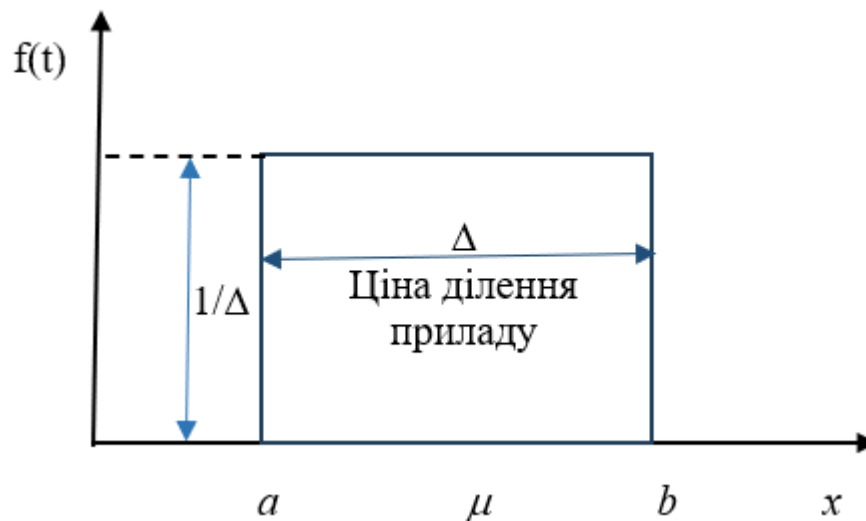


Рисунок 3.2 – Рівномірне розподілення $f(x) = \frac{1}{\Delta} = \frac{1}{b-a}$

$$\delta_{\text{заокр}}^2 = S(x) = M(x^2) - \mu^2 = \int_a^b x^2 f(x) dx - \mu^2 = \left(\frac{b-a}{12}\right)^2 = \frac{\Delta^2}{144}$$

3.2 Повна похибка прямих вимірювань

Прикладами повних вимірювань можуть бути витрати середовища, вимірювання довжини, визначення температури, тощо.

Якщо через випадкову дію дослідно-інструментальних помилок

величини $\bar{x}$ розподілена в інтервалі $\bar{x}_i + \delta(\bar{x}), \bar{x}_i - \delta(\bar{x})$ за нормальним законом, тоді у відповідності до правила складання випадкових одиниць:

$$\sigma(\bar{x}) = \sqrt{\theta^2(\bar{x}) + \delta^2(\bar{x}) + \delta^2(\psi)} \quad (3.11)$$

де $\sigma(\bar{x})$ – повна похибка прямого вимірювання величини x ;

$\delta^2(\psi)$ – сумарна похибка виправлень.

Остаточний результат прямих вимірювань представлено в наступному вигляді:

$$x' = \sqrt{x(1 + \sum \psi_i) \mp \sigma(\bar{x})} \quad \text{імовірність } P=0,68; \quad (3.12)$$

$$x' = \sqrt{x(1 + \sum \psi_i) \mp 2\sigma(\bar{x})} \quad \text{імовірність } P=0,95 \quad (3.13)$$

$$x' = \sqrt{x(1 + \sum \psi_i) \mp 3\sigma(\bar{x})} \quad \text{імовірність } P=0,99, \quad (3.14)$$

де x' – справжнє значення величини x , що вимірюється, $\sigma(\bar{x}), 2\sigma(\bar{x}), 3\sigma(\bar{x})$ – границі довірчих інтервалів, ψ_i – виправлення надію систематичної похибки i -го характеру, наприклад відхилення стрілки приладу від нульового значення, відхилення температури холодних спаїв термопар, тощо.

Визначення: Повна похибка середнього результату вимірювання називається похибка, розрахована таким чином, що істинне значення величини x знаходиться в середині інтервалу $\bar{x} \mp \sigma(\bar{x})$ з імовірністю $P=0,68$.

Порядок розрахунку

1. Маємо виборку значень $x_1, x_2, x_3, \dots$ величини, яку вимірюємо. Аналізуємо з точки зору різкого відхилення величини і виключаємо її із виборки.
2. За формулами 3.9 – 3.10 розраховуємо дослідно-інструментальну похибку виміру величини, користуючись при цьому довідниковими і паспортними даними на прилади.
3. За формулою 3.1 знаходимо $\bar{x}$.

4. За таблицею 3.1 обираємо коефіцієнт Стюдента.
5. За формулою 3.8 розраховуємо випадкову помилку.
6. Оцінюємо систематичні похибки Δx_i (якщо вони є) і розраховуємо виправлення ψ_i .
7. За формулою 2.9 розраховуємо похибку кожного виправлення $\sigma(\psi_i)$ та сумарну похибку :

$$\sigma(\psi) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma^2(\psi_i)} \quad (3.15)$$

8. За формулою 3.11 визначаємо повну похибку результату $\bar{x}$ при $P=0,68$.
9. Представляємо отриманий результат у вигляді 3.12 або 3.13 чи 3.14.

3.4 Графічне представлення експериментальних даних

Метою експериментального дослідження є визначення числового значення величини, що досліджується. Наприклад, для результату експериментального дослідження коефіцієнта тепловіддачі можна записати:

$$\alpha = \bar{\alpha}(1 \pm 0,1) \mp 0,42, \quad P=0,68,$$

Що означає: істинне значення α з імовірністю 0,68 знаходиться в середині інтервала $(1,1\bar{\alpha} - 0,42) - (1,1\bar{\alpha} + 0,42)$. Якщо є набір даних, результат можна представити графічно.

Основні правила представлення графічного матеріалу.

1. Вибір довжини шкали відбувається таким чином, щоб максимально заповнити поле побудови графіка (рис. 3.3).
2. По можливості для будь якого набору даних x, y будується лінійний графік. Це зручно для інтерполяції та екстраполяції отриманих даних. Якщо лінійний графік побудувати неможливо, можна

скористуватися логарифмічними координатами (рис.3.4).

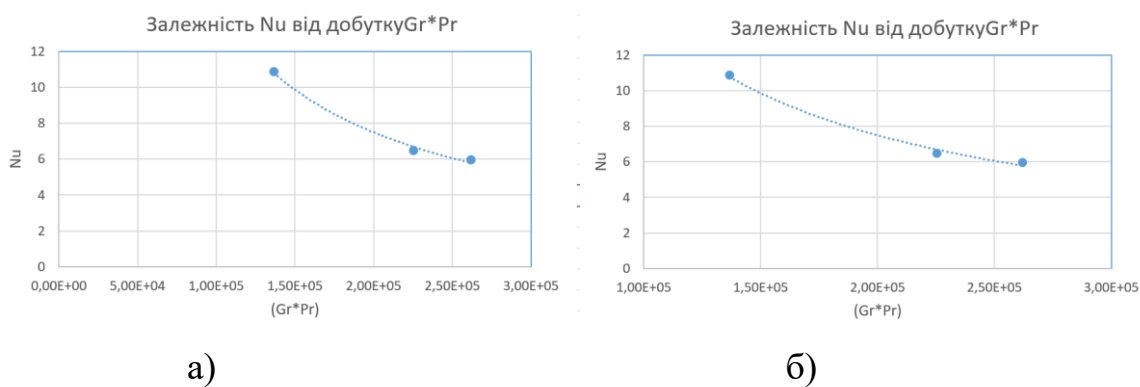


Рисунок 3.3 – Використання поля діаграми: а) нераціональне; б) раціональне.

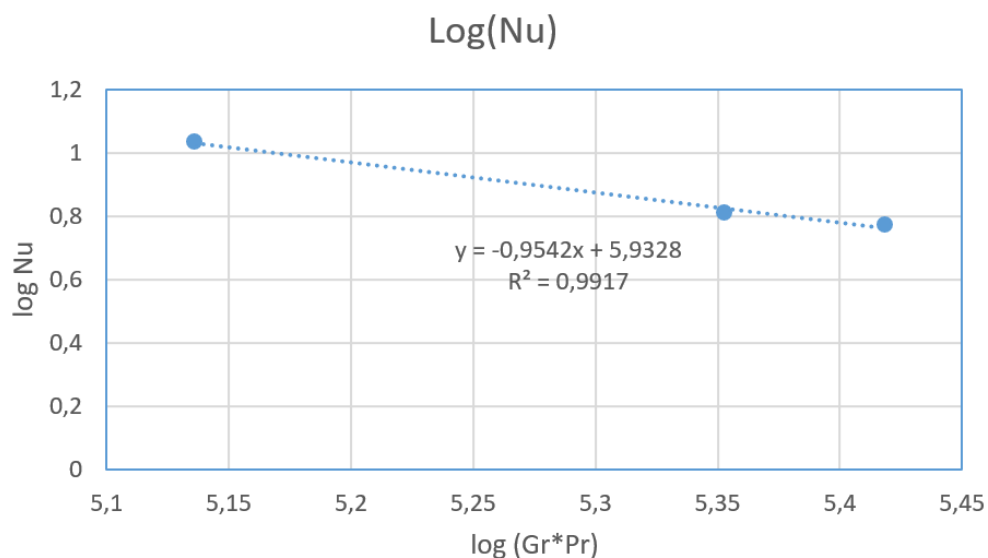


Рисунок 3.4 – Побудова графіка залежностей логарифмів дослідних величин.

Відомо, що графік степеневої функції

$$y = Cx^n \quad (3.16)$$

в логарифмічних координатах має вигляд прямої:

$$\lg y = \lg C + n \lg x \quad (3.17)$$

де C і n – сталі величини.

Із побудованого графіка (рис. 3.4) можна отримати сталі C і n наступним чином. n – це тангенс кута нахилу прямої. В полі діаграми будуємо прямокутний трикутник таким чином, що б його гіпотенуза лежала на прямій (рис. 3.5), визначаємо довжину катетів та порахуємо тангенс гострого кута α .

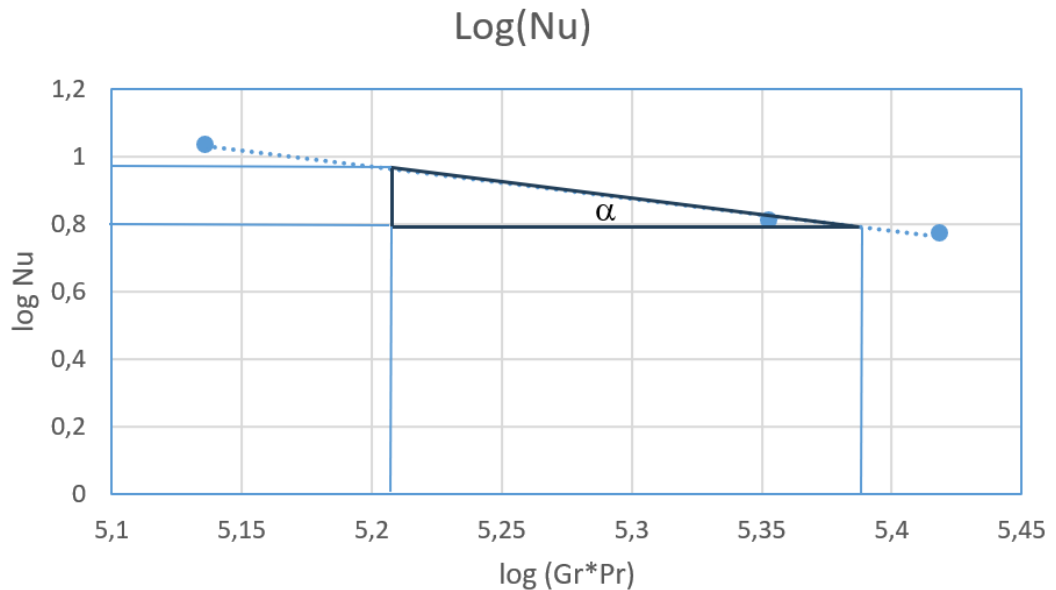


Рисунок 3.5 – Визначення сталих величин для степеневої функції

$$n = \operatorname{tg} \alpha = \frac{0.98 - 0.8}{5.21 - 5.39} = -1.055$$

Так як отримана функція спадає, то показник степені має від'ємне значення. Для зростаючої функції він буде мати позитивне значення.

Для визначення стало C на графіку функції необхідно побудувати будь-яку точку (наприклад, з координатами $\lg x = 5.21; \lg y = 0.99$), підставити їх у рівняння 3.17 та отримати значення $\lg C$:

$$\lg y - n \lg x = \lg C$$

$$\lg C = 0.99 - (-1.055 * 5.21) = 6.49$$

Звідки знаходимо $C = 10^{6.49} = 3090259$.

Тобто отримана функція має наступний аналітичний опис:

$$y = 3090259x^{-1,055}$$

Значно точніший результат можна отримати, застосовуючи для обробки даних, наприклад, додаток Excel. Для цього необхідно задати лінію тренду "Лінійну» та показувати в полі діаграми отримане рівняння (рис.3.6).

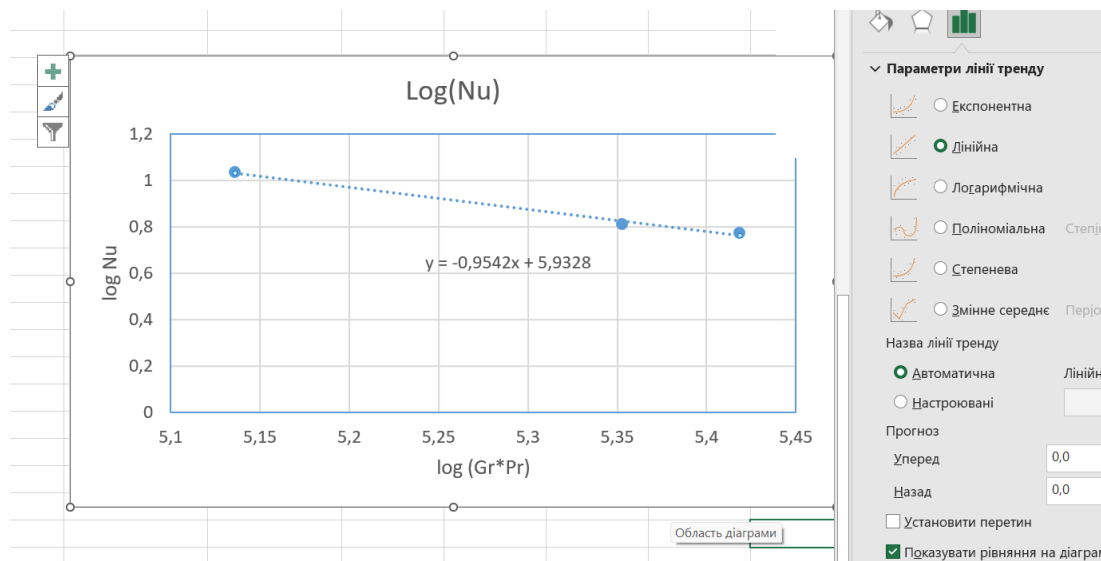


Рисунок 3.6 – Обробка експериментальних даних в програмі Excel

За отриманим графіком знаходимо $n=-0.9542$, $\lg C=5,9328$. Подальша обробка така сама, як описано вище.

Ще простіше побудувати отримані графік залежності отриманих даних і зразу задати лінію тренду, що відповідає функціональній залежності, яку ви бажаєте отримати. Для степеневої функції, якою описується критеріальне рівняння залежності числа Нусельта від добутку Грасгофа на Прандтль, обирають лінію тренду «Степенева» (рис.3.7).

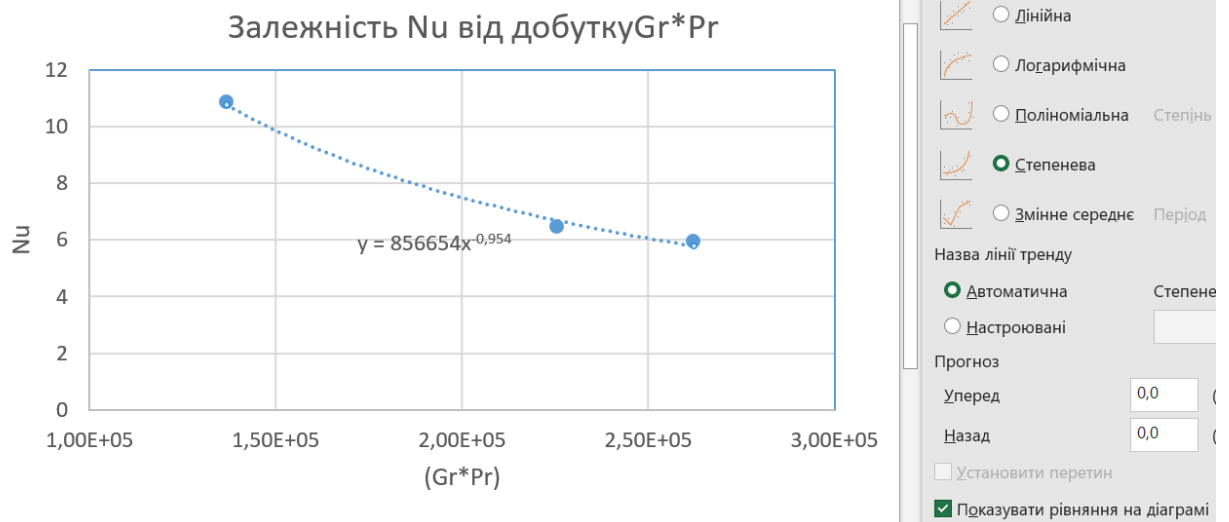


Рисунок 3.7 – Побудова степеневої залежності за допомогою програми Excel

Таким чином, ми зразу можемо отримати сталу C та показник степені n .
Отримане критеріальне рівняння буде мати наступний вигляд:

$$Nu = 856654(Gr * Pr)^{-0.954}$$

Додаток 4. ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗА ДОВІДНИКАМИ

4.1 Теоретичні відомості

При дослідженнях теплових процесів часто необхідно користуватися довідником для визначення фізичних властивостей матеріалів, крапельних рідин та газів. Рідини характеризуються наступними фізичними властивостями:

- *густиною* називають масу рідини, що міститься в одиниці об'єму:
$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ кг/м}^3;$$
- *температурне розширення* крапельних рідин та газів характеризується коефіцієнтом об'ємного розширення, який виражає відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на 1 К: $\beta_t = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}, 1/\text{К}.$
- *коефіцієнт динамічної в'язкості* або просто *динамічна в'язкість* характеризує опір рідини зсуву окремих її шарів. В'язкість крапельних рідин, як правило, зменшується з підвищенням температури внаслідок збільшення відстані між молекулами та послаблення сил притягування між ними, в'язкість пружних рідин зростає з підвищенням температури і тиску внаслідок інтенсифікації теплового руху і обміну імпульсами між шарами потоку. Величина μ визначається дослідним шляхом і наводиться в довідковій літературі. В інженерних розрахунках часто використовують поняття *кінематичної в'язкості*, яка виражає співвідношення динамічної в'язкості та густини рідини $\nu = \mu / \rho, \text{ м}^2/\text{с}.$

Властивості рідини є функцією її параметрів – температури, $t, ^\circ\text{C}$ та тиску $p, \text{ Па}.$ Тому в довідниковій літературі властивості рідин та газів задаються в аналітичному, табличному або графічному вигляді. При розв'язанні задач

необхідно визначити властивості рідини при певних значеннях температури та тиску, користуючись довідниковою літературою.

Приклади визначення властивостей

Задача: визначити теплопровідність повітря, λ Вт/(м·К), при температурі $t_0=32^\circ\text{C}$.

Розв'язання:

Дано: рідина – повітря;

$t_0=32^\circ\text{C}$.

Знайти: λ , Вт/(м·К).

Із табл. Д1 «Фізичні властивості сухого повітря» знаходимо значення теплопровідності при $t=30^\circ\text{C}$ та $t=40^\circ\text{C}$.

$t=30^\circ\text{C}$ $\lambda_{30}=2,67 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К);

$t=40^\circ\text{C}$ $\lambda_{40}=2,76 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К).

Вважаємо, що між цими точками функція зростає лінійно (рис.1). Тоді можна скористатися формулою лінійної інтерполяції: $f(x) = f(x_0) + \frac{f(x_1)-f(x_0)}{x_1-x_0}(x - x_0)$.

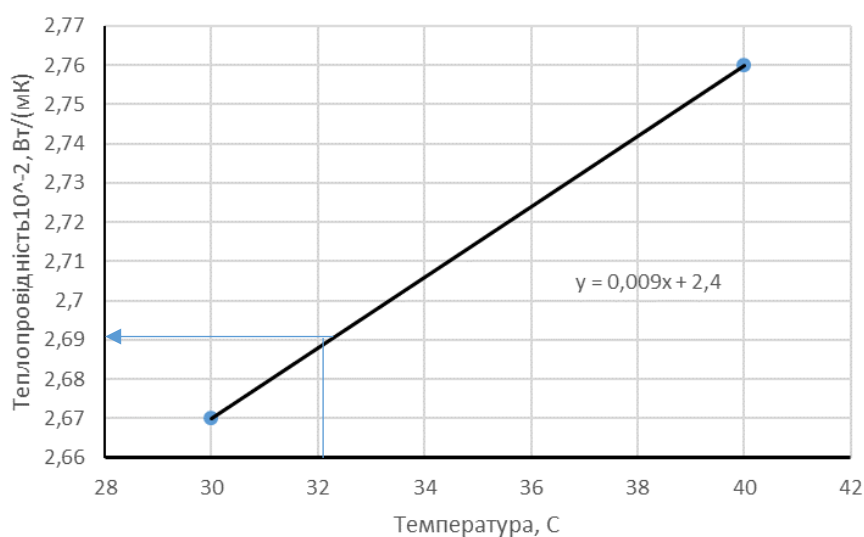


Рисунок 4.1 - До визначення теплопровідності шляхом лінійної інтерполяції

Розрахуємо теплопровідність повітря при температурі $t_0=32^\circ\text{C}$ при табличному завданні функції.

$$\lambda_{32} = \lambda_{30} + \frac{\lambda_{40}-\lambda_{30}}{40-30}(32-30) = 2,67 \cdot 10^{-2} + \frac{(2,76-2,67) \cdot 10^{-2}}{10}(2) = 2,688 \cdot 10^{-2} \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right).$$

При аналітичному завданні (згідно лінійної функції, визначеної за графіком на рис.1): $\lambda = 0,009 \cdot t + 2,4 = 0,009 \cdot 32 + 2,4 = 2,688 \cdot 10^{-2}, \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right).$

При графічному завданні – див. рис.1, $\lambda = 2,69 \cdot 10^{-2}, \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}} \right)$

Задача: Визначити кінематичну в'язкість води (Додаток 5) на лінії насичення при $t_0=127^\circ\text{C}$.

Розв'язання:

Дано: рідина – вода;

$$t_0=127^\circ\text{C}.$$

Знайти: ν , $\text{м}^2/\text{с}$

Із табл. «Фізичні властивості води на лінії насичення» знаходимо значення кінематичної в'язкості при $t=120^\circ\text{C}$ та $t=130^\circ\text{C}$.

$$t=120^\circ\text{C} \quad \nu_{120}=0,252 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$t=130^\circ\text{C} \quad \nu_{130}=0,233 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Вважаємо, що між цими точками функція спадає лінійно (рис.2). Тоді можна скористатися формулою лінійної інтерполяції: $f(x) = f(x_0) -$

$$\frac{f(x_0)-f(x_1)}{x_1-x_0}(x-x_0).$$

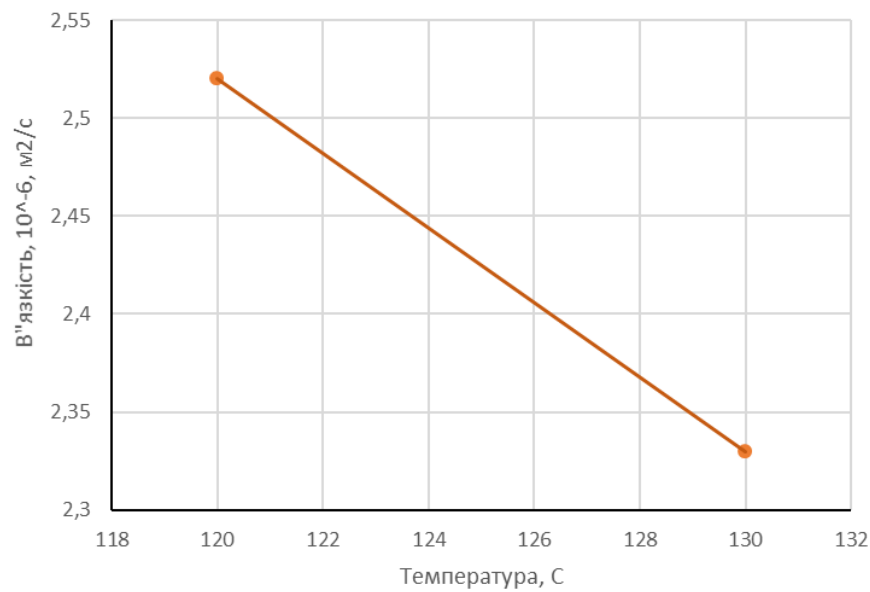


Рисунок 4.2 - До визначення кінематичної в'язкості методом лінійної інтерполяції

Розрахуємо кінематичну в'язкість повітря при температурі $t_0=127^\circ\text{C}$.

$$\nu_{127} = \nu_{120} - \frac{\nu_{120} - \nu_{130}}{130 - 120} (127 - 120) = 0,252 - \frac{0,252 - 0,233}{130 - 120} (127 - 120) = 0,2387 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Задача: Визначити коефіцієнт об'ємного розширення для повітря і води при температурі 140°C .

Розв'язання:

Дано: рідина – повітря; вода;

$t=140^\circ\text{C}$.

Знайти: β , $1/\text{K}$.

Для рідин, які стискаються (гази) коефіцієнт об'ємного розширення

знаходиться за формулою: $\beta_t = \frac{1}{t+273} = 2,4 \cdot 10^{-3} 1/\text{K}$.

Для рідин, які не стискаються (крапельні рідини) коефіцієнт об'ємного розширення знаходиться за довідником: для води $\beta_{140} = 9,72 \cdot 10^{-4} 1/K$.

Додаток 5 - Фізичні властивості води на лінії насичення

t, °C	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$c_p, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{K)}$	$\lambda, \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$	$\alpha \cdot 10^8, \text{ м}^2/\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{ K}^{-1}$	Pr
0	999,9	4,212	0,551	13,1	1,78	-0,63	13,67
10	999,7	4,191	0,574	13,7	1,306	0,70	9,52
20	998,2	4,183	0,599	14,3	1,006	1,82	7,02
30	995,7	4,174	0,618	14,9	0,805	3,21	5,42
40	992,2	4,174	0,635	15,3	0,669	3,87	4,31
50	988,1	4,174	0,648	15,7	0,556	4,49	3,54
60	983,2	4,179	0,658	16,0	0,478	5,11	2,98
70	977,8	4,187	0,674	16,3	0,415	5,7	2,55
80	971,8	4,195	0,680	16,6	0,365	6,32	2,21
90	965,3	4,208	0,683	16,8	0,326	6,95	1,95
100	958,4	4,220	0,685	16,9	0,295	7,52	1,75
110	961,0	4,233	0,686	17,0	0,272	8,08	1,6
120	943,1	4,250	0,686	17,1	0,252	8,64	1,47
130	934,8	4,266	0,686	17,2	0,233	9,19	1,36
140	926,1	4,287	0,685	17,2	0,217	9,72	1,25
150	917,0	4,313	0,684	17,3	0,203	10,3	1,17
160	907,4	4,346	0,683	17,3	0,191	10,7	1,10
170	897,3	4,380	0,679	17,3	0,181	11,3	1,05
180	886,9	4,417	0,674	17,2	0,173	11,9	1,00
190	876,0	4,459	0,670	17,1	0,165	12,6	0,96
200	853,0	4,505	0,668	17,0	0,158	13,3	0,93

Додаток 6 – Ступінь чорноти матеріалів

Матеріал	Ступінь чорноти	Матеріал	Ступінь чорноти
Алюміній: – полірований	0,048 0,15	Латунь - окислена	0,6
- окислений	0,55	- полірована	0,03
- шорсткий			
Бетон	0,8	Мідь - окислена	0,62 0,02
		- полірована	
Вода	0,93	Сталь - листова	0,6
Гіпс	0,78-0,9		0,54
Дерево стругане	0,9	Хром	0,17
Залізо необроблене	0,91	Чавун - обточений	0,65
Кладка з червоної цегли	0,93	- окислений	0,96
Кладка з шамоту	0,8	Штукатурка	0,93

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Теоретичні основи теплотехніки. Константинов С.М., Панов Є.М. – Київ: Вид-во «Золоті ворота», 2012. – 592 с.
2. Теплообмін. Константинов С.М. Теплообмін. – Київ: «Політехніка», 2005. – 303 с.
3. Луцик Р.В. Теплообмін. – К.: КНУТД, 2004. – 126 с.
4. Збірник задач з технічної термодинаміки та теплообміну: навч. посібник. Константинов С.М., Луцик Р.В. – К.: «Освіта України», 2009. – 543 с.
5. Коваленко І.В., Малиновский В.В. Навчальні дослідження процесів, машин та апаратів хімічних виробництв : навч. посіб.. Київ : «Норіта-плюс», 2006. 160 с.
6. Чинков В. М. Основи метрології та вимірювальної техніки: Навч. посібн. - 2-ге вид., перероб. і доп. - Харків: НТУ «ХПІ», 2005. –524 с. 2. JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM).
7. Захаров І.П. Порівняльний аналіз характеристик точності вимірювань: монографія/ І.П. Захаров. - Харків: Оберіг, 2019. - 100 с. 4. Дорожовець М., Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А. Основи метрології та вимірювальної техніки. – У 2-х томах.– Львів: Вид-во Національного університету «Львівська політехніка». - 2005.
8. OIML R-34 Accuracy classes of measuring instruments. Edition 1979. International recommendation.
9. Забезпечення єдності електрорадіовимірювань// за редакцією д.т.н., проф. Ю. Ф. Павленка (навч. посібник). - Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 232 с.
10. EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration. Publication reference. 8. Semyon G. Rabinovich. Measurements

errors and uncertainties. Theory and practice. Third edition. Springer Science and Media, Inc. USA. – 2005. - 308 p.

- 11.Рябчий В.А., Рябчий В.В. Теорія похибок вимірювань: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2006. – 166 с.