

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ  
КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ**

**Кваліфікаційна робота**  
**другий магістерський**  
(рівень вищої освіти)

на тему Аналіз процесу нагрівання масивних тіл в електричній камерній печі

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1449з  
спеціальності 144 Теплоенергетика  
(код і назва спеціальності)  
освітньої програми «Теплоенергетика»  
(код і назва освітньої програми)  
спеціалізації \_\_\_\_\_  
(код і назва спеціалізації)

Чиж Д.С.  
(ініціали та прізвище)

Керівник доц. каф. МБГ, к.арх.н. Сазонова О.Ю.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Рецензент проректор з науково-педагогічної роботи та  
технічної освіти, професор, д.т.н. Банах В.А.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, підпис, ініціали та прізвище)

Запоріжжя  
2020

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики  
Рівень вищої освіти другий магістерський  
Спеціальність 144 Теплоенергетика  
(код та назва)  
Освітня програма Теплоенергетика  
(код та назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_  
(код та назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_

« 07 » грудня 2020 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Чижу Дмитру Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз процесу нагрівання масивних тіл в електричній камерній печі

керівник роботи Сазонова Оксана Юріївна к.арх. н., доцент  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом ЗНУ від «25» травня 2020 року № 601-с


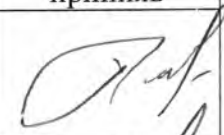

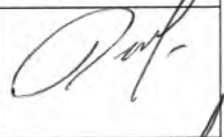


2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2020р.

Вихідні дані до роботи Радіус тіла, що нагрівається  $R = 0,0225\text{м}$ . Матеріал – шамот. Приведений коефіцієнт випромінювання в печі  $C_{печ} = 4,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз літературних джерел за тематикою дослідження. 2. Аналіз процесу нагрівання масивних тіл при постійній температурі печі. 3. Кінцево – різницеві схеми рішення завдань нагріву. 4. Розробка заходів з охорони праці та техногенної безпеки.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1. Схема експериментальної установки. 2. Швидкість зміни температури в залежності від форми тіла 3. Теплова діаграма. 4. Зміна різниці температур поверхні тіла та центру в часі. 5. Зміна щільності теплового потоку в часі. 6. Зміна коефіцієнту тепловіддачі в часі.

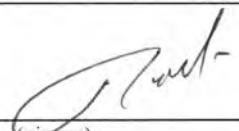
## 5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 розділ	Сазонова О.Ю. к.арх. н., доцент кафедри міського будівництва та господарства		
2 розділ	Сазонова О.Ю. к.арх. н., доцент кафедри міського будівництва та господарства		
Охорона праці та техногенна безпека	Сазонова О.Ю. к.арх. н., доцент кафедри міського будівництва та господарства		

6 Дата видачі завдання 1 червня 2020 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	1. Аналіз літературних джерел за тематикою дослідження	1.06.2020- 1.08.2020	
2	Аналіз процесу нагрівання масивних тіл при постійній температурі печі.	1.08.2020- 1.10.2020	
3	Розробка заходів з охорони праці і техніка безпеки	1.10.2020- 1.11.2020	
4	Розробка графічного та презентаційного матеріалу	1.11.2020- 1.12.2020	

Студент  Д.С. Чиж  
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)  О.Ю. Сазонова  
(підпис) (ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер  Ю.М. Каюков  
(підпис) (ініціали та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Чиж Д.С. Аналіз процесу нагрівання масивних тіл в електричній камерній печі

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник О.Ю. Сазонова. Запорізький національний університет. Інженерний навчально – науковий інститут. Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2020.

У кваліфікаційній роботі магістра виконано аналіз літературних джерел щодо дослідження процесів нестационарної теплопровідності, які відбуваються при нагріванні масивних тіл. На основі виконаного аналізу було обрано методику проведення фізичного експерименту по дослідженню процесу нагрівання термічно масивних тіл при постійній температурі печі. Отримано експериментальні дані температури зразка як на поверхні так і у центрі. Побудовано графіки залежності температури печі та тіла від часу нагрівання. За розрахунковими даними отримано залежності щільності теплового потоку та коефіцієнту тепловіддачі від часу нагрівання. Отримано тривалість нагрівання у кожному інтервалі, а також загальний час нагрівання.

Ключові слова: теплообмін, критерій Біо, щільність теплового потоку, коефіцієнт тепловіддачі, термічно масивне тіло, шамот, коефіцієнт теплопровідності.

## ABSTRACT

Chizh D. Analysis of the heating process of massive bodies in an electric chamber furnace

Qualification final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Heat Power Engineering, supervisor O. Sazonova. Zaporizhzhya National University. Engineering educational and scientific institute. Department of Heat Power Engineering and Hydropower Engineering, 2020.

In the qualification work of the master the analysis of literature sources concerning research of processes of nonstationary thermal conductivity which occur at heating of massive bodies is executed. Based on the performed analysis, the method of conducting a physical experiment to study the process of heating thermally massive bodies at a constant furnace temperature was chosen. Experimental temperature data of the sample both on the surface and in the center were obtained. Graphs of dependence of furnace and body temperature on heating time are constructed. According to the calculated data, the dependences of the heat flux density and heat transfer coefficient on the heating time are obtained. The duration of heating in each interval, as well as the total heating time were obtained.

Key words: heat transfer, Bio criterion, heat flux density, heat transfer coefficient, thermally massive body, fireclay, thermal conductivity coefficient.

#### АННОТАЦИЯ

Чиж Д.С. Анализ процесса нагрева массивных тел в электрической камерной печи

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 144 - Теплоэнергетика, научный руководитель А.Ю. Сазонова. Запорожский национальный университет. Инженерный учебно - научный институт. Кафедра теплоэнергетики и гидроэнергетики, 2020.

В квалификационной работе магистра выполнен анализ литературных источников по исследованию процессов нестационарной теплопроводности, которые происходят при нагревании массивных тел. На основе выполненного анализа была выбрана методика проведения физического эксперимента по исследованию процесса нагрева термически массивных тел при постоянной температуре печи. Получены экспериментальные данные температуры образца как на поверхности, так и в центре. Построены графики зависимости температуры печи и тела в зависимости от времени нагрева.

По расчетным данным получены зависимости плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи от времени нагрева. Получена продолжительность нагрева в каждом интервале, а также общее время нагрева.

Ключевые слова: теплообмен, критерий Био, плотность теплового потока, коэффициент теплоотдачи, термически массивное тело, шамот, коэффициент теплопроводности.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	9
1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	10
1.1. Устрій і призначення елементів конструкції ВТТУ .....	10
1.2. Класифікація високотемпературних теплотехнологічних установок ...	13
1.3 Розвиток науки про печі.....	16
1.4 Призначення та параметри нагрівання сталі. Якість нагріву, види браку .....	19
1.5 Теплові і температурні режими нагрівання металу .....	22
1.6 Загальні положення нестационарної теплопровідності .....	24
1.7 Аналітичне описання процесу .....	25
1.7.1 Охолодження (нагрівання) необмеженої пластини.....	26
1.7.2 Залежність процесу охолодження (нагрівання) від форми і розмірів тіла .....	29
1.7.3 Регулярний режим охолодження (нагрівання) тіл.....	31
1.8 Наближені методи вирішення задач теплопровідності.....	35
2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ МАСИВНИХ ТІЛ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ КАМЕРНІЙ ПЕЧІ.....	38
2.1 Теоретичні дані .....	38
2.1.1 Метод розрахунку по графіками .....	39
2.1.2 Метод теплової діаграми.....	40
2.2 Опис експериментальної установки.....	40
2.2.1 Порядок виконання роботи.....	42
2.2.2 Обробка результатів експериментальних даних .....	43
2.3 Розрахунок тривалості нагрівання по графіках .....	45

2.3.1 Розрахунок теплових потоків .....	45
2.3.2 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі .....	45
2.4 Кінцево-різницеві схеми рішення завдань нагріву.....	52
<b>3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА .....</b>	<b>67</b>
3.1 Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	67
3.2 Заходи з поліпшення умов праці .....	69
3.3 Виробнича санітарія .....	69
3.4 Електробезпека.....	71
3.5 Пожежна безпека.....	73
3.6 Розрахунок захисного заземлення.....	74
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>77</b>
<b>ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....</b>	<b>78</b>



## ВСТУП

*Актуальність теми.* Питання теплообміну теплових режимів основних високотемпературних установок нерозривно пов'язані з питаннями енерго та ресурсозбереження. Тому дослідження теплових процесів, що відбуваються при нагріванні термічно масивних тіл при постійній температурі печі є актуальною задачею.

*Об'єкт дослідження* – процеси нестационарної теплопровідності при нагріванні термічно масивних тіл.

*Предмет дослідження :*

– вплив часу нагрівання на зміну температури центру та поверхні зразка.

*Мета роботи* – є дослідити процес нагрівання термічно масивних тіл циліндричної форми при постійній температурі печі

*Задачі дослідження.* Для досягнення поставленої мети в роботі визначено ряд задач:

– визначити динаміку зміни температури тіла;  
– визначити зміну щільності теплового потоку та коефіцієнту тепловіддачі в часі.

*Методи та засоби дослідження.* Задачі дослідження виконувались шляхом проведення фізичного експерименту . В роботі використані основні теоретичні положення нестационарних процесів теплопровідності.

*Практична цінність* цієї роботи в наступному:

Набуті результати можуть бути використані при розробці лабораторного практикума з курсу «Тепломасообмін».

*Апробація роботи.* Положення роботи викладені на наступних конференціях: загальноуніверситетській конференції «Молода наука» 2020.

*Структура та обсяг роботи.* Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилань. Загальний обсяг сторінок - 81.

## 1 ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 1.1. Устрій і призначення елементів конструкції ВТТУ

Теплотехнологічна установка (піч-агрегат) являє собою сукупність робочого простору, у межах якого здійснюється високотемпературний процес, і устаткування, що забезпечує його реалізацію.

Пічна установка, незалежно від технологічного призначення включає наступні основні елементи:

- робочий простір (реактор);
- огороження;
- систему підведення джерела теплоти;
- систему відводу відпрацьованих газів;
- систему утилізації теплоти газів, що відходять;
- систему контролю й автоматичного управління.

Робочий простір являє собою камеру, обгороджену вогнетривкою кладкою. В її об'ємі здійснюються процеси генерації тепла, руху газів і матеріалів, тепломасообміну, фізико-хімічного перетворення сировини в продукт необхідної якості.

Форма робочого простору залежить від виду і способу транспортування оброблюваного матеріалу, умов теплообміну й інших чинників. Так, нагрівання у щільному шарі матеріалу здійснюється у вертикальних шахтних печах з камерою круглого перетину або трубчастих печах з нахиленим реактором. Для нагрівання заготовок перед прокаткою застосовуються горизонтальні витягнуті в довжину або кільцеві камери з прямокутним поперечним перетином. Для зниження втрат теплоти робочий простір відокремлюється від навколишнього середовища огороженням. Неодмінною частиною огороження є вогнетривкий шар, що працює при високих температурах.

Верхня частина огороження реактора називається склепінням. Їх класифікують за формою на циліндричні, купольні й плоскі; за способом

кріплення - на розпирні, розпирно-підвісні та підвісні. Воно може бути рухомим або нерухомим. Рухоме склепіння необхідне для завантаження і вивантаження матеріалу. У цьому випадку верхню частину огороження називають кришкою.

Проліт розпирних склепінь обмежений припустимими напругами і для більшості вогнетривів не перевищує трьох метрів. У розпирно-підвісних склепіннях частина ваги передається через підвіски на каркас, і напруги у вогнетриві знижуються до припустимих значень. Підвісні склепіння цілком передають вагу на каркас за допомогою підвіски штучних виробів і можуть перекривати проліт до (10...12) метрів.

Конструктивний елемент, що обгороджує робочий простір з боків і торців, називається стіною. У стінах використовують огороження всіх типів - вогнетривку кладку, монолітну і примусово-охолоджувальну футеровку.

Вогнетривка кладка, як правило, багатошарова. Функції її шарів поділені так: футеровка (внутрішній шар кладки) протистоїть руйнівним впливам високих температур, теплова ізоляція знижує тепловий потік через огороження, ущільнюючий шар його герметизують. При виконанні багатошарової кладки окремі ари по товщині стіни перев'язуються між собою для підвищення стійкості конструкції. Висота стін обмежена деформацією вогнетриву під навантаженням за високих температур. Механічна міцність і стійкість стіни забезпечується, якщо відношення висоти стіни до її товщини складає менше 20. Отвори і прорізи в стінах перекриваються натесом, напуском або аркою. Стіни спираються безпосередньо на каркас або під установки, що лежить на нижній рамі каркаса.

Нижня частина огороження, на якій розміщується оброблюваний матеріал, називається подом. Подам робочих камер установок для переробки твердих технологічних матеріалів мають бути притаманні висока вогнетривкість, механічна міцність, хімічна й ерозійна стійкість, а подам плавильних установок - шлакостійкість і висока щільність.

Под печі буває рухомий і нерухомий. У техніці зустрічаються наступні види рухомого поду: висувний (для відпалу або нормалізації великих поковок і виливків), викочувальний (для великотоннажних виробів), обертовий (для нагрівання круглих зливків або заготовок), крокуючий (для нагрівання заготовок прямокутного і квадратного перетину), роликовий (для нагрівання труб або листа).

Система підведення джерела тепла включає мережу газо- і повітропроводів, пристрої для спалювання палива і дуттьове устаткування (вентилятори або компресори). Основне призначення пристроїв для спалювання палива – організація процесу змішання палива з окислювачем. У залежності від організації процесу змішання газу з окислювачем розрізняють пальники з повним попереднім перемішуванням, з частковим і без попереднього перемішування.

Система відводу відпрацьованих газів включає мережу димових лежаків (боровів) і пристрої для створення необхідного розрядження в робочому просторі (димові труби і димососи). Лежаками (боровами) називаються футеровані канали для транспортування газового середовища, що відходить з печі, до викидних труб.

Система утилізації теплоти димових газів включає теплообмінники (рекуператори і регенератори), призначені для підігрівання газу і повітря, а також котли-утилізатори, призначені для одержання гарячої води і пари. У рекуператорі теплота від теплоносія, що охолоджується, (диму) безперервно передається теплоносієві, що нагрівається (повітрю або газу) через стінку, яка їх поділяє.

Рекуператори бувають металеві, керамічні і металокерамічні. Розрізняють радіаційні, конвективні та радіаційно-конвективні теплообмінники.

У регенеративному теплообміннику обидва теплоносії - що охолоджується та нагрівається, поперемінно омивають одну й ту ж саму

поверхню теплообміну, утворену вогнетривкою або металевою насадкою в камері теплообмінника.

Система контролю й автоматичного управління включає безперервний контроль температури і тиску в робочому просторі печі; вимірювання витрат, тиску і температури газу і повітря, що йдуть на горіння; вимірювання температур диму до і після теплообмінника; вимірювання розрядження в димовому лежаку і контроль якості спалювання палива за вмістом кисню в продуктах його згоряння. Крім

контролю системою передбачено автоматичне підтримання в робочому просторі

печі температури і тиску, а також регулювання співвідношення «газ-повітря».

## 1.2. Класифікація високотемпературних теплотехнологічних установок

У сучасному металургійному виробництві використовується найрізноманітніші теплотехнологічні установки. Для полегшення його вивчення вводиться класифікація, зроблена на основі врахування загальних ознак, що виділяють групу об'єктів із множини. Класифікація печей металургійного виробництва виглядає таким чином:

### 1. За технологічним призначенням

За цією ознакою всі печі поділяються на випалювальні, плавильні, нагрівальні і термічні. До випалювальних печей відносяться установки, в яких тепловій обробці піддається попередньо подрібнений матеріал з метою одержання щільного конгломерату. Теплова обробка матеріалів у плавильних печах здійснюється з метою відновлення речовин і видалення шкідливих домішок. Характерною рисою таких установок є зміна агрегатного стану матеріалу. Прикладами плавильних печей є доменні, мартенівські, електродугові печі, а також конвертори, вагранки, індукційні й інші подібні агрегати. У нагрівальних печах теплова обробка матеріалів здійснюється з

метою додавання їм пластичних властивостей (колодязі, методичні і кільцеві печі, печі з крокуючими балками і подом).

У термічних печах регламентоване нагрівання здійснюється для додавання матеріалові необхідних технологічних властивостей. Приклади: роликові, секційні, ковпакові печі.

## 2. За видом енергії, яка використовується.

За цією ознакою печі поділяються на паливні й електричні. У паливних печах як джерело тепла використовується паливо (тверде, азовидне або рідке), а електричних - електроенергія. Прикладами паливних установок є доменні печі, нагрівальні колодязі, печі з крокуючим подом і балками. Електродугові, індукційні й печі опору відносяться до електричних агрегатів.

Особливістю цієї групи печей є те, що незалежно від виду енергії, що використовується, вона перетворюється в теплову, яка і здійснює необхідну роботу.

## 3. За способом застосування джерела тепла

За цією ознакою розрізняють печі-теплообмінники і печі-теплогенератори. В установках першого типу матеріал нагрівається в результаті передачі енергії з поверхні оброблюваного матеріалу з наступним поширенням її по масі. В установках другого типу зовнішній теплообмін відсутній, тому що генерація теплоти відбувається в об'ємі виробу. Прикладами печей-теплообмінників є паливні печі й електричні печі непрямої дії, а печей-теплогенераторів - електричні нагрівачі прямої дії, індукційні печі й автогенні установки (кисневий конвертер).

## 4. За родом дії

Розрізняють печі періодичної і безперервної дії.

В установках періодичної дії завантаження і вивантаження оброблюваного матеріалу здійснюється циклічно (мартенівські печі, колодязі, ковпакові печі), а в агрегатах безперервної дії - стаціонарно в часі (доменні, методичні, кільцеві печі).

## 5. За характером відносного руху нагрівальних газів і матеріалу

За цією ознакою розрізняють прямоточні, протиточні і прямо-протиточні становки. При збігові напрямків руху газів і матеріалу, печі називаються прямоточними, а при зустрічному їхньому русі - протиточними. У прямо-протиточних печах на довжині робочого простору мають місце обидва вищевказані відносні рухи.

#### 6. За типом пристроїв підігрівання повітря і газу

За цією ознакою виділяють рекуперативні і регенеративні печі. У рекуперативних установках гарячі гази віддають частину свого тепла повітрю, що нагрівається, безперервно через стінку, що їх поділяє.

У регенеративних печах продукти віддають своє тепло насадці з вогнетривкого матеріалу в одній камері, у той час як повітря, що рухається у піч, сприймає тепло від іншої насадки вже попередньо нагрітої.

#### 7. За типом пристрою для переміщення оброблюваного матеріалу

За цією ознакою розрізняють печі штовхальні, з крокуючим подом і балками, з обертовим і роликівим подом, з колісним рольгангом.

#### 8. За видом теплообміну в робочому просторі печі

Розрізняють печі з радіаційним, конвективним і радіаційно-конвективним теплообміном. «Чистий» радіаційний теплообмін зустрічається у вакуумних електричних печах, а конвективний - у низькотемпературних установках з температурою в робочому просторі, що не перевищує 6000С У всіх інших випадках у печах має місце радіаційно-конвективний режим теплообміну.

#### 9. За спрямованістю теплообміну

За цією ознакою розрізняють печі з прямим спрямованим, непрямим спрямованим і рівномірно розподіленим режимом теплообміну. В агрегатах із прямим спрямованим режимом теплообміну тепловий потік, що падає на матеріал, більший, ніж той, що падає на кладку. Прикладом таких печей є мартенівська піч зі струйно-факельними пальниками, спрямованими на метал. До непрямого спрямованого режиму теплообміну відносять реактори, у яких тепловий потік, що падає на кладку, є більшим від того, що падає на

матеріал. Такий режим реалізується в печах із плоскополумєневими пальниками, встановленими на склепінні.

У печах з рівномірно розподіленим режимом теплообміну тепловий потік на матеріал і кладку однаковий.

### 1.3 Розвиток науки про печі

Однією з перших теорій, яка об'єднувала уявлення про промислові полум'яні печі, була гідравлічна теорія полум'яних печей Михайла Васильовича Ломоносова, розвинена професором Володимиром Юхимовичем Грум-Гржимайло в 1909-1910рр.. в гідравлічній теорії розрахунку полум'яних печей на основі застосування законів гідравліки до руху пічних газів. У ті часи печі працювали на твердому і іноді на рідкому та газоподібному паливі. Переважним рухом димових газів був природний рух під дією тяги димової труби. Топка відокремлювалася від робочого простору печі полум'яним вікном. Вентиляторів зазвичай не було. Тому повітря надходило в топку під дією природної тяги. Печі, що працюють на такому принципі, називалися самодувними.

Основні положення гідравлічної теорії розрахунку полум'яних печей (у лапках виділені формулювання з книги Грум-Гржимайло В.Є. "Полум'яні печі", 1932р.):

1. Головний фактор успішної роботи печі - організація руху продуктів згоряння в робочому просторі печі. Це положення актуальне і зараз.

2. "Рух полум'я в печах підпорядковується законам руху легкої рідини у важкій (полум'я в зовнішньому повітрі)". Таким чином, пічні гази рухаються в робочому просторі, притискаючись до склепіння. "Будь-який рух кожної рідини є результат витрати напору", тобто рух газів відбувається за рахунок тяги димової труби.

3. Для успішної роботи печі димові вікна для видалення диму з робочого простору печі повинні розташовуватися на рівні подини або в



подині." Відпрацьовані пічні гази повинні направлятися найкоротшим шляхом в димову трубу. Падина повинна бути ретельно каналізована. Необхідно уникати застою холодних газів на поду".

4. "Підсклепінний простір є ідеальна спальююча камера; в інтересах правильності протікання реакції горіння, правильності та рівномірності нагріву предметів, розташованих на поду, рекомендується робити печі з високим склепінням". Щоб гази встигли охолонути в межах робочого простору печі, тобто встигли передати якомога більше теплоти нагріваним матеріалам, час перебування газів в робочому просторі печі.

Гідравлічна теорія пропонувала таку методику розрахунку печей: вводилося поняття швидкості падіння температури полум'я (димових газів) від калориметричної температури ткал до температури відхідних з печі газів твідх за час перебування газів в робочому просторі печі.

Виходячи з відомої швидкості падіння температури завжди можна знайти температуру відхідних газів і розрахувати тепловий баланс печі.

Принципово новою явилася, так звана, загальна теорія печей академіка Миколи Миколайовича Доброхотова, розроблена в 1923-27 роках. Він вперше показав, що рух газів у печах має турбулентний, а не ламінарний характер, у зв'язку з чим процеси змішування газів і горіння палива протікають за законами турбулентного, а не ламінарного потоку. Основні положення теорії полягають у наступному:

1. Для поліпшення теплопередачі конвекцією і випромінюванням гази повинні рухатися в робочому просторі печі якомога ближче до поверхні нагріваних матеріалів з можливо більшою швидкістю. Для цього печі потрібно будувати з невеликим поперечним перерізом робочого простору;

2. Горіння палива при високих температурах визначається умовами змішування його з киснем повітря. Хімічна реакція горіння протікає дуже швидко і не лімітує швидкість процесу спальювання палива;

3. Довжина турбулентного факела пропорційна діаметру паливного струменя і не зростає із збільшенням теплового навантаження при сталому співвідношенні палива і повітря;

4. Геометричний напір газів у печах малий у порівнянні з кінетичної енергією азів. Впливом геометричного напору можна знехтувати, при цьому можна враховувати тільки сили інерції і кінетичну енергію газових потоків;

5. Теплову потужність печі необхідно визначати кількістю не тільки подається в неї палива, але і кисню, споживаного піччю для спалювання палива. Нестача кисню для повного згорання палива не дозволяє використовувати всю потужність;

6. Дуже важливе значення має вибір системи транспортування теплооброблюваних в печі матеріалів, яка визначає тип печі і є головною її особливістю. Ця теорія відкрила нові напрямки в конструюванні компактних печей з примусовим рухом газів. Печі стали працювати на рідкому і газоподібному паливі, з'явилися вентилятори, зникли окремо розташовані топки. Ця теорія використовувалася в період індустріалізації країни, коли головною вимогою промисловості була висока продуктивність печей незважаючи на підвищену витрату палива. Більшість положень загальної теорії М.М. Доброхотова дійсні і по сьогоднішній день.

У роботу з розвитку загальної теорії печей включилося багато науковців, сприяючи своїми дослідженнями появі нових розділів, пов'язаних з моделюванням роботи печей, створенням нових методів розрахунку промислових печей для різних технологічних процесів.

Серед робіт, що відображають розвиток теорії печей в 30-х роках, слід назвати праці професора Йосипа Даниловича Семикіна, який, спираючись на дослідження, виконані на початку 1910-х років інженером Миколою Євгеновичем Скарєдовим, висунув в 1930р. гасло "Успіх вирішує велика тепла потужність". При цьому слід відзначити, що наукова заслуга Н.Е. Скарєдова полягає в тому, що він показав і довів наступне: відмінність у роботі однакових мартенівських печей визначається їх різною тепловою

потужністю. Ним вперше встановлено, що теплова потужність є найголовнішим чинником, що визначає роботу кожної печі.

У 1934р. свої погляди на теплову роботу печей І.Д. Семікін назвав енергетичною теорією печей на противагу гідравлічній теорії В.Е. Грум-Гржімайло. Основні положення енергетичної теорії:

1. Необхідно проектувати і будувати печі із збільшеною тепловою потужністю. Це основна умова високої продуктивності роботи печі.

2. Для досягнення високої теплової потужності необхідно збільшувати тягу печі за рахунок будівництва високих димових труб і збільшення потужності димососів, збільшувати поверхні теплообміну теплоутілізуючих пристроїв для підвищення температури нагрівання повітря та ін.

Реалізація на практиці положень енергетичної теорії печей, як раніше гідравлічної теорії, показала недостатність одностороннього підходу до вирішення проблем, що існують в металургійних печах, головними з яких є скорочення питомої витрати палива та підвищення питомої продуктивності.

Професор Марк Олексійович Глинков, використавши досягнення сучасної науки і техніки, врахувавши помилки і недоліки гідравлічної та енергетичної теорій печей, створив у 1959-1962 роках свою, нову загальну теорію печей. Основою цієї теорії став основний принцип: предметом теорії печей повинно бути комплексне дослідження трьох пов'язаних між собою процесів, що відбуваються в печах:

1. Спалювання палива.
2. Рух пічних газів.
3. Теплопередача від газів до нагріваємих матеріалів.

#### 1.4 Призначення та параметри нагрівання сталі. Якість нагріву, види браку

Цілі і завдання. Нагрівання (підвищення внутрішньої тепломісткості) сталевих виробів, що є однією з найважливіших операцій виробничого

процесу, здійснюють або перед їхньою гарячою обробкою тиском (прокаткою, куванням), або при термічній обробці відповідно до мети додавання матеріалові необхідних пластичних або технологічних властивостей.

Якісним нагріванням сталі вважається таке нагрівання, при якому забезпечуються задані кінцеві температурні параметри і немає браку металу. Під названими параметрами варто розуміти досягнення матеріалом у момент його видачі з печі необхідних значень  $t$  як на поверхні тіла, так і по перетині. Вибір цих параметрів залежить від хімічного складу сталі і конкретних технологічних завдань.

Наприклад, при нагріванні металу під термічну обробку одна з необхідних вимог полягає в одержанні мінімального кінцевого перепаду температур по перетині заготовки. У протилежному випадку виникне брак, зумовлений незавершеністю структурних перетворень по всій товщині металу. Тому велике значення має точність нагрівання.

При підвищенні внутрішньої тепломісткості виробів, що нагріваються, перед

обробкою тиском температура їхньої видачі з печі встановлюється за діаграмою стану залізо — вуглець з урахуванням технологічних обмежень. Верхню межу припустимих температур нагрівання сталі вибирають на 100 - 1500С нижче від лінії солідуса, що пов'язано з небезпекою перегрівання і перевитрати металу. Причому, чим більший процентний вміст вуглецю в ньому, тим меншою має бути величина  $t$ .

Нижню межу зазначених температур звичайно вибирають з умови припустимих температур кінця прокатки з урахуванням усіх можливих втрат тепла в навколишнє середовище впродовж усього процесу пластичної деформації. Отже, для кожної марки сталі і для кожного виду обробки тиском існує визначений діапазон температур, за межами якого нагрівання сталі є неприпустимим. Для маловуглецевих сталей цей діапазон є ширшим, ніж для високовуглецевих і високолегованих. Тому вибір температурного

рівня нагрівання металу — одне з важливих завдань розглянутого технологічного процесу.

Не менш важливо забезпечити задану рівномірність нагрівання сталі перед обробкою тиском. Неоднакова тепломісткість за обсягом металу в ході прокатки призводить до наступного: по довжині заготовки — до її різнотовщинності (ділянки з великими значеннями  $t$  витягаються сильніше), по ширині — до серповидності або скручування розкату, а по перетині — до того, що більш нагрітий бік подовжується швидше і метал згинається.

Практично сталь перед прокаткою видають з таким ступенем нерівномірності нагрівання, при якому забезпечується необхідна якість готової продукції. Перепади

температур по перетині тіла, вибір яких залежить від виду обробки, марки металу й інших чинників, можуть складати від 100 до 3000С на 1м товщини матеріалу, що нагрівається. Наприклад, такі перепади мають бути мінімальними при прошиванні й обробці високолегованих сталей (через великі опори деформації), а максимальними — при куванні і штампуванні маловуглецевих марок.

Основними видами браку при тепловій обробці металу є його недогрів, перегрів і перепал. Недогрів — результат низької температури на поверхні тіла або недостатнього вирівнювання значень  $t$  по перетині заготовки. Як наслідок, внутрішні шари будуть менш пластичними, ніж зовнішні, а це сприяє виникненню напруг, що приводять до браку у вигляді «кувального хреста», «шпаківень» тощо.

Перегрів — результат тривалої теплової обробки виробів при температурах, що значно перевищують критичну точку  $A_{c3}$ . При цьому інтенсивне, утвориться грубозерниста, а іноді великогочаста структура сталі, що викликає ослаблення зв'язків між зернами. Метал стає крихким; при його прокатці можливі тріщини і розривина. Але, навіть, якщо і не виникають подібні дефекти, сталь за своїми механічними властивостями може бути незадовільною.

Перегрів, хоч і є браком, який можна виправити, проте вимагає нових витрат у вигляді термічної обробки (відпалу або нормалізації) або додаткової деформації.

При подальшому зростанні температури (наближенні її до лінії солідус за діаграмою залізо — вуглець) починається часткове оплавлення границь зерен, у результаті чого зв'язок між ними настільки погіршується, що метал у процесі обробки тиском руйнується. Таке явище називається перепалом. Зі згаданої діаграми випливає, що чим вищим є вміст вуглецю в сталі, тим швидше при більш низькій температурі настає перепал, що відноситься до непоправного браку (злам металу — каменеподібний).

Перепал в окисній атмосфері може спостерігатися і при більш низьких температурах, коли кисень з неї дифундує у простір між зернами, окисляє залізо і вуглець, утворюючи в цьому просторі легкоплавкі сполуки. Швидкість дифузії окислювача в сталь залежить від його парціального тиску в газовій фазі і тривалості пливу. Тому, чим вищою є окисна атмосфера печі, тим легше настає перепал, сигналом про який є оплавлення окалини.

### 1.5 Теплові і температурні режими нагрівання металу

Під режимами розуміють залежність основних параметрів теплової обробки металу від часу. Режим нагрівання сталей обумовлюється технологічними особливостями, конструкцією і призначенням печі формою, розмірами і розташуванням металу в агрегаті.

Розрізняють температурний і тепловий режими нагрівання, а для печей періодичної дії - ще і режим теплового навантаження. Для всіх них, як уже зазначалося, характерна залежність від часу, тобто перший із названих режимів - це нагрівання відповідно до заданого температурного графіка, другий - дотримання певного закону зміни зовнішнього теплового потоку і третій - збільшення або зменшення теплової потужності печі.

Режими нагрівання металу є взаємозалежними між собою. Щоб забезпечити виконання заданого температурного графіка, для печей періодичної дії необхідно тим або іншим шляхом змінювати кількість тепла, що подається до печі, а для безперервних печей — певним чином розподіляти його по довжині робочого простору.

Температурний режим може бути постійним і змінним. Якщо параметр  $t$  не змінюється і за часом нагрівання, і за обсягом робочого простору, такий режим називається камерним.

У печах безперервної дії температурний режим звичайно характеризується підвищенням або зниженням значень  $t$  по довжині робочого простору. У цьому випадку температура матеріалу, що нагрівається, змінюється в часі.

У печах періодичної дії підвищення (зменшення) величини  $t$  здійснюється в тому самому обсязі робочого простору, а тому прийнято говорити про стадії (ступені) нагрівання. У прохідних печах безперервної дії досліджуваний режим неоднаковий на окремих ділянках робочого простору. Тому розрізняють температурні зони печі.

Практикуються одно-, дво- і багатоступінчасті режими теплової обробки металу. У першому випадку, тобто при одноступінчастому (однотемпературному) режимі (температура газів, що гріють, постійна), нагрівають термічно тонкі вироби, оскільки тут виключене виникнення термонапруг і перепаду значень  $t$  по перетині тіл. Такий режим застосовують для нагрівання: у прохідних печах — листів, сутунок, тонкостінних труб і інших виробів при одиночному їхньому розташуванні, а в одномісних регенеративних нагрівальних колодязях — зливків гарячого посаду.

Камерний режим забезпечує підвищення продуктивності печі за рахунок форсування нагрівання, але приводить до погіршення використання палива в агрегаті.

## 1.6 Загальні положення нестационарної теплопровідності

Процеси теплопровідності, коли поле температури в тілі змінюється не тільки в просторі, але і в часі називають нестационарними.

Серед практичних задач нестационарної теплопровідності найважливіше значення мають дві групи процесів: а) тіло прагне до теплового рівноваги; б) температура тіла зазнає періодичні зміни.

До першої групи належать процеси прогріву або охолодження тіл, поміщених в середу з заданим тепловим станом (прогрів болванки в печі, охолодження гартує деталі).

До другої групи належать процеси в періодично діючих підігрівачах, наприклад, в регенераторах, насадка яких то нагрівається димовими газами, то охолоджується повітрям.

У міру нагрівання температура в кожній точці наближається до температури нагрівається середовища. Найбільш швидко змінюється температура точок, що лежать поблизу поверхні тіла. Зі збільшенням часу нагріву ця різниця буде зменшуватися і теоретично через досить великий відрізок вона буде дорівнює нулю (див. рис. 1.1).

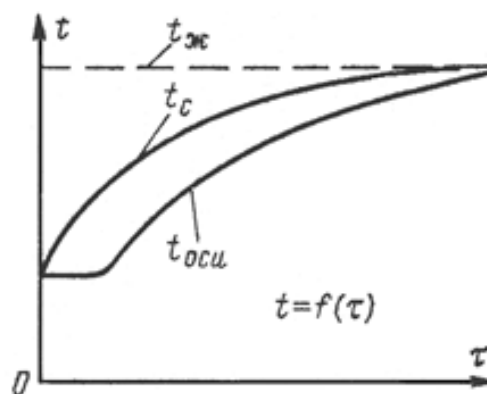


Рисунок 1.1 – Характер зміни температури тіла у часі



В умовах передачі теплоти через стінку при раптовій зміні температури одного з теплоносіїв не вся теплота буде передаватися через стінку: частина її піде на зміну внутрішньої енергії самої стінки. Нестационарні теплові процеси завжди пов'язані зі зміною внутрішньої енергії або ентальпії речовини.

### 1.7 Аналітичне описання процесу

Аналітичний опис процесу теплопровідності включає в себе диференціальне рівняння і умови однозначності. Диференціальне рівняння теплопровідності при відсутності внутрішніх джерел теплоти:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right).$$

Умови однозначності задаються у вигляді:

- фізичних параметрів  $\lambda$ ,  $c$ ,  $\rho$ ;
- форми і геометричних розмірів тіла  $l_0 \dots l_n$ ;
- температури тіла в початковий момент часу  $\tau = 0$ ,  $t = t_0 = f(x, y, z)$ .

Граничні умови можуть бути задані у вигляді граничних умов третього роду

$$\left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0} = -\frac{\alpha}{\lambda} (t_{n=0} - t_{жс}).$$

Диференціальне рівняння теплопровідності спільно з умовами однозначності дає закінчену математичну формулювання розглянутої задачі. Рішення її полягає в знаходженні функції

$$t = f(x, y, z, \tau, a, \alpha, t_0, t_{жс}, l_0, l_1 \dots l_n).$$

Ця функція задовольняє диференціальних рівнянь і умов однозначності.

### 1.7.1 Охолодження (нагрівання) необмеженої пластини

Дана пластина завтовшки  $2\delta$ . Коефіцієнт тепловіддачі для всієї поверхні пластини постійний. Зміна температури відбувається тільки в одному напрямі координати  $x$ , тобто  $\frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial t}{\partial z} = 0$ , а отже, задача є одномірною.

Початковий розподіл температури заданий деякою функцією  $t(x,0)=f(x)$ . Охолодження відбувається в середовищі з постійною температурою  $t_{жс}=const$ . Відлік надмірної температури пластини для будь-якого моменту часу вестимемо від температури навколишнього середовища  $t - t_{жс} = \vartheta$ . Графічне зображення необмеженої пластини наведено на рисунку 1.2.

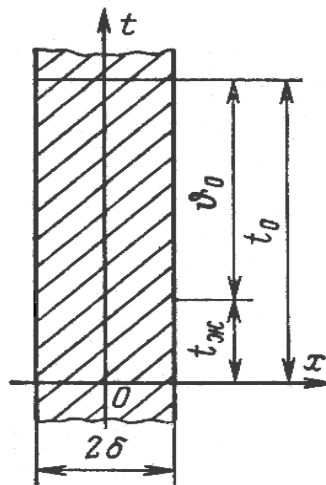


Рисунок 1.2 – До визначення необмеженої пластини  
Диференційне рівняння теплопровідності

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}.$$

Початкові умови:

при  $\tau = 0$ ;  $\vartheta = \vartheta_0 = f(x) - t_{жс} = F(x)$ .

За заданих умов охолодження задача стає симетричною і початок координат зручно помістити на осі пластини.

Тоді граничні умови запишуться:

- на осі пластини при  $x=0 \Rightarrow \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=0} = 0$ ;
- на поверхні пластини при  $x=\delta \Rightarrow \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial x}\right)_{x=\delta} = -\frac{\alpha}{\lambda} \vartheta_{x=\delta}$ .

Після вирішення диференціального рівняння отримуємо, що безрозмірна температура є функцією тільки двох безрозмірних параметрів:

- для осі пластини  $\Theta_{x=0} = N(Bi) \exp(-\mu_1^2 Fo)$ ;
- для поверхні пластини  $\Theta_{x=\delta} = P(Bi) \exp(-\mu_1^2 Fo)$

Число Фур'є, що є безрозмірним часом

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{\delta^2}.$$

Число (критерій) Біо

$$Bi = \frac{\alpha \delta}{\lambda_{cm}}.$$

Критерій Біо є відношенням внутрішнього термічного опору процесу теплопровідності до зовнішнього термічного опору процесу тепловіддачі.

Число Біо називають критерієм масивності. Залежно від числа Біо тіла підрозділяються на термічно тонкі ( $Bi < 0,1$ ) і термічно масивні ( $Bi > 100$ ). Характер розподілу температури в тілі можна визначити залежно від чисельного значення числа Біо. Розглянемо три випадки:

1.  $Bi \rightarrow \infty$  (практично  $Bi > 100$ ). Якщо  $Bi \rightarrow \infty$ , то температура поверхні пластини відразу стає рівною температурі навколишнього середовища, в яке поміщена пластинка. Точка перетину дотичних до температурних кривих знаходиться на поверхні пластини (див. рис. 1.3).

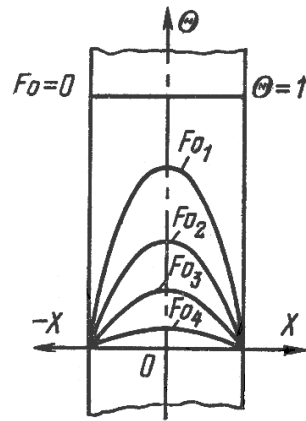


Рисунок 1.3 – Розподіл температури в плоскій стінці при її охолодженні в умовах  $Bi \rightarrow \infty$

Із  $Bi = (\delta/\lambda)/(1/\alpha)$  походить:  $Bi \rightarrow \infty$  при заданих фізичних параметрах і товщині пластини тоді, коли  $\alpha \rightarrow \infty$ , тобто коли має місце дуже велика інтенсивність відведення теплоти від поверхні. У цих випадках процес охолодження визначається фізичними властивостями і розмірами тіла (внутрішнє завдання).

2.  $Bi \rightarrow 0$  (практично  $Bi < 0,1$ ). Із  $Bi = (\delta/\lambda)/(1/\alpha)$  видно, що  $Bi \rightarrow 0$  при малих розмірах товщини пластини, великому значенні коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  і малих значеннях коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  (див. рис. 1.4).

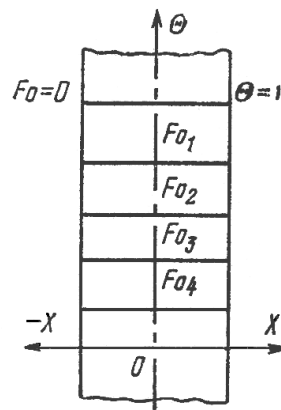


Рисунок 1.4 - Розподіл температури в плоскій стінці при її охолодженні в умовах  $Bi \rightarrow 0$

При малих  $Bi$  температура на поверхні пластини трохи відрізняється від температури його осі, тобто температура по товщині пластини розподіляється рівномірно.

В цьому випадку процес нагріву і охолодження тіла визначається інтенсивністю тепловіддачі на поверхні пластини. Тобто шляхи підвищення інтенсивності охолодження слід шукати в зовнішніх умовах (зовнішня задача).

3. Число  $Bi$  знаходиться в межах  $0,1 \leq Bi < 100$ . Температурні криві для будь-якого моменту часу виглядатимуть, як надано на рисунку. В цьому випадку інтенсивність процесу охолодження (нагрівання) визначається як внутрішнім, так і зовнішнім термічним опором (див. рис 1.5).

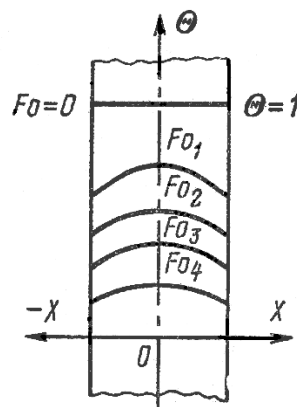


Рисунок 1.5 – Розподіл температури в плоскій стінці при її охолодженні в умовах  $0,1 \leq Bi < 100$

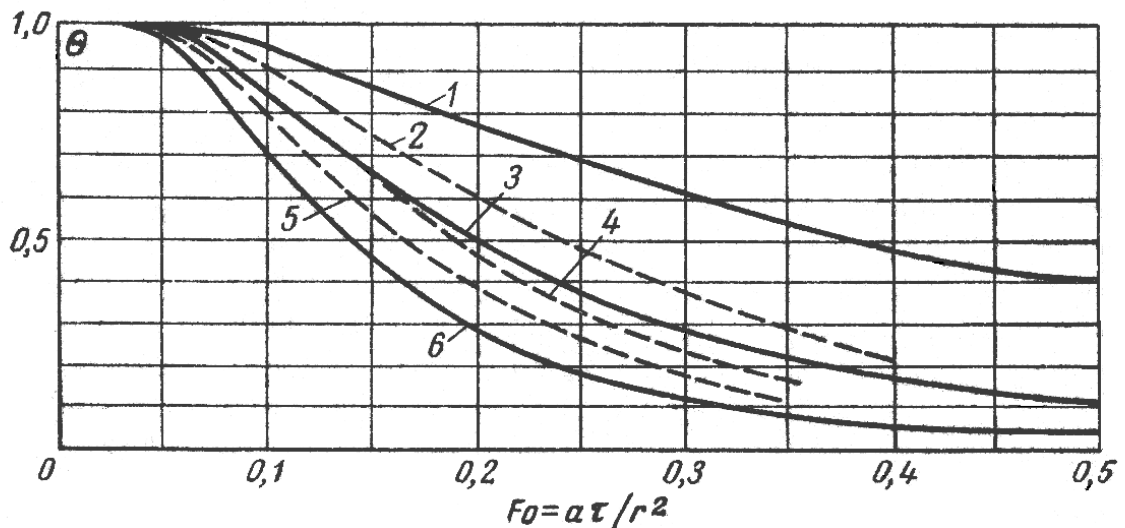
### 1.7.2 Залежність процесу охолодження (нагрівання) від форми і розмірів тіла

Швидкість розповсюдження ізотермічної поверхні в тілах залежить від відношення поверхні тіла до їх об'єму. Чим більше відношення поверхні тіла до його об'єму, тим більше швидкість зміни температури. Це справедливо для будь-яких значень числа  $Bi$ .

Проілюструємо це на прикладі охолодження пластини, циліндра і кулі. При  $Bi \rightarrow 0$  для цих тіл рівняння температурного поля запишуться:

- для пластини  $\Theta_{пл} = \exp(-Bi \cdot Fo)$ ;
- для циліндру  $\Theta_{цил} = \exp(-2Bi \cdot Fo)$ ;
- для кулі  $\Theta_{ку} = \exp(-3Bi \cdot Fo)$

При однаковому визначальному розмірі і інших рівних умовах найбільша швидкість зміни температури в часі буде для кулі. Якщо порівнювати відносини поверхні до об'єму для пластини, циліндра і кулі, то їх можна представити як 1:2:3 (див. рис. 1.6).



1- безмежна пласина; 2- квадратна балка безмежної довжини; 3 – циліндр безмежної довжини; 4 – куб; 5 – циліндр з довжиною, що дорівнює діаметру; 6 – шар.

Рисунок 1.6 – Швидкість охолодження у центрі для різних тіл з однаковим лінійним розміром

Видно, що для кулі швидкість охолодження більша, ніж для будь-якого іншого тіла.

### 1.7.3 Регулярний режим охолодження (нагрівання) тіл

Отримані вирішення задач для тіл різної геометричної форми вказують, що вони мають однакову структуру, тобто є сумою нескінченного ряду, члени якого розташовані по швидко убиваючих експоненціальних функціях. Наприклад, для безмежної пластини при її охолодженні в середовищі з постійною температурою і постійним коефіцієнтом тепловіддачі експонента убиватиме пропорційно часу  $\tau$

$$\vartheta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n U_n e^{-m\tau},$$

де  $A_n$  - постійна, залежна від форми тіла і початкового розподілу температури;

$U_n$  - функція координат, що характеризує просторовий розподіл температури і що складається з фізичних характеристик тіла;

$m$  – постійна величина, зростаюча із зростанням  $n$  і залежна від форми і розмірів тіла і умов теплообміну з навколишнім середовищем.

При малих значеннях  $\tau$  от 0 до  $\tau_1$  розподіл температури усередині тіла і швидкість зміни в часі температури залежать від особливостей початкового розподілу умов температур. У цих умовах поле температур в тілі визначатиметься не тільки першим, але і подальшими членами ряду.

Перший період охолодження, при якому швидкість зміни температури усередині тіла залежить від виду початкового розподілу температури, називають *неврегульованою стадією* процесу охолодження. Із збільшенням часу ряд стає швидкозходящимся.

Починаючи з деякого моменту часу  $\tau > \tau_1$  початкові умови починають грати другорядну роль і процес повністю визначається умовами охолодження на межі тіла і середовища, фізичними властивостями тіла і

його геометричною формою і розмірами. Ця стадія називається *регулярним режимом*. Температурне поле описується

$$\mathcal{G} = A_1 U_1 e^{-m_1 \tau}.$$

Логарифмуючи цей вираз, отримаємо

$$\ln \mathcal{G} = \ln(AU) - m\tau,$$

тобто натуральний логарифм надмірної температури для всіх точок тіла змінюється в часі по лінійному закону.

При тривалому охолодженні, якщо  $\tau \rightarrow \infty$  всі точки тіла приймають однакову температуру, рівну  $t_{жс}$ , тобто настає третя стадія режиму охолодження - *стаціонарний режим*.

Таким чином, весь процес охолодження можна розділити на три стадії: нерегульований, регулярний і стаціонарний режими.

Розглянемо детальніше другу стадію охолодження.

Після диференціювання обох частин останнього рівняння за часом отримуємо

$$\frac{1}{\mathcal{G}} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial \tau} = -m = const.$$

Ліва частина цього виразу представляє відносну швидкість зміни температури і дорівнює постійній величині  $m$ , яка є незалежною ні від координат, ні від часу. Величина  $m$  вимірюється в 1/с і називається *темпом охолодження*. При настанні регулярного режиму темп охолодження не залежить ні від координат, ні від часу і є постійною величиною для всіх точок тіла; залежить тільки від фізичних властивостей тіла, процесу охолодження на його поверхні, геометричної форми і розмірів тіла.



Якщо експериментально визначити зміну надмірної температури в часі і побудувати залежність в напівлогарифмічних координатах (див. рис. 1.7), то темп охолодження у стадії регулярного режиму визначається як

$$\frac{\ln \vartheta_1 - \ln \vartheta_2}{\tau_2 - \tau_1} = m = \text{const}.$$

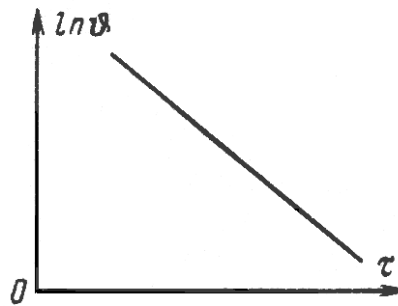


Рисунок 1.7 – До визначення темпа охолодження

*Перша теорема Кондратьєва.* Вираз для залежності темпу охолодження  $m$  від фізичних властивостей тіла, його геометричної форми і розмірів, а також умов теплообміну на поверхні тіла можна знайти з аналізу теплового балансу

$$m = \psi \frac{\alpha F}{C},$$

де  $\psi = \frac{\vartheta_F}{\vartheta_V}$  - коефіцієнт нерівномірності розподілу температури;

$\vartheta_F$  - середня надмірна температура поверхні тіла в даний момент часу;

$\vartheta_V$  - середня надмірна температура за об'ємом;

$C = c\rho V$  - повна теплоємність.

З рівняння виходить, що відносна швидкість охолодження (температура охолодження) однорідного і ізотропного тіла при кінцевому значенні

коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  пропорційна коефіцієнту тепловіддачі, поверхні тіла і зворотно пропорційна його теплоємності. Останнє рівняння є *першою теоремою Кондратьєва*.

У рівнянні множник  $\psi = \frac{g_F}{g_V}$  залежить від умов охолодження на поверхні тіла. З'ясуємо характер залежності коефіцієнта  $\psi$  від числа  $Bi$ .

Якщо  $Bi \rightarrow 0$ . Ця умова відповідає зовнішній задачі, коли розподіл температури в тілі не залежить від його розмірів і фізичних властивостей. Отже, усереднені по поверхні і об'єму температури будуть однакові  $g_F = g_V$ .

Коефіцієнт нерівномірності розподілу температури  $\psi = \frac{g_F}{g_V} = 1$ .

При  $Bi \rightarrow \infty$ . За цієї умови задача стає внутрішнім і процес охолодження визначається тільки розмірами тіла і його фізичними властивостями. Через велику інтенсивність теплообміну температура на поверхні тіла набуває постійного значення, рівного температурі навколишнього середовища. Коефіцієнт нерівномірності розподілу температури  $\psi = \frac{g_F}{g_V} = 0$ . Отже,  $0 < \psi < 1$ . Залежність  $\psi = f(Bi)$  представлено

на рисунку 1.8.

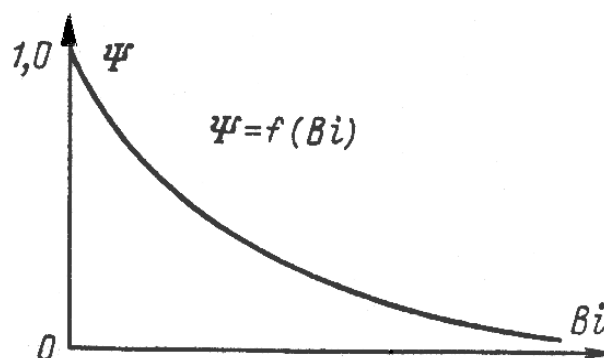


Рисунок 1.8 - Залежність  $\psi = f(Bi)$

Друга теорема Кондратьєва. При  $Bi \rightarrow \infty$ , або  $\alpha \rightarrow \infty$ , темп охолодження  $m$  стає прямо пропорційним коефіцієнту температуропровідності тіла

$$a = Km_{\infty}.$$

Коефіцієнт пропорційності  $K$  залежить від геометричної форми і розмірів тіла:

- для кулі  $K = \frac{1}{(\pi/r_0)^2}$ ,

- для паралелепіпеда  $K = \frac{1}{(\pi/l_1)^2 + (\pi/l_2)^2 + (\pi/l_3)^2}$ ,

- для циліндра кінцевої довжини  $K = \frac{1}{(2,405/r_0)^2 + (\pi/l)^2}$ ,

- для пластини  $K = \frac{1}{(\pi/2\delta)^2}$

### 1.8 Наближені методи вирішення задач теплопровідності

Наближені методи вирішення задач найчастіше застосовуються тоді, коли точні аналітичні методи розрахунку скрутні.

Чисельний метод. Аналітичні рішення, отримані шляхом безпосереднього інтегрування диференціальних рівнянь, дають можливість обчислити температуру в будь-якій точці даної системи. У основу чисельного методу покладено рівняння у формі кінцевих різниць, за допомогою якого обчислюємо температуру в деяких задалегідь вибраних точках.

З чисельних методів вирішення задач теплопровідності найчастіше використовується метод кінцевих різниць.

Суть методу полягає в тому, що в диференціальному рівнянні похідні шуканої функції замінюються наближеними співвідношеннями між кінцевими різницями в окремих вузлових точках температурного поля. В результаті такої заміни виходить рівняння в кінцевих різницях, вирішення якого зводиться до виконання простих операцій алгебри.

Розбивання та числова сітка для нестационарної одновимірної задачі представлена на рисунку 1.10.

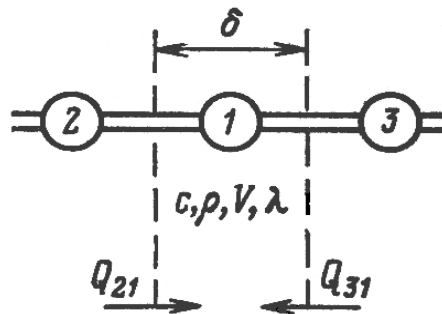


Рисунок 1.10 - Розбивання та числова сітка для нестационарної одновимірної задачі

Для отримання розрахункових формул при чисельному інтегруванні в даний час широко користуються методом теплових балансів. Суть методу полягає в тому, що система розбивається на елементарно малі об'єми. Передбачається, що властивості кожного об'єму зосереджені в центрі кожного об'єму. Передача теплоти між вузловими точками здійснюється через умовні теплопровідячі стрижні.

Рівняння за визначенням температури в шуканій точці є основою чисельного методу розрахунку нестационарної теплопровідності.

$$t_1' = Fo \left[ t_2 + t_3 + t_1 \left( \frac{1}{Fo} - 2 \right) \right]$$

Для розрахунку температури  $t_1'$  необхідно вибрати певне значення  $Fo$ . Для одновимірної задачі вибір обмежено умовою стійкості  $Fo \leq \frac{1}{2}$ . При цьому

забезпечується стійкість рівняння. Якщо порушується ця умова, то зміна температури в процесі розрахунку набуває безладного стрибкоподібного характеру і розрахунок перестає бути вірним. При виборі проміжків  $\delta$  и  $\Delta\tau$  необхідно, щоб умова стійкості виконувалася. Якщо вибрати  $\delta$  и  $\Delta\tau$  з

умови  $Fo = \frac{1}{2}$ , то  $t_1' = \frac{t_2 + t_3}{2}$ .

При  $Fo = \frac{1}{3}$   $t_1' = \frac{1}{3}(t_1 + t_2 + t_3)$ , при  $Fo = \frac{1}{4}$   $t_1' = \frac{1}{4}(t_3 + t_2 + 2t_1)$ .

Отже, в результаті зменшення  $Fo$  збільшується число обчислень і густина сітки, проте при цьому підвищується точність обчислень.

## 2 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ НАГРІВАННЯ МАСИВНИХ ТІЛ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ КАМЕРНІЙ ПЕЧІ

### 2.1 Теоретичні дані

Термічно масивним називається тіло, у якому за рахунок великого внутрішнього теплового опору в порівнянні з зовнішнім тепловим опором в процесі нагрівання або охолодження виникає різниця температур по перетині, який не можна зневажити.

„Масивність” виробу визначається за допомогою критерія Біо Ві, який представляє собою відношення внутрішнього теплового опору  $S/\lambda$  до зовнішнього теплового опору  $1/\alpha$ :

$$Bi = \frac{S/\lambda}{1/\alpha} = \frac{\alpha \cdot S}{\lambda},$$

де  $S$  - товщина тіла, що прогрівається, (для циліндра - це радіус  $R$ ), м;

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності тіла, Вт/(м·К);

$\alpha$  - середній коефіцієнт тепловіддачі на поверхні тіла, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Усі тіла, що нагріваються або охолоджуються, у яких  $Bi > 0,5$ , можна віднести до термічно масивних тіл. Нагрівання „масивних тіл” підкоряється більш складним законам, чим нагрівання „тонких тіл”, тому що процес нагрівання визначається не тільки зовнішнім теплообміном до поверхні тіла, як у „тонких тіл”, але і поширенням теплоти усередині тіла, що нагрівається.

Задачі розрахунку нагрівання тіл зводяться до визначення тривалості нагрівання при відомому розподілі температури по перетині тіла або, навпаки, складається у визначенні температури тіла в заданий момент часу, і вирішуються різними методами.

Найбільше поширення одержали класичні методи рішення диференціального рівняння теплопровідності, що одержують у виді сум

нескінченного ряду. Їхнє обчислення громіздке і вимагає великих витрат часу.

### 2.1.1 Метод розрахунку по графіками

Найчастіше рішення цих рівнянь представляють графічно в залежності від трьох безрозмірних величин, критеріїв – критерію *Біо Бі*, критерію *Фур'є*  $Fo$  та *температурного* критерію поверхні  $\theta_n$  чи *температурного* критерію центру  $\theta_c$ . При нагріванні й охолодженні масивних тіл при постійній температурі навколишнього середовища для температури поверхні циліндра  $\theta_n$  рішення диференціального рівняння теплопровідності має такий вигляд:

$$\Theta_n = f(Fo \cdot Bi),$$

де критерій Фур'є:

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{R^2};$$

температурний критерій

$$\Theta_n = \frac{t_{окр} - t_{н.к.}}{t_{окр} - t_{н.сп.}}, \quad (3.4)$$

де  $a$  - коефіцієнт теплопровідності,  $m^2/s$ ;

$\tau$  - час нагрівання,  $s$ ;

$R$  - радіус тіла, що нагрівається,  $m$ ,  $R = 0,0225m$ ;

$t_{окр}$  - температура навколишнього середовища (у даному випадку - температура в печі),  $^{\circ}C$ ;

$t_{н.к.}$  - кінцева для інтервала часу температура поверхні тіла,  $^{\circ}C$ ;

$t_{н.сп.}$  - середня температура тіла на початку нагрівання,  $^{\circ}C$ .

Знаючи значення будь-яких двох критеріїв і користуючись графіками  $\Theta_n = f(Fo \cdot Bi)$  (кривими Будріна), можна розрахувати третій критерій. Визначивши значення, наприклад критерію  $Fo$ , можна, підставивши відомі параметри  $a$  і  $R$ , розрахувати невідомий параметр - час нагрівання  $\tau$ .

Використання рішень у виді критеріальних залежностей дозволяє скоротити кількість обчислень.

### 2.1.2 Метод теплової діаграми

Іншим розповсюдженим методом розрахунку тривалості нагрівання є метод теплової діаграми, сутність якого полягає в тому, що площа під кривою зміни теплових потоків у координатах  $q - \tau$  являє собою теплоту  $\Delta I$ , витрачену на нагрівання тіла (площу трапеції ми заміняємо площею  $\Delta I$  еквівалентного прямокутника одна зі сторін якого – середній тепловий потік  $q_{cp}$ ), кДж

$$\Delta I = q_{cp} \cdot F \tau;$$

звідки

$$\tau = \frac{\Delta I}{q_{cp} \cdot F},$$

де  $\tau$  - тривалість нагрівання, с;

$\Delta I$  - збільшення тепломісткості тіла, що нагрівається, кДж;

$q_{cp}$  - середній тепловий потік за період нагрівання, кВт/м<sup>2</sup>;

$F$  - площа поверхні нагрівання тіла, м<sup>2</sup>.

### 2.2 Опис експериментальної установки

Об'єкт дослідження - лабораторна камерна електрична піч опору



## СНОЛ.

Технічні характеристики печі СНОЛ-1,62,2,5 1/11-М1У4.2:

- номінальна потужність, кВт ..... 3
- напруга живильної мережі, В ..... 380
- номінальна робоча температура, °С ..... 1100
- діапазон автоматичного регулювання, °С ..... (200...1100)

Діаметр зразка – 45 мм. Радіус зразка, що нагрівається,  $R = 0,0225$  м.

Схема експериментальної установки показана на рисунку 2.1.

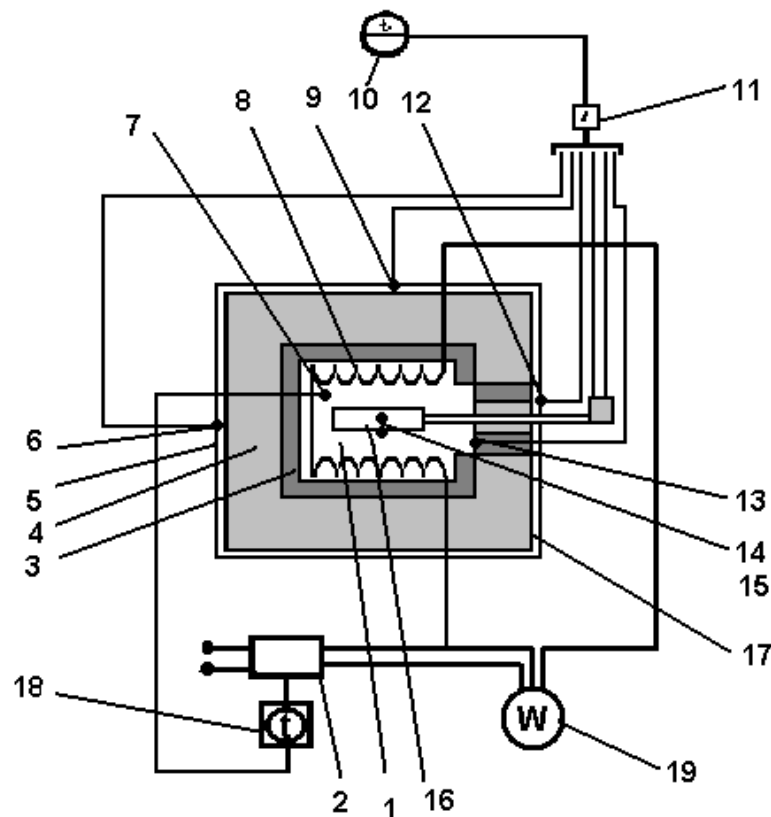


Рисунок 1.2 – Схема експериментальної установки

Муфельна електрична піч 1 з нагрівальними елементами опору у виді спіралей 8, які покладені у пази муфеля 3 з його внутрішньої сторони, має терморегулятор 2, що забезпечує автоматичне регулювання температури в діапазоні (200...1100)°С. Муфель 3 печі виготовлений з вогнетривкого матеріалу - кордеїрита. Між муфелем і металевим кожухом 5 знаходиться набивання з високоглиноземної вати 4. У задній стінці муфеля встановлена платино-платинородієва термопара 7, яка підключена до мілівольтметра 18.

Температурне поле футерівки печі і повітряного прошарку вимірюють за допомогою хромель-копелевих термопар, гарячі спаї яких розташовані так: на зовнішній поверхні печі - 6, 9; на зовнішній поверхні дверцят - 12; на внутрішній поверхні печі - 13; повітряного прошарку - 17. Термопари через перемикач 11 приєднані до потенціометра 10 типу КСП-2. Дослідний зразок циліндричної форми 16 завантажується в піч через отвір у дверцятах печі. Температуру поверхні і центра зразка вимірюють за допомогою підключених до потенціометра хромель-копелевих термопар 14, 15. Для виміру споживаною піччю електричної енергії встановлений електролічильник 19.

### 2.2.1 Порядок виконання роботи

Піч потрібно розігріти до температури (400...600) °С і завантажити в неї зразок із вмонтованими в нього термопарами. Час відраховувати з моменту завантаження зразка в піч. До цього моменту зафіксувати вихідний стан зразку. Температуру поверхні (точка 1) і центру (точка 2) зразка та температуру печі потрібно вимірювати щохвилини протягом (20...30) хв, поки різниця температур між поверхнею і центром не досягне (15...20) °С. Дані вимірів заносимо до таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Дані вимірів

Час $\tau$ , хв.	Температура печі $t_{печ}$ , °С	Температура зразка, °С		
		Поверхня - $t_n$ (крапка 1)	Центр - $t_y$ (крапка 2)	Різниця $\Delta t = t_n - t_y$
1	2	3	4	5
0	420	10	10	0
1	420	40	10	30

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
2	420	60	20	40
3	420	80	40	40
4	420	100	60	40
5	420	118	75	43
6	420	130	90	40
7	420	148	107	41
8	420	162	120	42
9	420	178	140	38
10	420	190	160	30
11	420	205	170	35
12	420	220	185	35
13	420	230	195	35
14	420	140	210	30
15	420	255	225	30
16	420	262	235	27
17	420	275	248	27
18	420	281	258	23
19	420	291	268	23
20	420	305	273	32
21	420	310	285	25
22	420	320	295	25
23	420	330	305	25
24	420	331	312	19

### 2.2.2 Обробка результатів експериментальних даних

За даними таблиці 2.1 будують температурну діаграму нагрівання (див. рис. 2.1): графіки нагрівання в координатах температура - час (графіки

температури печі, температури поверхні і температури центру зразка). Тут же будують графік перепаду температур  $\Delta t = t_n - t_y$  (див. рис. 2.2)

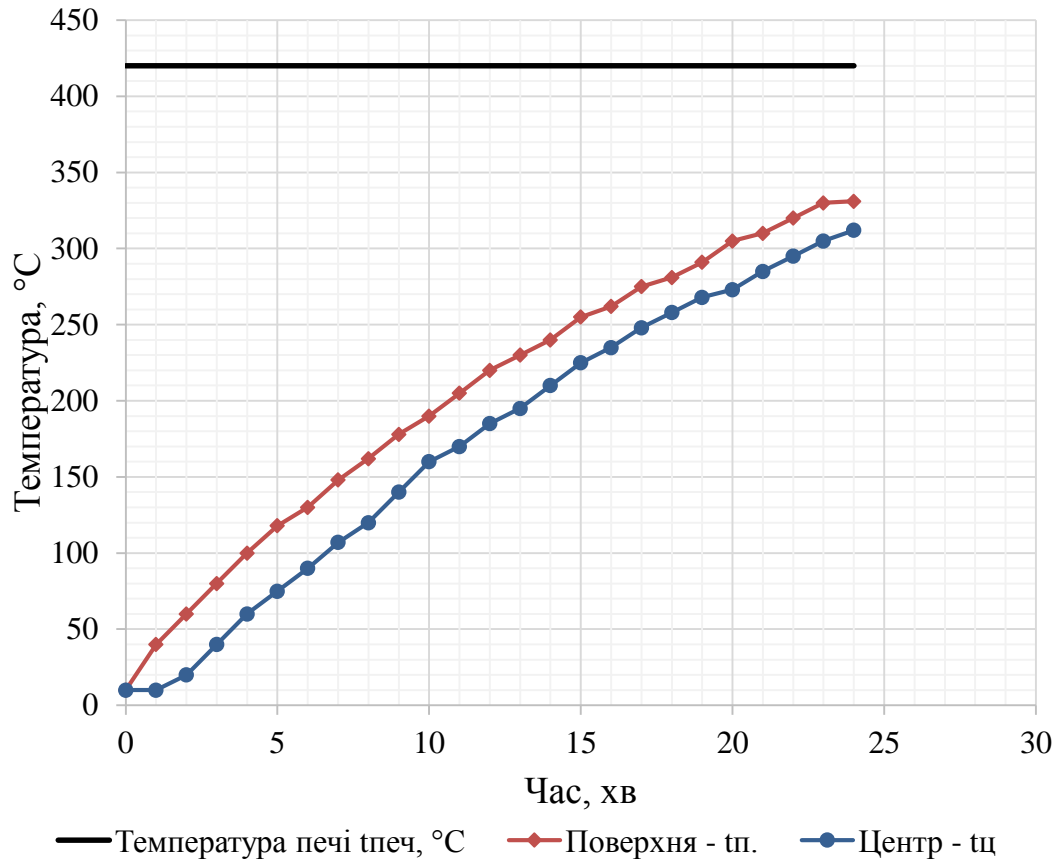


Рисунок 2.1 - Температурна діаграма нагрівання

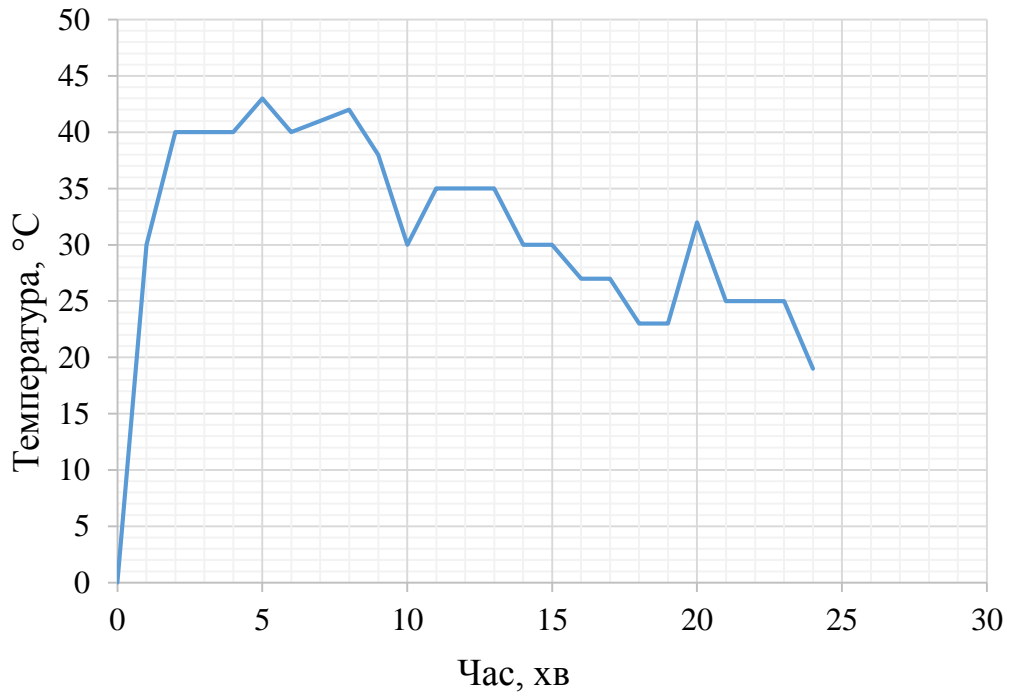


Рисунок 2.2 - Графік перепаду температур  $\Delta t = t_n - t_y$

При виконанні розрахунків за температуру печі приймають середнє значення її протягом усього періоду нагрівання.

Приймаємо для даних умов приведений коефіцієнт випромінювання в печі  $C_{печ} = 4,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

## 2.3 Розрахунок тривалості нагрівання по графіках

### 2.3.1 Розрахунок теплових потоків

Теплові потоки на поверхню зразка на початку  $q_n$  і в кінці  $q_k$ ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$

$$q = C_{печ} \left[ \left( \frac{T_{печ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 \right],$$

де  $C_{печ}$  - приведений коефіцієнт випромінювання печі,  $C_{печ} = 4,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ,

$T_{печ}$ ,  $T_n$  - абсолютна температура печі і поверхні зразка відповідно на початку і в кінці інтервалу часу,  $\text{К}$ . ( $T_i = t_i + 273$ ).

$$q_1 = 4 \cdot \left[ \left( \frac{693}{100} \right)^4 - \left( \frac{283}{100} \right)^4 \right] = 8969$$

$$q_{24} = 4 \cdot \left[ \left( \frac{693}{100} \right)^4 - \left( \frac{593}{100} \right)^4 \right] = 3901,9.$$

### 2.3.2 Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі

Коефіцієнти тепловіддачі на початку  $\alpha_n$  і кінці  $\alpha_k$  інтервалу часу визначають по знайдених теплових потоках  $q_n$  і  $q_k$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

$$\alpha_n = \frac{q_n}{t_{печ} - t_n} ;$$

$$\alpha_{\kappa} = \frac{q_{\kappa}}{t_{неч} - t_n}.$$

$$\alpha_1 = \frac{8969}{(420 - 10)} = 21,9.$$

$$\alpha_{24} = \frac{3901,9}{(420 - 331)} = 43,8.$$

За приведеною методикою розраховують  $q$  і  $\alpha$  додатково в усіх точках у середині зазначеного інтервалу часу та заносимо до таблиці 2.2. За даними розрахунків  $q_i$  і  $\alpha_i$  будемо графіки залежності від часу теплового потоку  $q=f(\tau)$  (див рис.2.3) і коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha=f(\tau)$  (див рис.2.4).

Середній коефіцієнт тепловіддачі на ділянці часу, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_n + \alpha_{\kappa}}{2}.$$

$$\alpha_1 = \frac{21,9 + 43,8}{2} = 32,85.$$

Середні температури на початку  $\bar{t}_n$  і кінці  $\bar{t}_{\kappa}$  ділянки, °С

$$\bar{t} = t_n - \frac{t_n - t_y}{2}.$$

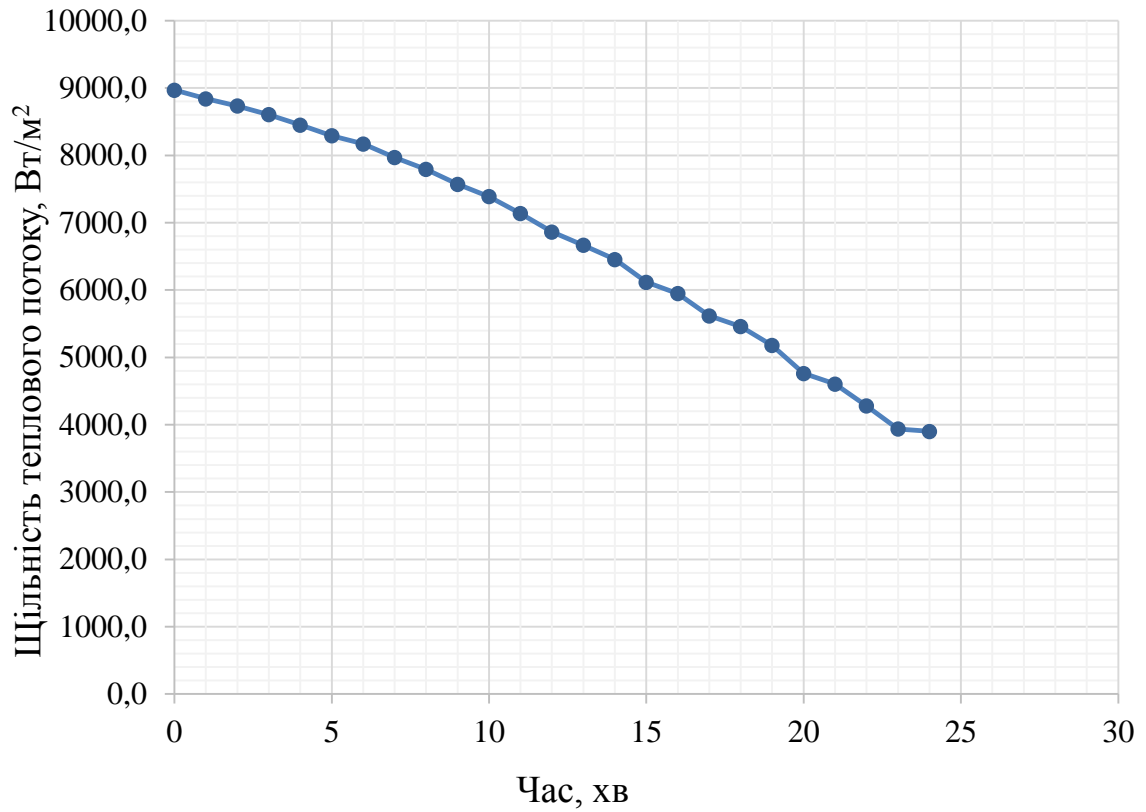


Рисунок 2.3 - Графік залежності теплого потоку від часу

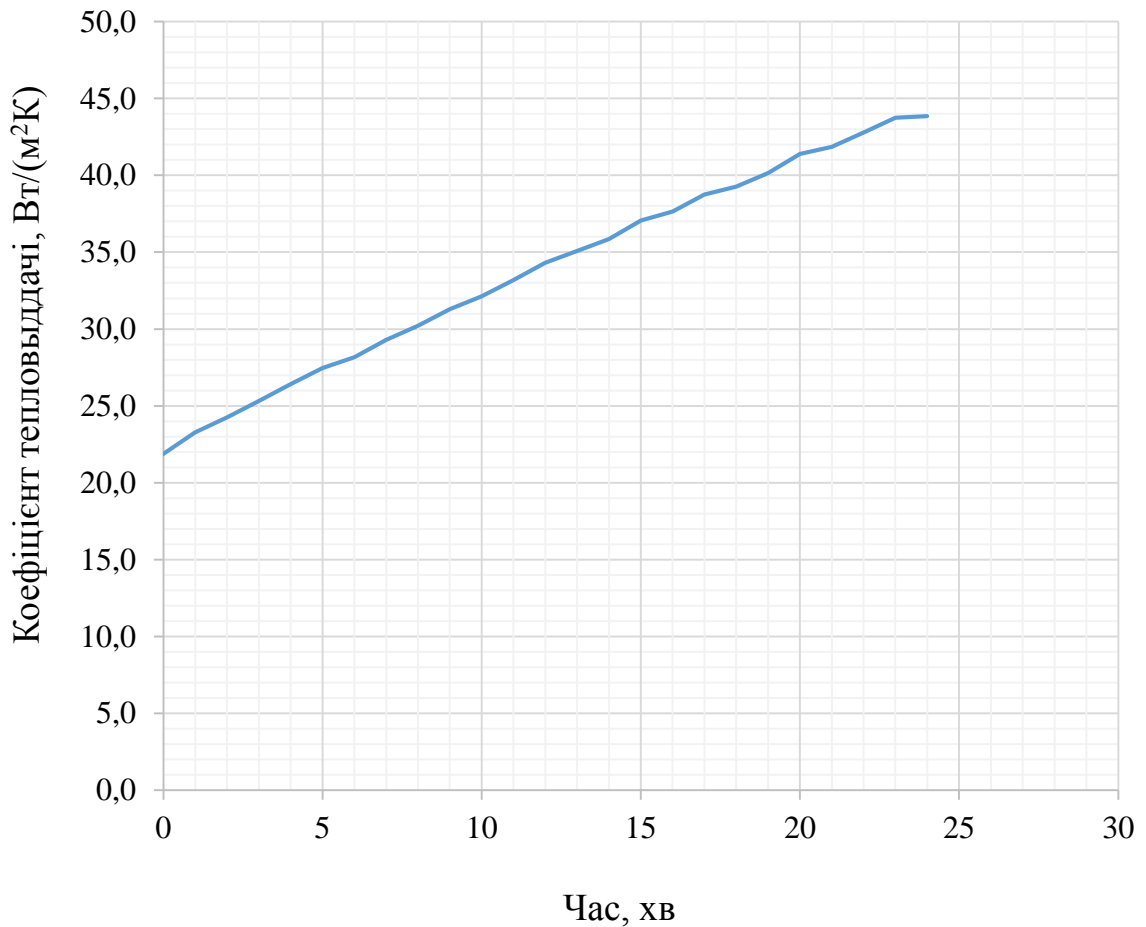


Рисунок 2.4 - Графік залежності коефіцієнта тепловіддачі від часу

Розіб'ємо процес нагріву на три рівних часових інтервали і за графіком визначаємо температури поверхні тіла, що досліджується на межі інтервалів:

$$t_{\text{поч}}^I; t_{\text{кін}}^I = t_{\text{поч}}^{\text{II}}; t_{\text{кін}}^{\text{II}} = t_{\text{поч}}^{\text{III}}; t_{\text{кін}}^{\text{III}}$$

Для першого інтервалу:

- тепловий потік з початку 1-го інтервалу, Вт/м<sup>2</sup>

$$q_{\text{поч}}^I = c_{\text{печ}} \cdot 10^8 (T_{\text{печ}}^4 - T_{\text{пов.поч.І}}^4),$$

- тепловий потік в кінці інтервалу, Вт/м<sup>2</sup>

$$q_{\text{кін}}^I = c_{\text{печ}} \cdot 10^8 (T_{\text{печ}}^4 - T_{\text{пов.кін.І}}^4).$$

- середній тепловий потік в першому інтервалі, Вт/м<sup>2</sup>

$$\bar{q} = \frac{q_{\text{поч}}^I - q_{\text{кін}}^I}{\ln \frac{q_{\text{поч}}^I}{q_{\text{кін}}^I}}.$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі в кінці першого інтервалу, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha_{\text{кін}}^I = \frac{q_{\text{кін}}^I}{T_{\text{печ}} - T_{\text{пов.поч.І}}}.$$

Визначаємо орієнтовне значення Біо в кінці першого інтервалу

$$Bi_{\text{кін}}^I = \frac{\alpha_{\text{кін}}^I \cdot R}{\lambda_{\text{пов.кін.І}}},$$



де  $R$  – радіус зразка, м.

$\bar{\alpha}$  - середній на ділянці часу коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\bar{\lambda}$  - коефіцієнт теплопровідності зразка, Вт/(м·К);

Радіус зразка, що нагрівається, складає  $R = 0,0225$  м.

Коефіцієнти теплопровідності шамотного зразка, Вт/(м·К)

$$\lambda = 0,7 + 0,00064 \cdot \bar{t}.$$

Визначаємо орієнтовні значення  $\Delta t$  і  $t_{\text{ц}}$  в кінці першого інтервалу нагріву, °С

$$\Delta t_{\text{кін}}^I = \frac{q_{\text{кін}}^I \cdot R}{\lambda_{\text{пов.кін.І}} \cdot K_2^I},$$

$$t_{\text{ц,кін}}^I = t_{\text{пов.кін}}^I - \Delta t_{\text{кін}}^I.$$

де  $K_2^I$  – приймається за додатком 34 [30] за значенням  $Bi_{\text{кін}}^I$ .

Уточнюємо значення  $\bar{\lambda}_{\text{кін}}^I$ ,  $Bi_{\text{кін}}^I$ ,  $K_{2\text{кін}}^I$ ,  $\Delta t_{\text{кін}}^I$ ,  $K_3^I$

Середній на ділянці часу коефіцієнт теплопровідності зразка, Вт/(м·К)

$$\lambda_{\text{кін}}^I = 0,5 \cdot (\lambda_{\text{пов.кін}}^I + \lambda_{\text{пов.кін}}^I).$$

Температура в центрі тіла (уточнена), °С

$$t_{\text{ц,кін}}^I = t_{\text{пов.кін}}^I - \Delta t_{\text{кін}}^I.$$

Середня температура в кінці інтервалу, °С

$$t_{\text{кін}}^I = t_{\text{ц,кін}}^I + \frac{\Delta t_{\text{кін}}^I}{K_3^I}.$$

Зміна ентальпії у першому інтервалі, кДж/кг

$$\Delta h = C_{\text{кін}}^I \cdot t_{\text{кін}}^I - C_{\text{поч}}^I \cdot t_{\text{поч}}^I.$$

Середня теплоємність шамоту, кДж/(кг·К)

$$C = 808 + 0,314 \cdot t.$$

Тривалість нагріву у першому інтервалі, с

$$\tau_1 = \frac{R \cdot \rho \cdot \Delta h}{K_1 \cdot q_I}.$$

Аналогічно виконуються розрахунки для 2 та 3 інтервалів.

Загальний розрахунковий час нагрівання, с

$$\tau_p = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3.$$

Визначаємо похибку

$$\delta = \left( 1 - \frac{\tau_d}{\tau_p} \right).$$

Дані заносимо до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 Розрахункові та експериментальні дані

Інтервал часу	Щільність початкового потоку, Вт/м <sup>2</sup>	Щільність кінцевого потоку, Вт/м <sup>2</sup>	Середня щільність теплового потоку, Вт/м <sup>2</sup>	Коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	Критерій Біо	Температурна різниця, С	Тривалість нагріву	Розрахунковий час, с	За експериментом, с	Похибка, %
0-8	8969,0	7793,3	8367,4	30,2	0,8	109,1	334,7	931,4	1440,0	35,3
9-16	7793,3	5948,6	6829,5	37,6	1,0	77,1	294,6			
16-24	5948,6	3901,9	4853,5	43,8	1,1	48,1	302,1			

## 2.4 Кінцево-різницеві схеми рішення завдань нагріву

Допущення, які приймаються при математичному моделюванні нагріву різних тіл, дозволяють розглядати їх, як тіла простої форми - пластину, циліндр, кулю, і представити математичну модель внутрішнього теплообміну одновимірним диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності. Чисельне рішення цього рівняння виконали методом кінцевих різниць. З цією метою нижче розглянута кінцево-різницева апроксимація диференціального рівняння теплопровідності для деяких характерних схем нагріву тіл простої форми.

У разі симетричного нагріву безкінечного циліндра радіусом  $R$ , розрахункова схема якого представлена на рисунку 2.1, в кожен момент часу зміна температури в просторі відбувається тільки у напрямі координатної осі  $r$ , перпендикулярної до осі симетрії даного тіла.

При незалежних від температури теплофізичних характеристиках рівняння нестационарної теплопровідності, що описує нагрів циліндра, має вигляд

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \cdot \left( r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < r < R, \quad (2.1)$$

де  $t$  – температура, °С,

$\tau$  – поточне значення часу, с,

$\tau_k$  – кінцеве значення часу нагріву, с,

$c'$  – питома об'ємна теплоємність, Дж/(м<sup>3</sup>·К),

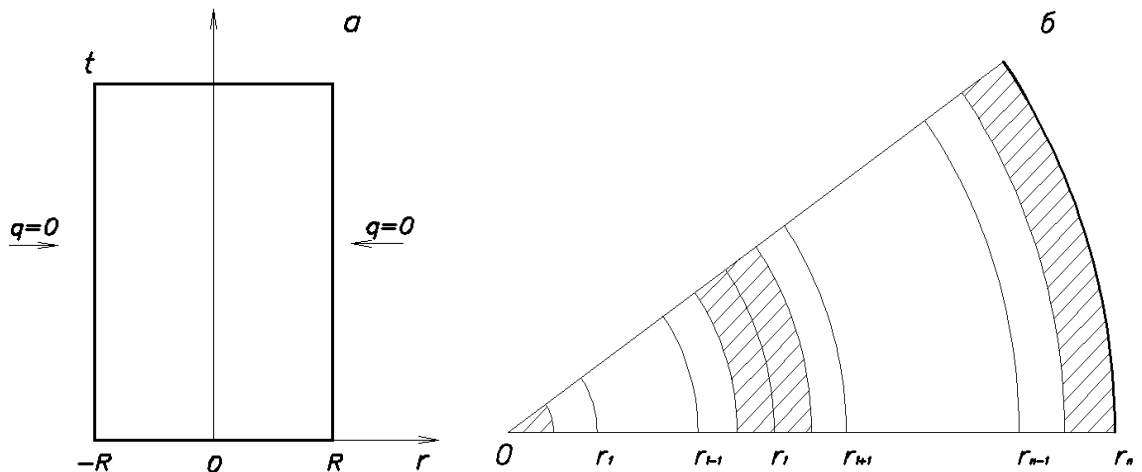
$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К),

$a$  – коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с,

$r$  – поточне значення радіус-вектора, м,

$R$  – радіус зовнішньої поверхні циліндра, м.

Рівняння (2.1) доповнили початковими умовами



а – розрахункова схема безкінечного циліндра, б – елементарний циліндричний шар безкінечного циліндра

Рисунок 2.1- Розрахункова схема симетричного нагріву безкінечного циліндра

$$t(r, 0) = t_H, \quad 0 \leq r \leq R, \quad (2.2)$$

умовами симетрії температурного поля для  $r = 0$

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (2.3)$$

і граничними умовами на поверхні тіла:

а) для випадку граничних умов першого роду

$$t|_{r=R} = t_w, \quad (2.4)$$

б) для випадку граничних умов другого роду

$$\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=R} = q_w \quad (2.5)$$

де  $t_n$  – початковий розподіл температури по перерізу тіла, °C,

$t_w$  – температура на поверхні тіла, °C,

$q_w$  – щільність зовнішнього теплового потоку на поверхні тіла, Вт/м<sup>2</sup>. У рівнянні (2.5) враховано, що при нагріві тіла зовнішній тепловий потік має протилежний напрям до осі  $r$ .

Замінімо безперервну функцію, що є рішенням крайової задачі (2.1) - (2.5), дискретною сітковою функцією. Для цього на просторово - часовій сітці

$$r_i = i \cdot \Delta r, \quad i = 0, \dots, n, \quad \Delta r = \frac{R}{n}, \quad (2.6)$$

$$r_k = k \cdot \Delta \tau, \quad k = 0, \dots, m, \quad \Delta \tau = \frac{\tau_k}{m}, \quad (2.7)$$

де  $\Delta r$  - величина кроку по координаті  $r$ , м,

$\Delta \tau$  - величина кроку за часом, с,

$n$  - кількість розрахункових вузлів на просторовій сітці,

$m$  - кількість розрахункових вузлів на тимчасовій сітці,

з використанням неявної чотирьохточкової різницевої схеми [5] представимо диференціальне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами в кінцево-різницевій формі. У даному циліндрі (рисунок 2.1а), виділимо елементарний циліндричний шар завдовжки один метр, радіусом  $r_i$  і завтовшки  $\Delta r$ , що відповідає деякому  $i$ -тому внутрішньому вузлу (рисунок 2.1б). Для виділеного елементарного порожнистого циліндра, визначимо його основні геометричні параметри:

а) радіус елементарного циліндричного шару

$$r_i = i \cdot \Delta r, \quad (2.8)$$

б) площа внутрішньої бічної поверхні виділеного елемента

$$F_i^S = 2 \cdot \pi \cdot r_{i-\frac{1}{2}} \cdot 1, \quad (2.9)$$

в) площа зовнішньої бічної поверхні виділеного елемента

$$F_i^H = 2 \cdot \pi \cdot r_{i+\frac{1}{2}} \cdot 1, \quad (2.10)$$

г) об'єм виділеного елемента

$$V_i = \pi \cdot (r_{i+\frac{1}{2}}^2 - r_{i-\frac{1}{2}}^2) \cdot 1, \quad (2.11)$$

Для даного елемента запишемо рівняння теплового балансу при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді

$$V_i \cdot c' \cdot (t_i^{k+1} - t_i^k) = -(Q_{i+\frac{1}{2}} - Q_{i-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta\tau, \quad (2.12)$$

де  $t_i^k$  - температура в  $i$ -тому вузлі в  $k$ -тий момент часу,

$Q_{i+\frac{1}{2}}$  - тепловий потік, що входить в  $i$ -тий елемент з боку сусіднього правого вузла через його зовнішню бічну поверхню, Вт,

$Q_{i-\frac{1}{2}}$  - тепловий потік, що виходить з  $i$ -того елемента через його внутрішню бічну поверхню і який передається сусідньому лівому вузлу, Вт.

Величини теплових потоків через бічні поверхні виділеного елемента відповідно до закону Фур'є представимо у виді

$$Q_{i+\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_{i+1}^{k+1} - t_i^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_i^S, \quad (2.13)$$

$$Q_{i-\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_i^{k+1} - t_{i-1}^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_i^{BH}, \quad (2.14)$$

Підставивши вирази (2.8) - (2.11), (2.13), (2.14) в рівняння (2.12) і виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового

балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді

$$t_i^{k+1} - t_i^k = \frac{\Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot (t_{i+1}^{k+1} - t_i^{k+1}) \cdot \frac{2i+1}{2i} - \frac{\Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot (t_i^{k+1} - t_{i-1}^{k+1}) \cdot \frac{2i-1}{2i},$$

де  $a = \frac{\lambda}{c'}$  - коефіцієнт температуропровідності, м<sup>2</sup>/с.

Позначимо

$$f_i^+ = \frac{\Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot \frac{2i+1}{2i},$$

$$f_i^- = \frac{\Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot \frac{2i-1}{2i}$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог диференціального рівняння (2.1) на внутрішніх вузлах просторово-часової сітки

$$\bar{f}_i^- \cdot t_{i-1}^{k+1} + (1 + \bar{f}_i^- + f_i^+) \cdot t_i^{k+1} - f_i^+ \cdot t_{i+1}^{k+1} = t_i^k. \quad (2.15)$$

Різницеве рівняння для лівого граничного вузла ( $i = 0$ ), що відповідає граничній умові на осі циліндра (2.3), отримаємо, записавши рівняння теплового балансу для елементарного осевого циліндра одиничної довжини, що має радіус  $\Delta r/2$  (рис. 2.1)

$$V_0 \cdot c' \cdot (t_i^{k+1} - t_0^k) = -Q_{0+\frac{1}{2}},$$

де  $V_0 = \frac{\pi \cdot \Delta r^2}{4} \cdot 1$  - об'єм виділеного елемента одиничної довжини, м<sup>3</sup>,

$F_0^H = 2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta r}{2} \cdot 1$  - площа бічної поверхні виділеного елемента м<sup>2</sup>,

$Q_{0+\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_1^{k+1} - t_0^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_0^H$  - тепловий потік, що входить у виділений

елемент з боку сусіднього правого вузла ( $i = 1$ ), Вт.



Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді

$$t_0^{k+1} - t_0^k = \frac{4 \cdot \Delta\tau \cdot a}{\Delta r^2} \cdot (t_1^{k+1} - t_1^k).$$

Позначимо

$$f_0^+ = \frac{2 \cdot \Delta\tau}{\Delta r^2} \cdot a$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог граничної умови (2.3) для вузла  $i = 0$ .

$$(1 + 2 \cdot f_0^+) \cdot t_0^{k+1} - 2 \cdot f_0^+ \cdot t_i^{k+1} = t_0^k. \quad (2.16)$$

Різницеве рівняння, що відповідає граничній умові першого роду (2.4), для правого граничного вузла  $i = n$  має вигляд

$$t_n^{k+1} = t_w^{k+1} \quad (2.17)$$

Різницеве рівняння, що відповідає граничній умові другого роду (2.5), для правого граничного вузла  $i = n$  отримаємо, записавши рівняння теплового балансу для край правого елементарного циліндричного напівшару, що має довжину один метр, радіус  $r_n$  і товщину  $\Delta r/2$

$$V_n \cdot c' \cdot (t_n^{k+1} - t_n^k) = -(Q_w - Q_{n-\frac{1}{2}}) \cdot \Delta\tau$$

де  $V_n = \pi \cdot (r_n^2 - r_{n-\frac{1}{2}}^2) \cdot 1$  - об'єм виділеного елемента одиничної довжини,  $\text{м}^3$ ,

$F_n^H = 2 \cdot \pi \cdot r_n \cdot 1$  - площа зовнішньої бічної поверхні виділеного елемента, м<sup>2</sup>,

$F_n^{BH} = 2 \cdot \pi \cdot r_{n-\frac{1}{2}} \cdot 1$  - площа внутрішньої бічної поверхні виділеного елемента, м<sup>2</sup>,

$Q_w = -q_w \cdot F_n^H$  - тепловий потік, що відповідає граничним умовам другого роду (2.5), входить у виділений елемент через його зовнішню бічну поверхню, Вт,

$Q_{n-\frac{1}{2}} = -\lambda \cdot \frac{t_n^{k+1} - t_{n-1}^{k+1}}{\Delta r} \cdot F_n^{BH}$  - тепловий потік, що виходить з виділеного елемента через його внутрішню бічну поверхню і який передається сусідньому лівому вузлу ( $i = n - 1$ ), Вт.

Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу для виділеного елемента при переході від k-того до k+1-го моменту часу у виді

$$t_n^{k+1} - t_n^k = \frac{8 \cdot q_w \cdot \Delta \tau}{c' \cdot \Delta r} \cdot \frac{n}{4 \cdot n - 1} - \frac{4 \cdot a \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \cdot \frac{2 \cdot n - 1}{4 \cdot n - 1} \cdot (t_n^{k+1} - t_{n-1}^{k+1}).$$

Позначимо

$$\bar{f}_n = \frac{2 \cdot a \cdot \Delta \tau}{\Delta r^2} \cdot \frac{2 \cdot n - 1}{4 \cdot n - 1},$$

$$\Delta t = \frac{2 \cdot q_w \cdot \Delta r}{\lambda} \cdot \frac{n}{2 \cdot n - 1}$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог граничної умови (2.5) для вузла  $i = n$

$$-2 \cdot \bar{f}_n \cdot t_{n-1}^{k+1} + (1 + 2 \cdot \bar{f}_n) \cdot t_n^{k+1} = t_n^k + 2 \cdot \bar{f}_n \cdot \Delta t. \quad (2.18)$$

Розрахунок дискретного температурного поля на кожному кроці за часом робимо шляхом спільного рішення системи рівнянь (2.15) - (2.18) методом прогону, суть якого полягає в тому, що вказана система рівнянь представляється у вигляді

$$t_i^{k+1} = \alpha_i \cdot t_{i+1}^{k+1} + \beta_i, \quad i = 0, \dots, n-1, \quad (2.19)$$

де  $\alpha_i, \beta_i$  - коефіцієнти прогону.

Для вузла  $i = 0$  величини  $\alpha_i, \beta_i$  знайдемо з дискретного аналога граничної умови на осі циліндра (2.16), представленого у формі рівняння (2.19)

$$t_0^{k+1} = \frac{2 \cdot f_0^+}{1 + 2 \cdot f_0^+} \cdot t_1^{k+1} + \frac{t_0^k}{1 + 2 \cdot f_0^+}.$$

Звідси

$$\alpha_0 = \frac{2 \cdot f_0^+}{1 + 2 \cdot f_0^+}; \quad \beta_0 = \frac{t_0^k}{1 + 2 \cdot f_0^+}. \quad (2.20)$$

Для внутрішніх вузлів  $i = 1, \dots, n-1$  величини  $\alpha_i, \beta_i$  знайдемо з дискретного аналога диференціального рівняння теплопровідності (2.15), представленого у формі рівняння (2.19)

$$t_i^{k+1} = \frac{f_i^+}{1 + f_i^+ + f_i^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})} \cdot t_{i+1}^{k+1} + \frac{t_i^k + f_i^- \cdot \beta_{i-1}}{1 + f_i^+ + f_i^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})}.$$

Звідси

$$\alpha_i = \frac{f_i^+}{1 + f_i^+ + f_i^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})}; \quad \beta_i = \frac{t_i^k + f_i^- \cdot \beta_{i-1}}{1 + f_i^+ + f_i^- \cdot (1 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.21)$$

Температуру у граничному вузлі  $i = n$  визначили залежно від виду граничних умов :

- а) для граничних умов першого роду - по рівнянню (2.17),  
 б) для граничних умов другого роду

$$t_n^{k+1} = \frac{t_n^k + 2 \cdot \bar{f}_n \cdot (\Delta t + \beta_{n-1})}{1 + 2 \cdot \bar{f}_n \cdot (1 - \alpha_{i-1})}. \quad (2.22)$$

Рішення системи різницевих рівнянь (2.15) - (2.18), записаних для цього кроку на осі часу, виконали в наступній послідовності:

а) при зміні  $i = 0, \dots, n - 1$  (прямий прогін) по рівняннях (2.20) і (2.21) вичислили значення коефіцієнтів прогону  $\alpha_i, \beta_i$ ;

б) для граничного вузла  $i = n$  по рівнянню (2.17) або (2.22) визначили температуру  $t_n$ ;

в) при зміні  $i = n - 1, \dots, 0$  (зворотний прогін) по рівнянню (2.19) визначили шукані значення температур  $t_i$ .

Після цього робиться перехід до наступного кроку за часом.

У разі несиметричного нагріву нескінченної двошарової пластини загальною товщиною  $S$ , розрахункова схема якої представлена на рисунку 2.2а, в кожен момент часу зміна температури в просторі відбувається тільки у напрямі координатної осі  $z$ , перпендикулярною до поверхні даного тіла.

З урахуванням залежності теплофізичних характеристик тіла  $\lambda(t)$ ,  $c'(t)$  від температури рівняння нестационарної теплопровідності, що описує несиметричний нагрів нескінченної двошарової пластини, має вигляд

$$c'(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \cdot \left[ \lambda(t) \cdot \frac{\partial}{\partial z} \right], \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < z < (S_1 + S_2), \quad (2.23)$$

де  $t$  – температура, °С,

$\tau$  – поточне значення часу, с,

$\tau_k$  – кінцеве значення часу нагріву, с,

$c'$  - питома об'ємна теплоємність, Дж/(м<sup>3</sup>·К),

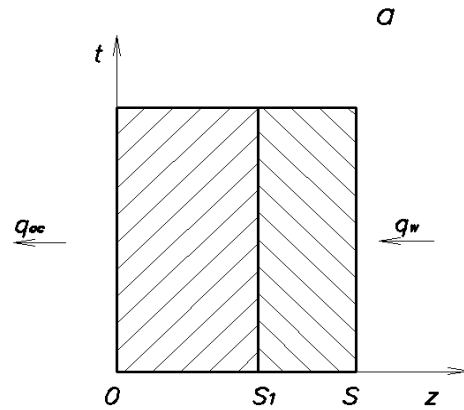
$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К),

$z$  – поточне значення координати, м,

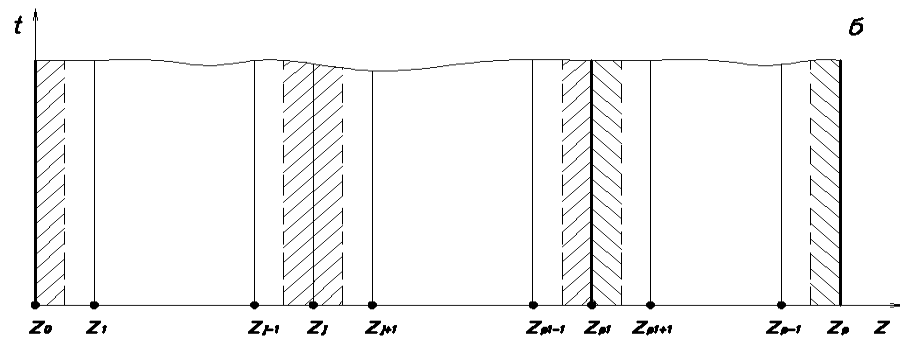
$S$  – товщина двошарової пластини, м,

$S_1$  – товщина першого шару, м,

$S_2$  – товщина другого шару, м.



а - схема двошарової пластини



б - елементарні плоскі шари двошарової пластини

Рисунок 2.2 - Розрахункова схема несиметричного нагріву безкінечної двошарової пластини

У даному випадку диференціальне рівняння (2.23) доповнили:

а) початковими умовами

$$t(z, 0) = t_i, \quad 0 \leq z \leq (S_1 + S_2), \quad (2.24)$$

б) граничними умовами на поверхні  $z = 0$ , що граничить з довкіллям

$$\lambda_1 \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=0} = \alpha_{o.c.} \cdot (t_{н.п.} - t_{o.c.}), \quad (2.25)$$

в) граничними умовами на поверхні  $z = S$ , гріючого середовища, що граничить з об'ємом

$$\lambda_2 \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=S} = q_w, \quad (2.26)$$

г) граничними умовами четвертого роду в площині зіткнення шарів  $z = S_1$

$$\lambda_1 \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=S_1} = \lambda_2 \cdot \left. \frac{\partial t}{\partial z} \right|_{z=S_1}, \quad (2.27)$$

де  $t_n$  – початковий розподіл температури по перерізу тіла, °С,

$$\alpha_{o.c.} = 2,56 \cdot (t_{н.п.} - t_{o.c.}) + 4,65 \cdot \frac{\left(\frac{t_{н.п.} + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{o.c.} + 273}{100}\right)^4}{t_{н.п.} - t_{o.c.}} \quad - \quad \text{коефіцієнт}$$

тепловіддачі випромінюванням і конвекцією від зовнішньої поверхні пластини, Вт/(м<sup>2</sup>·К),

$t_{н.п.}$  – температура зовнішньої поверхні пластини  $z = 0$ , °С,

$t_{o.c.}$  – температура довкілля, °С,

$\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності першого шару пластини, Вт/(м·К),

$\lambda_2$  – коефіцієнт теплопровідності другого шару пластини Вт/(м·К),

$q_w$  - щільність зовнішнього теплового потоку на поверхні тіла  $z = S$ , Вт/м<sup>2</sup>,

$q_{o.c.}$  - щільність теплового потоку з поверхні  $z = 0$ , що втрачається тілом в довкілля, Вт/м<sup>2</sup>.

У рівняннях (2.25), (2.26) враховано, що при нагріві і охолодженні тіла зовнішні теплові потоки мають напрям протилежний до осі  $z$ .

Замінімо безперервну функцію  $t(r, \tau)$ , що є рішенням крайової задачі (2.23) - (2.27), дискретною сітковою функцією  $t_j^k$ . Для цього на просторово-тимчасовій сітці

$$z_j = i \cdot \Delta z, \quad j = 0, \dots, p1, \dots, p, \quad \Delta z = \frac{s}{p}, \quad (2.28)$$

$$\tau_k = k \cdot \Delta \tau, \quad k = 0, \dots, m, \quad \Delta \tau = \frac{\tau_k}{m}, \quad (2.29)$$

з використанням неявної чотирьохточкової різницевої схеми представимо диференціальне рівняння теплопровідності з відповідними крайовими умовами в кінцево-різницевій формі. У рівнянні (2.28) величина  $p1$  відповідає номеру вузла на межі між окремими шарами пластини.

Застосовуючи раніше використаний підхід, виділили в двошаровій пластині (рисунок 2.2б) елементарні плоскі шари для внутрішніх і пограничних вузлів і записали для них рівняння теплового балансу. З урахуванням геометричних характеристик, виділених для аналізу елементів, зробили перетворення алгебри і отримали відповідні різницеві рівняння і коефіцієнти прогону :

1. Для внутрішніх вузлів першого шару  $j = 1, \dots, p1 - 1$ , і внутрішніх вузлів другого шару  $j = p1 + 1, \dots, p - 1$

$$-f_j^- \cdot t_{j-1}^{k+1} + (1 + f_j^+ + f_j^-) \cdot t_j^{k+1} - f_j^+ \cdot t_{j+1}^{k+1} = t_j^k, \quad (2.30)$$

$$\alpha_j = \frac{f_j^+}{1 + f_j^+ + f_j^- \cdot (1 - \alpha_{j-1})}, \quad \beta_j = \frac{t_j^k + f_j^- \cdot \beta_{j-1}}{1 + f_j^+ + f_j^- \cdot (1 - \alpha_{j-1})}, \quad (2.31)$$

де

$$f_j^- = \lambda_j^- \cdot \frac{\Delta \tau}{c' \cdot \Delta z^2}; \quad f_j^+ = \lambda_j^+ \cdot \frac{\Delta \tau}{c' \cdot \Delta z^2};$$

$$\lambda_j^- = \lambda \left( \frac{t_j^{k+1} + t_{j-1}^{k+1}}{2} \right); \quad \lambda_j^+ = \lambda \left( \frac{t_j^{k+1} + t_{j+1}^{k+1}}{2} \right); \quad c' = c'(t_j^{k+1}).$$

2. Для граничного узла  $j = p1$

$$-f_{p1}^+ \cdot t_{p1-1}^{k+1} + (1 + f_{p1}^+ + f_{p1}^-) \cdot t_{p1}^{k+1} - f_{p1}^+ \cdot t_{p1+1}^{k+1} = t_{p1}^k, \quad (2.32)$$

$$\alpha_{p1} = \frac{f_{p1}^+}{1 + f_{p1}^+ + f_{p1}^- \cdot (1 - \alpha_{p1-1})}, \quad \beta_{p1} = \frac{t_{p1}^k + f_{p1}^- \cdot \beta_{p1-1}}{1 + f_{p1}^+ + f_{p1}^- \cdot (1 - \alpha_{p1-1})}, \quad (2.33)$$

де

$$f_{p1}^- = \frac{2 \cdot \lambda_{1p1}^- \cdot \Delta \tau}{(c'_{1p1} + c'_{2p1}) \cdot \Delta z}; \quad f_{p1}^+ = \frac{2 \cdot \lambda_{2p1}^+ \cdot \Delta \tau}{(c'_{1p1} + c'_{2p1}) \cdot \Delta z};$$

$$\lambda_{1p1}^- = \lambda_1 \left( \frac{t_{p1}^{k+1} + t_{p1-1}^{k+1}}{2} \right); \quad \lambda_{2p1}^+ = \lambda_2 \left( \frac{t_{p1}^{k+1} + t_{p1+1}^{k+1}}{2} \right); \quad c'_{1p1} = c'_1(t_{p1}^{k+1}) \quad c'_{2p1} = c'_2(t_{p1}^{k+1}).$$

3. Температуру і різницеве рівняння для граничного узла  $j = p$

визначили

$$t_p^{k+1} = \frac{t_p^k + 2 \cdot f_p^- \cdot (\Delta t + \beta_{p-1})}{1 + 2 \cdot f_p^- \cdot (1 - \alpha_{p-1})}, \quad (2.34)$$

$$-2 \cdot f_p^- \cdot t_{p-1}^{k+1} + (1 + 2 \cdot f_p^-) \cdot t_p^{k+1} = t_p^k + 2 \cdot f_p^- \cdot \Delta t, \quad (2.35)$$

де

$$f_p^- = \lambda_{2p}^- \cdot \frac{\Delta \tau}{c'_{2p} \cdot \Delta z^2}; \quad \lambda_{2p}^- = \lambda_2 \left( \frac{t_p^{k+1} + t_{p-1}^{k+1}}{2} \right); \quad c'_{2p} = c'_2(t_p^{k+1});$$

$$\Delta t = \frac{q_w \cdot \Delta z}{\lambda_p^-}.$$



Різницеве рівняння для граничного вузла  $j = 0$ , що відповідає граничній умові третього роду (2.25), отримали, записавши рівняння теплового балансу для елементарного пограничного напівшару завтовшки  $\Delta z/2$  (рисунок 2.26)

$$V_0 \cdot c' \cdot (t_0^{k+1} - t_0^k) = - \left( Q_{0+\frac{1}{2}} - Q_{o.c.} \right) \cdot \Delta \tau,$$

де  $V_0 = \frac{\Delta z}{2} \cdot 1$  - об'єм виділеного елемента,  $m^3$ ,

$F_0^H = 1$  - площа бічної поверхні виділеного елемента,  $m^2$ ,

$Q_{0+\frac{1}{2}} = -\lambda_{1,0}^+ \cdot \frac{t_1^{k+1} - t_0^{k+1}}{\Delta z} \cdot F_0^H$  - тепловий потік, що входить у виділений

елемент з боку сусіднього правого вузла ( $j = 1$ ), Вт,

$Q_{o.c.} = -\alpha_{o.c.} \cdot (t_0^{k+1} - t_{o.c.}) \cdot F_0^H$  - тепловий потік, що виходить з виділеного елемента і передаваний в довкілля, Вт.

Виконавши відповідні перетворення алгебри, отримаємо рівняння теплового балансу виділеного елемента при переході від  $k$ -того до  $k+1$ -го моменту часу у виді

$$t_0^{k+1} - t_0^k = \frac{2 \cdot \Delta \tau \cdot \lambda_{1,0}^+}{c'_{1,0} \cdot \Delta z^2} \cdot (t_1^{k+1} - t_0^{k+1}) - \frac{2 \cdot \Delta \tau \cdot \alpha_{o.c.}}{c'_{1,0} \cdot \Delta z} \cdot (t_0^{k+1} - t_{o.c.}),$$

де

$$\lambda_{1,0}^+ = \lambda_1 \left( \frac{t_0^{k+1} + t_1^{k+1}}{2} \right); \quad c'_{1,0} = c'_1(t_0^{k+1}).$$

Позначимо

$$f_0^+ = \frac{\lambda_{1,0}^+ \cdot \Delta \tau}{c'_{1,0} \cdot \Delta z^2}, \quad b = \frac{\alpha_{o.c.} \cdot \Delta z}{\lambda_{1,0}^+}$$

і остаточно отримаємо різницевий аналог граничної умови (2.25) для вузла  $j = 0$

$$(1 + 2 \cdot f_0^+ + 2 \cdot f_0^+ \cdot b) \cdot t_0^{k+1} - 2 \cdot f_0^+ \cdot t_1^{k+1} = t_0^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot b \cdot t_{o.c.} \quad (2.36)$$

Для граничного вузла  $j = 0$  величини коефіцієнтів прогону знайдемо з дискретного аналога граничної умови (2.25), представленого у формі рівняння (2.19)

$$t_0^{k+1} = \frac{2 \cdot f_0^+}{1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (1 + b)} \cdot t_1^{k+1} + \frac{t_0^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot b \cdot t_{o.c.}}{1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (1 + b)}.$$

Звідси

$$\alpha_0 = \frac{2 \cdot f_0^+}{1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (1 + b)}; \quad \beta_0 = \frac{t_0^k + 2 \cdot f_0^+ \cdot b \cdot t_{o.c.}}{1 + 2 \cdot f_0^+ \cdot (1 + b)}. \quad (2.37)$$

Рішення системи різницевих рівнянь (2.30), (2.32), (2.35), (2.36), записаних для цього кроку на осі часу, виконали в наступній послідовності:

а) при зміні  $j = 0, \dots, p - 1$  (прямий прогін) по рівняннях (2.31), (2.33) і (2.37) вчислили значення коефіцієнтів прогону  $\alpha_j, \beta_j$ ,

б) для граничного вузла  $j = p$  по рівнянню (2.34) визначили температуру  $t_p$ ,

в) при зміні  $j = p - 1, \dots, 0$  (зворотний прогін) по рівнянню (2.19) визначили шукані значення температур  $t_j$ .

Після цього робиться перехід до наступного кроку за часом.

### 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

#### 3.1 Характеристика потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Об'єктом дослідження умов праці є лабораторія кафедри теплотехніки ЗДІА (ауд. №12). Тут встановлено обладнання, що використовує електроенергію: електродвигун насосу, електронагрівач, піч, освітлювальні прилади. Для проведення досліджень розміщений посуд, що працює під підвищеним тиском (0,3 МПа). У приміщенні є комунікації (водопровідні труби, електричні мережі). Всі вони є джерелами небезпечних та шкідливих факторів. Процес досліджень у лабораторії супроводжується утворенням надлишкового тепла, інфрачервоної радіації. Токсичні речовини у процесі досліджень у повітря робочої зони не виділяються. Може мати місце занос таких речовин зовні, так як приміщення розташовано поблизу основної транспортної магістралі індустріального місця. Можлива присутність у повітрі, наприклад, оксиду вуглецю та інших речовин, що виділяються при роботі автотранспорту та заносяться з промислової зони.

Для живлення силового устаткування, ручного електроінструменту і освітлювальної мереж застосовується напруга 380/220 В, що є небезпечним для життя [48].

Робота насосу створює в котельній шум і вібрацію. Шум по своєму походженню є механічним, за частотними характеристиками – середньо частотний (200...300 Гц), за часовими характеристиками – змінний, переривистий. Максимальний рівень звукового тиску спостерігається безпосередньо біля насосу – близько 70 дБА, що не перевищує гранично допустимого – 80 дБА [49].

Вібрація в лабораторії є загальною, технологічною, категорії 3а. Гранично допустимий рівень для частот  $\geq 16$  Гц складає 92 дБ [50]. Фактичний рівень не перевищує 50 дБ.

Поверхні дослідного посуду є джерелами тепловиділень, що можуть створювати в теплий період року підвищену температуру повітря робочої зони – більш 30 °С. Нагріті поверхні також можуть бути причиною термічного опіку при дотику до них.

Так як у приміщенні відсутнє природне освітлення, це треба відзначити як шкідливий фактор, бо природне освітлення більш сприятливе при виконанні будь - яких робіт, що потребують зорової напруги. Основні шкідливі чинники, що мають місце у лабораторії наведені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Оцінка факторів виробничого середовища і трудового процесу на робочому місці дослідника

Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативні значення [48, 49, 50]	Фактичні значення	III клас - шкідливі умови праці		
			I ст.	II ст.	III ст.
1. Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup> : 3-4 клас небезпеки оксид сірки SO <sup>2</sup> вуглецю оксид азоту оксиду азоту оксиду	10 20 5 2	1 5 0,05 0,02			
2. Пил переважно фіброгенної дії, мг/м <sup>3</sup>	4	2			
3. Вібрація загальна, дБ	92	50			
4. Шум, дБА	80	70			
5. Мікроклімат в приміщенні (теплий період року): - температура повітря, °С - відносна вологість, % - швидкість руху повітря, м/с	18-27 60 0,2 - 0,4	22-32 50 0,2		5	
- інфрачервоне випромінювання, Вт/м <sup>2</sup>	100	60			

За важкістю роботи дослідника відноситься до категорії Па – середньої важкості, за напруженістю роботу можна вважати помірно напруженою.

### 3.2 Заходи з поліпшення умов праці

Усі гарячі поверхні, до котрих можливий дотик у процесі роботи, покриваються теплоізоляцією, що виключає можливість отримання опікових травм персоналом і знижує тепловиділення у робочу зону. Температура зовнішньої поверхні теплоізоляції не повинна перевищувати 45 °С [51].

Одна з ефективних мір боротьби з тепло надлишками – загально змінна вентиляція. Ще ефективніше застосовувати кондиціонування повітря. Більше про ці заходи – у пункті 3.3.

Обертові частини насосу закриваються огорожувальними кожухами.

Боротьба з шумом та вібрацією, що виникають при роботі насосу, полягає в його правильній експлуатації. Насос встановлюється на гумові амортизатори, що демпфують вібрацію і знижують рівень звукового тиску. Треба постійно спостерігати за роботою насосу, усувати розхитаність, що може виникати. Для цього надійно затягують болтові та гвинтові з'єднання.

### 3.3 Виробнича санітарія

Роботи, що виконуються в лабораторії за енерговитратами можна віднести до різних категорій – 1а, 1б (легкі), 2а (середньої важкості). Для визначення норм мікроклімату у приміщення приймаємо роботи, які тут переважно виконуються, тобто роботи категорії 2а. Це робота, пов'язана з ходьбою, не вимагає перенесення вантажів або, що вимагає перенесення невеликих, до 10 кг, вантажів.

У приміщенні лабораторії застосовується механічна припливна загально змінна вентиляція. Кратність вентиляції 3 год<sup>-1</sup>, тобто протягом години повітря в приміщенні обмінюється 3 рази.

Витяжна вентиляція – природна, здійснювана за допомогою витяжних шахт та дефлекторів. Два отвори шахт розташовані на стінах приміщення і закриті ґратами. Вертикальні шахти прокладені у стінах і мають вихід на даху будівлі, де до них приєднані дефлектори.

У холодний період року для підтримання нормативної температури повітря робочої зони застосовується центральне водяне опалення. У випадку, коли воно не забезпечує мінімально необхідну температуру (17 °С), використовується електричні калорифери для обігріву персоналу.

Так як системи загальної вентиляції і центрального опалення не в змозі підтримувати температуру повітря у допустимих діапазонах (влітку температуру перевищує верхню межу, взимку іноді опускається нижче нижньої межі), у дипломному проекті пропонується встановлення системи кондиціонування повітря. Наприклад, можна застосувати Panasonic CS-W7NKD (CU-W7NKD):

- тип – спліт – система;
- установка внутрішнього блоку настінна;
- площа, що обслуговується – 34,7 м<sup>2</sup>;
- потужність у режимі охолодження – 3470 Вт;
- потужність у режимі обігріву – 3850 Вт;
- максимальний повітряний потік – 10,8 м<sup>3</sup> / хв;
- рівень звукового тиску – 29...39 дБА.

Згідно [55] приміщення лабораторії відноситься до IV розряду зорових робіт – роботи середньої точності з розміром об'єкту спостереження 05,...1 мм. Підрозряд зорових робіт – «в» (середній контраст і середній фон).

Так як у лабораторії відсутнє природне освітлення, в будь – який час доби застосовується штучне освітлення. Для більшості робіт, що мають місце у приміщення, використовується загальна система освітлення із застосуванням люмінесцентних ламп ДБ65 – 4. Потужність, споживана лампою – 65 Вт, світловий потік 4550 Лм, світловіддача – 70 Лм/Вт [54]. Застосування люмінесцентних ламп пояснюється їх значно більшою економічністю, ніж у

ламп розжарювання, спектральним складом світла, близьким до сонячного і доброю передачею кольорів. Лампи використовуються у світильниках ПВЛ 1 – 2x40 (захищений від пилу та вологи). Норма загальної освітленості для цього випадку – 200 Лк.

Для виконання деяких робіт застосовується комбінована система освітлення. При цьому додатково вмикаються світильники місцевого освітлення «Альфа» з лампами розжарювання Б – 100 або БК – 100 (споживана потужність 100 Вт, світловий потік відповідно 1350 і 1450 Лм, світловіддача – 13,5 і 14,5 Лм / Вт). Норма комбінованої освітленості – 300 Лк. Аварійне освітлення в аудиторії не передбачається.

### 3.4 Електробезпека

Основні споживачі електроенергії в аудиторії – насос і електронагрівач доцільної установки, освітлювальна установка у холодний період року – електрокалорифери.

Згідно ПБЕ [56] приміщення лабораторії відноситься до сухих (відносна вологість повітря не перевищує 60%), жарких (температура повітря може тривалий час перевищувати 30 °С), не пильних, без струмопровідної підлоги і без хімічно активного середовища.

Приміщення лабораторії відноситься до приміщень з підвищеною небезпекою поразки струмом, оскільки тут в теплий період року можлива температура повітря, що тривало перевищує 30 °С .

Для живлення виробничого устаткування використовується трифазна чотири провідна мережа змінного струму з глухозаземленою нейтраллю напругою 380 / 220 В.

Як захисні заходи від поразки електричним струмом в лабораторії застосовується:

– електрична ізоляція струмоведучих частин – гумова, поліхлорвінілова, бавовняна, нормативний опір ізоляції на ділянці (між

двома послідовно встановленими апаратами захисту або після останнього апарату) – 500 кОМ;

- знижена напруга для ручного електроінструменту 3 класу і переносних світильників – 12 В, з використанням знижувальних трансформаторів із зануленою вторинною обмоткою;
- подвійна електроізоляція ручного електроінструменту 2 класу – струмоведучих частин усередині корпусу і самого корпусу;
- захисне занулення електроустановок;
- захисне відключення – як додаткова міра захисту до занулення;
- електрозахисні засоби.

Електротехнічне обладнання має закрите виконання струмоведучих частин. Все електротехнічне обладнання заземлюється підключенням до загальної системи заземлення.

Як основних засіб захисту від дотику до не струмоведучих частин електроустановок, що випадково опинилися під напругою, у мережі з глухо заземленою нейтраллю застосовується захисне занулення [57]. Принцип його дії – перетворення замикання на корпус в однофазне коротке замикання (тобто замикання між фазним і нульовим захисним провідником) з метою викликати великий струм, здатний забезпечити спрацьовування захисту і тим самим автоматично відключити пошкоджену установку від мережі.

Ізолюючі електрозахисні засоби, що застосовуються при обслуговуванні електроустановок, діляться на основні та додаткові. Основні мають достатній опір, щоб витримати робочу напругу устаткування. Ними можна торкатися відкритих струмоведучих частин. Додаткові засоби не мають такого електричного опору. Їх призначення – підсилювати захисну дію основних засобів, разом з якими вони повинні застосовуватися.



### 3.5 Пожежна безпека

Категорія приміщення лабораторії за пожежною та вибухопожежною небезпеками – В. До цієї категорії відносяться приміщення, де обертаються тверді горючі і важкогорючі матеріали, горючі і важкогорючі рідини.

У лабораторії обертаються такі речовини, небезпечні у пожежному відношенні:

- мінеральні масла; температура спалаху (150...180) °С, температура самозаймання (250...400) °С; застосовуються у системах гідроприводу, змащення;
- електрична ізоляція – гумова, поліхлорвінілова, бавовняна;
- деревина з якої вироблені окремі предмети меблі, температура займання (270...300) °С, самозаймання – (330...470) °С;
- папір, температура займання 230 °С, самозаймання – 360 °С;
- пластмаси – конструктивний матеріал корпусів деякого обладнання, захисних щитків; це горючий матеріал, температура займання близько 400 °С, самозаймання – (500...580) °С [58].

У приміщенні лабораторії можливі пожежі класів А (тверді горючі речовини). В (горючі рідини) і Е ( електроустановки під напругою).

Приміщення лабораторії знаходиться у підвалі. Згідно [59] з такого приміщення передбачається один евакуаційний вихід, якщо його площа не перевищує 300 м<sup>2</sup> і кількість людей, що в ньому одночасно перебувають, не перевищує 5. Так як у приміщенні лабораторії один вихід, а число людей, що там знаходиться, часто більше 5, ми маємо порушення протипожежних норм. У цьому приміщенні має бути 2 евакуаційних виходи.

Ширина шляхів евакуації має бути не менше 1,0 м, дверей – не менше 0,8 м, висота проходів і дверей не менше двох метрів. Ці норми витримуються.

Двері з приміщення відкриваються назовні, по ході евакуації.

Для гасіння пожежі лабораторія обладнана ручним вуглекислотним вогнегасником типу ОУ – 5. На поверсі, у коридорі розташований потужний кран.

Близкавкозахист будинку, де розташована лабораторія відноситься до III категорії, зона захисту Б. Для захисту від удару блискавки металеві конструкції даху заземлені.

### 3.6 Розрахунок захисного заземлення

Необхідно розрахувати кількість вертикальних заземлювачів у системі повторного заземлення нульового проводу.

Вихідні дані:

- ґрунт – суглинок;
- вертикальні заземлювачі – труби довжиною  $l = 2$  м;
- діаметр труб  $d = 0,05$  м;
- відстань між заземлювачами  $a = 2$  м;
- ширина з'єднувальної смуги  $b = 0,05$  м;
- глибина закладення смуги  $t = 0,7$  м.

Горизонтальна смуга з'єднує верхні кінці вертикальних заземлювачів.

Розрахунок.

1. Нормативний опір розтіканню струму заземлюючого пристрою у мережі напругою 380 / 220 В [60], Ом

$$R_H = 4 .$$

2. Питомий електричний опір ґрунту [61], Ом·м

$$\rho = 80 .$$

3. Коефіцієнт сезонності для вертикального заземлювача [61]

$$\Psi_B = 1,3.$$

Розрахунковий питомий електричний опір ґрунту для вертикального заземлювача, Ом·м

$$\begin{aligned}\rho_B &= \Psi_B \cdot \rho \\ \rho_B &= 1,3 \cdot 80 = 104.\end{aligned}$$

Опір розтікання струму поодинокого вертикального заземлювача [61], Ом

$$\begin{aligned}R_o &= (\rho_B / 2\pi l) \cdot \left[ \ln 2l/d + 0,5 \ln \cdot \frac{(4t+3l)}{(4t+l)} \right], \\ R_o &= (104/2 \cdot 3,14 \cdot 2) \cdot \left[ \ln 2 \cdot \frac{2}{0,05} + 0,5 \ln \cdot (4 \cdot 0,7 + 3 \cdot 2)/(4 \cdot 0,7 + 2) \right] \\ &= 38,8.\end{aligned}$$

Орієнтована кількість вертикальних заземлювачів

$$n = 1,3 R_o / R_H = 1,3 \cdot \frac{38,8}{4} = 12,6.$$

Приймаємо  $n = 13$ .

Довжина з'єднувальної смуги при розташуванні вертикальних заземлювачів в ряд, м

$$\begin{aligned}l_c &= a \cdot (n - 1) \\ l_c &= 2 \cdot (13 - 1) = 24.\end{aligned}$$

Коефіцієнт сезонності для горизонтальної з'єднувальної смуги [61]

$$\text{при } l_c = 24 \text{ м} - \Psi_c = 2,3$$

Розрахунковий електричний опір ґрунту для хеднувальної смуги, Ом·м

$$\rho_c = \Psi_c \cdot \rho = 2,3 \cdot 80 = 184 .$$

Опір розтіканню струму з'єднувальної смуги, Ом

$$R_c = (\rho_c / 2\pi l_c) \cdot \ln(2l_c^2 / bt),$$

$$R_c = (184 / 2 \cdot 3,14 \cdot 24) \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 24^2}{0,05} \cdot 0,7\right) 12,7 .$$

Коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів і горизонтальної з'єднувальної смуги [61]

$$\eta_B = 0,61$$

$$\eta_c = 0,57.$$

Опір розтіканню струму з'єднувальної смуги з урахуванням екранування, Ом

$$R_r = R_c / \eta_c = 12,7 / 0,57 = 22,3 .$$

Опір розтіканню струму групи вертикальних заземлювачів, Ом

$$R_B = R_o / n \cdot \eta = \frac{38,8}{13} \cdot 0,61 = 4,89 .$$

Опір розтіканню струму заземлювача в цілому, Ом

$$R_3 = R_B \cdot \frac{R_r}{(R_B + R_r)}$$

$$R_3 = 4,89 \cdot \frac{22,3}{(4,89 + 22,3)} = 4,0 = R_H .$$

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі магістра виконано аналіз літературних джерел щодо дослідження процесів нестационарної теплопровідності, які відбуваються при нагріванні масивних тіл. Розглянуто особливості процесів теплообміну. Показано, що при нагріванні тіл утворюється різниця температур між поверхнею. У випадку, коли ця різниця невелика і нею можна знехтувати, то, відповідно до теорії нагрівання, такі тіла називаються термічно тонкими, у протилежному випадку тіла відносяться до розряду термічно масивних і тоді, властивості тіла визначаються значенням критерію Біо. На основі виконаного аналізу літературних джерел було обрано методику проведення фізичного експерименту по дослідженню процесу нагрівання термічно масивних тіл при постійній температурі печі.

Під час проведення експерименту було виконано нагрівання зразка масивного тіла виконаного з шамоту у електричній камерній печі протягом 1440 с. Було отримано експериментальні дані температури зразка як на поверхні так і у центрі. Побудовано графіки залежності температури печі та тіла від часу нагрівання. За розрахунковими даними отримано залежності щільності теплового потоку та коефіцієнту тепловіддачі від часу нагрівання. Згідно методики проведення експерименту та обробки його результатів було визначено середній тепловий потік, коефіцієнт тепловіддачі, критерій Біо та різницю температур в часових інтервалах. Отримано тривалість нагрівання у кожному інтервалі, а також загальний час нагрівання. Похибка вимірів склала 35 %. Така похибка пояснюється недосконалістю вимірювальної апаратури.

У розділі охорона праці та техніка безпеки розглянуто основні та небезпечні фактори при проведенні експериментів у лабораторії кафедри теплоенергетики та гідроенергетики, а також розглянуті фактори щодо їх усунення.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Есьман Р.И., Сапун Н.Н., Айдарова З.Б. Специальные вопросы тепломассообмена. – Минск: БНТУ, 2014. – 65 с.
2. Бельский А.П., Лакомкин В.Ю. Специальные вопросы тепломассообмена в энергетических и теплотехнологических процессах и установках. – СПб ГТУ РП. СПб., 2011. – 98 с.
3. Цяпко М.Ф., Яловий М.І., Павленко А.М. Гідрогазодинаміка: Монографія / Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2008. – 222 с.
4. Краснощеков Е.А., Сукомел А.С. Задачник по теплопередаче. - М.: Энергия, 1980. - 269 с.
5. Цяпко М.Ф., Мамаєв Л.М. Гідрогазодинаміка. -К.: ІДСМО, 1995. - 211с.
6. Цирельман Н.М. Теория и прикладные задачи тепломассопереноса. Часть I: Учеб. Пособие. – Уфа, 2002. – 108 с.
7. Мазо А.Б., Поташев К.А. Гидродинамика. Учебное пособие. – Казань: КГУ, 2008. – 126 с.
8. Акмен Р.Г. Лекции и задачи по курсу тепло- и массообмен. – Харьков: НТУ"ХПИ", 2007.– 146с.
9. Альтшуль А.Д., Иселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. -М.: Стройиздат, 1975.-323с
10. Грабовський А.М., Иванов К.Ф., Дунчевский Г.М. Гидромеханика и газовая динамика. Сборник задач. -К.: Вища школа, 1987. - 164с.
11. Емцев Б.Т. Техническая гидромеханика. -М.: Машиностроение, 1983. -320с.
12. Хавкин Ю.И. Центробежные форсунки. - Л.: Машиностроение, 1976. - 167с.
13. Дейч М.Е. , Заранкин А.Е. Гидрогазодинамика. -М.: Энергоатомиздат, 1984. -384с.

14. Механика жидкости и газа / Под ред. А.Н. Минаева. -Металлургия, 1987. -304с.
15. Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов П. А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена .-Г.: Наука, 1984.- 285 с.
16. Огурцов А. П., Каримов И. К., Мамаев Л. М.. Математические методы и расчеты на ЭВМ. - К.: ИСМО, 1997. - 192 с.
17. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Изд. 4.-Г.: Энергоиздат, 1981.- 496 с.
18. Лыков А. В. Теория теплопроводности.-Г.: Высшая школа, 1967.- 600 с.
19. Коддоба Л. А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности.- Г.:Наука, 1975.- 227 с.
20. Расчеты нагревательных печей/С. И. Аверин, Э.Г. Гольдфарб, А.Ф. Кравцов и др.Под ред. Тайца Н.Ю.-К. :Техника, 1969.- 540 с.
21. Гольдфарб Э. Г. Теплотехника металлургических процессов.-Г.: Metallurgy, 1967.- 439 с.
22. Постольник Ю. С. Приближенные исследовательский приемы в термомеханике.-К.-Донецк: Высшая школа, 1984.- 158 с.
23. Яловой Н. И., Рыжов А. Ф. Исследование методом возмущения затвердения цилиндрического слитка // Изв. вузов. Черная металлургия. - 1983. - №8, - с. 96-98.
24. Горбунов А. Д. Расчет процессов теплопроводности в телах сложной формы // Изв. вузов. Черная металлургия.-1985.-№10.- с.114-119.
25. Казанцев Э. И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирование. - Г.: Metallurgy, 1975. - 363 с.
26. Осипова В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена. -Г.: Энергия, 1969. - 392 с.

27. Перелетов И.И. Высокотемпературные теплотехнологические процессы и установки ( Под ред. Ключникова А.Д. –М.: Энергоатомиздат, 1989.- 336с.)
28. Високотемпературные теплотехнологические процессы и установки в металургии. Учебн. пос./ Ревун М.П. и др. Запорожье: ЗГИА.- 2002 -304 с.
29. Розенгарт Ю.И. и др. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах.-К.: Вища школа, 1986.- 296с.
30. Ващенко А.И. и др.. Металлургические печи, Часть 2 ( Под ред. Глинкова М.А.) – М.: Metallurgizdat, 1964.- 428с.
31. Ю.П. Филимонов и др.. Металлургическая теплотехніка. Часть 2 ( Под ред. Глинкова М.А.- М.: Металургия – 1974,520с.
32. Аверин С.И. и др.. Расчеты нагревательных печей (Под ред. Тайца Н.Ю.- К.: Техніка, 1969).
33. Теплотехнические расчеты металлургических печей ( Под ред. А.С.Телегина.-М.: Металлургия, 1970.-528с.
34. Семикин И.Д. и др.. Топливо и топливное хозяйство металлургических заводов.- М.: Металлургия, 1965.- 392с.
35. Расчеты нагревательных и термических печей. Справочник ( Под ред. В.М.Тымчака и В.А. Гусовского.- М.: Металургия,1983.- 481с.
36. СНіП 21-01-97. Пожежна безпека будівель та споруд. [Електронний ресурс]. URL: <http://fireman.ua/bd/snip/snip21-01-97.htm>.
37. ГН 2.1.6.1338 - 03. Гранично допустимі концентрації (ГДК) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць. [Електронний ресурс]. URL: <http://gost.oktvab.ua/Data1/44/44437/index.htm>.
38. ДБН 30494-96. Будівлі житлові і суспільні параметри мікроклімату в приміщеннях. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.proplex.ua/dealers/gost/gost-30494-96>.
39. ДБН 12.1.005-88. Система стандартів безпеки праці. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони. [Електронний ресурс]. URL: <http://www.gosthelp.ua/gost/gost1583>.



40. СанПіН 2.1.2.1002. Санітарно-епідеміологічні вимоги до житлових будівель та приміщень. [Електронний ресурс]. URL: <http://tehbez.ua/Docum/DocumShow DocumID 328>.

41. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартів безпеки праці. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони. (Зміни №1 20.06.2000). - М.: Вид-во стандартів, 1988. - 6 с.

42. ППБ 01 - 03. Правила пожежної безпеки в Україні. - [Електронний ресурс]. URL: <http://www.0-1.ua/law/showdoc.asp? Dp = ppb01-03>.