

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНИ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістерський) рівень
(рівень вищої освіти)

на тему «Аналіз шляхів покращення теплообміну у теплотехнічній установці
промислового підприємства»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1442
спеціальності 144 Теплоенергетика
(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Теплоенергетика
(назва освітньої програми)

_____ Градова А.О.
(ініціали та прізвище)

Керівник к.т.н., доц. Осаул О.І.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент ст. викл. Таратута В.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2023


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут _____
Кафедра Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти другий (магістерський) рівень _____
Спеціальність 144 Теплоенергетика
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., доц.

« _____ »  В.Л. Коваленко
2023 року

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

Градова Аліна Олексіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи «Аналіз шляхів покращення теплообміну у теплотехнічній установці промислового підприємства»

керівник роботи Осаул О.І., к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 01 » травня 2023 року № 639 - с

Строк подання студентом роботи 01 грудня 2023 р.







3 Вихідні дані до роботи : технічна характеристика основного теплотехнічного обладнання промислового підприємства, теплопровідність матеріалу $\lambda=21$ Вт/(м·°С), питома теплоємність $c=0,32$ кДж/(кг·°С), коефіцієнт температуропровідності $a = 0,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с, маса капсул -1500 кг, температура печі-1200°С, потужність печі 75 кВт, напруга живлення- 220 В, висота печі - 2,130 м.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1) Аналіз шляхів утилізації вторинної сировини промислових підприємств. 2) Дослідження режиму нагріву матеріалів у теплотехнічній установці. 3) Чисельне дослідження ефективних теплофізичних властивостей шихти.

5 Перелік графічного матеріалу 1) Двокамерна нагрівальна піч промислового підприємства. 2) Визначення коефіцієнту температуропровідності дрібнодисперсної шихти за методом Н.Ю.Тайца. 3) Зовнішній вигляд металевої

капсули, що нагрівалася. 4) Результати експериментальних лабораторних досліджень. 5) Результати порівняння експериментального температурного поля зразка з його розрахунковим аналогом.


6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Осаул О.І. к.т.н., доцент		
Розділ 2	Осаул О.І. к.т.н., доцент		
Розділ 3	Осаул О.І. к.т.н., доцент		

5 Дата видачі завдання 10.09.2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Срок виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз шляхів утилізації вторинної сировини промислових підприємств	03.10.2023	
2	Дослідження режиму нагріву матеріалів у теплотехнічній установці	30.10.2023	
3	Чисельне дослідження ефективних теплофізичних властивостей шихти	27.11.2023	


Студент 
(підпис)

Градова А.О.
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи 
(підпис)

Осаул О.І.
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер 
(підпис)

С.В. Башлій
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

А.О. Градова. Аналіз шляхів покращення теплообміну у теплотехнічній установці промислового підприємства.

Кваліфікаційна випускна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник О.І.Осаул. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні. Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, 2023.

У кваліфікаційній роботі магістра проведено аналіз шляхів утилізації вторинної сировини промислових підприємств. В роботі проведено комплекс лабораторних досліджень теплофізичних закономірностей, вибір оптимальних умов підготовки шихти та технології отримання спечених матеріалів із вторинної сировини стосовно до умов промислового підприємства.

Рециклінг дрібнодисперсних металовмісних відходів металургійного виробництва найбільш ефективний при використанні сучасних технологій згрудкування, до якого відноситься спікання у капсулах.

Ключові слова: ШИХТА, ВТОРИННА СИРОВИНА, ЗГРУДКУВАННЯ, СПКАННЯ, ДРІБНОФРАКЦІЙНІ ВІДХОДИ, ПЛАНУВАННЯ НАУКОВОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ, МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ.

ABSTRACT

Gradova A.O. Analysis of ways to improve heat transfer in the heat engineering installation of an industrial enterprise.

Qualifying final work for the degree of master's degree in specialty 144 - Heat Power Engineering, supervisor O.I. Osaul. Zaporizhzhia National University.

Engineering Educational and Research Institute named after Y.M. Potebnya.
Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, 2023.

The master's thesis analyzes ways to utilize secondary raw materials from industrial enterprises. The work includes a set of laboratory studies of thermophysical regularities, selection of optimal conditions for the preparation of the charge and technology for the production of sintered materials from secondary raw materials in relation to the conditions of an industrial enterprise.

The recycling of fine metal-containing waste from metallurgical production is most effective when using modern lumping technologies, which include sintering in capsules.

KEYWORDS: CHARGE, SECONDARY RAW MATERIALS, LUMPING, SINTERING, FINE WASTE, PLANNING OF A SCIENTIFIC EXPERIMENT, MATHEMATICAL MODEL.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ	9
1.2 Існуючі методи згрудкування дрібнодисперсних матеріалів	9
1.3 Гаряче брикетування (згрудкування) при нагріванні і обтиску	11
2 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ НАГРІВУ МАТЕРІАЛІВ У ТЕПЛОТЕХНІЧНІЙ УСТАНОВЦІ	14
2.1 Розрахунок пропонованої печі	14
2.2 Розрахунок нагрівача обраної печі	37
2.3 Обґрунтування складу шихти	46
2.4 Визначення теплофізичних властивостей для обраного складу шихти	47
2.5 Експериментальна частина	54
2.5.1 Установка для визначення теплофізичних властивостей і експеримент	54
2.5.2 Результати експерименту і обробка результатів для отримання теплофізичних властивостей	56
3 ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ	63
ВИСНОВКИ	67
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	68

ВСТУП

Актуальність роботи. Однією з актуальних проблем чорної металургії є вдосконалення технології переробки вторинної сировини. В цій роботі розглянуто питання ресурсозбереження при утилізації відходів основного виробництва промислового підприємства.

Мета роботи - дослідження режиму нагріву матеріалів у теплотехнічній установці задля рішення проблеми утилізації вторинної сировини промислового підприємства.

Задачі дослідження. Для досягнення зазначеної мети дослідження в магістерській роботі вирішуються такі задачі:

1. аналіз шляхів утилізації вторинної сировини промислових підприємств;
2. постановка експерименту, отримання експериментальних даних і їх обробка, складання залежностей і графіків;
3. визначення ефективного коефіцієнта температуропровідності шихтових матеріалів і, як наслідок, розробка режиму нагріву матеріалів, що брикетуються і спікаються;
4. тепловий розрахунок електричної колпакової печі для спечення і брикетування дрібнодисперсних відходів;
5. формування математичної моделі нагріву вторинної сировини в капсулі;

Об'єкт дослідження є технологія отримання спечених матеріалів на основі високолегованої вторинної сировини, яка утворюється в процесі диспергування розплаву стали, силовому шліфуванні, обробці металу тиском в умовах промислового підприємства.

Предмет дослідження – теплофізичні властивості та температурний режим нагріву матеріалів, що спікаються у теплотехнічній установці промислового підприємства.

Методи дослідження: використано сучасний математичний апарат з застосуванням персональних електронно-обчислювальних машин (ПЕОМ) для здійснення математичного моделювання нагріву вторсировини в капсулі, обробки експериментальних даних і розрахунку коефіцієнта температуропровідності. Використано розрахункові, теоретичні, лабораторні методи дослідження.

1 АНАЛІЗ ШЛЯХІВ УТИЛІЗАЦІЇ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

В умовах екстенсивного розвитку економіки режим економії означає раціональне споживання ресурсів. В умовах інтенсифікації виробництва, прискорення науково-технічного прогресу головним результатом режиму економії стає перехід до більш високого рівня ресурсозберігаючого типу відтворення. Ресурсозбереження стає якісно новим чинником виробництва [1]. Особливо важливо ресурсозбереження в металургії.

На кожній стадії утворюються відходи, металургійна цінність яких досить висока і в даний час не реалізована в повній мірі. Серед них: прокатна і ковальська окалина, пил установки аспірації, колошниковий пил, шлами, чавунна й сталева стружка, коксовий дріб'язок, та інші.

З одного боку, переробка і утилізація відходів, і використання їх у вигляді відносно дешевої металургійної сировини дасть значне зниження витрат на шихту, підвищить якість і конкурентоспроможність, а головне - знизить собівартість готової продукції. З іншого боку, очищення цілих регіонів, де вишикувалися величезні техногенні родовища відходів, а також утилізація поточних накопичень відходів від вищеперелічених виробництв, в результаті - рішення екологічної проблеми [2].

1.1 Існуючі методи згрудкування дрібнодисперсних матеріалів

Згрудкування це - одна із актуальних завдань у підготовці залізовмісних матеріалів металургійного переділу. В даний час є наступні способи згрудкування дрібних відходів та руд: брикетування, агломерація та грануляція.

Агломерація являє собою процес одержання шматків (агломерату) шляхом спікання дрібної руди та концентрату з паливом при високій температурі горіння. Процес агломерації це – високотемпературний процес, тому частка шкідливих домішок (наприклад, сірка) сублімується.

Грануляція (згрудкування-скочування) це – процес одержання окатишів, який заснований на властивості зволжених тонко подрібнених частинок руди чи концентрату утворювати окатиші більшої чи меншої крупності та міцності, яким методом скочування в спеціальних апаратах надають необхідного розміру та форми, а за наступним випалом - підвищеної міцності.

Брикетування це – процес одержання шматків (брикетів) з добавками чи без добавок зв'язувальних речовин із подальшим пресуванням суміші в брикети необхідних розмірів і форм [14].

Пресування може бути як холодним та і гарячим. Процес холодного пресування полягає в наступному: до сталевій матриці прес-форми з піддоном засипають потрібну кількість порошкової шихти та пресують її пуансоном. В результаті цього різко зменшується обсяг порошку, та збільшується контакт між окремими частками, а також відбувається механічне їх зчеплення. Тому міцність пресування підвищується, а пористість - зменшується. Недолік такої схеми пресування в нерівномірності розподілу тиску за висотою заготівлі із-за тертя її об стінки матриці. Тому заготівля, отримана у таких прес-формах володіє різною міцністю, щільністю та пористістю за висотою. Завдяки такому способу одержують заготівлі простої форми та невеликої висоти.

Гаряче пресування поєднує формування і спікання заготівель. Цей процес здійснюється у графітових прес-формах у процесі індукційного або електроконтактного нагрівання. За рахунок високої температури тиск при гарячому пресуванні можливо значно зменшити. Гаряче пресування дозволяє одержувати матеріал без пор із високими фізико-механічними властивостями. Гаряче пресування можна здійснювати і у вакуумі, в

захисній чи відновній атмосфері, у широкому інтервалі температур (1200...1800) °С і при більш низькому тиску, а ніж холодне пресування. Додавання тиску зазвичай проводиться після нагрівання порошоків до потрібної температури. Цим методом одержують вироби із важко деформованих матеріалів [15].

1.2 Гаряче брикетування (згрудкування) при нагріванні і обтиску

Одночасне пресування та спікання порошоків називають гарячим пресуванням, однак за характером явищ вказаний процес стоїть ближче до спікання під тиском. Гаряче пресування це - поєднаний процес пресування та спікання, який проведений за температурою, що складає (0,5...0,9) від температури плавлення $T_{пл}$ основи формованого матеріалу.

Гаряче пресування дає змогу практично реалізувати спостерігаєме на етапі підвищення температури збільшення плинності матеріалів та отримати фактично безпористі вироби, що особливо важливо задля крихких металів.

Кожній температурі гарячого пресування відповідає певний мінімальний тиск, при якому може бути одержаний малопористий виріб впродовж короткого часу.

Пресування за температури вище кімнатної, але нижче температури зняття наклепу металевих частинок називають "теплим". Найбільш істотним результатом гарячого пресування можна вважати максимально швидке ущільнення матеріалу та отримання брикетів із мінімальною пористістю за порівняно малим тиском пресування.

Механізми ущільнення ідентичні до того, що можна спостерігати при спіканні: утворення міжчастинкового контакту та збільшення щільності із одночасним збільшенням розмірів часток, а також подальше зростання частинок за незначного додаткового ущільнення.

Властивості гарячепресованого виробу істотно залежать від умов пресування. Зазвичай, такі вироби мають більш високу межу міцності, велике подовження, підвищену твердість, кращу електропровідність і більш точні розміри, ніж вироби, які отримані шляхом роздільного пресування та спікання. Окрім цього, вищезазначені вироби відрізняються дрібнозернистою структурою, а також вони за механічними властивостями нерідко не поступаються литим деталям. Гарячим може бути будь-який із відомих способів формування (у прессформах, ізостатичне та мундштучне пресування, прокатка). З метою нагріву використовують, зазвичай, електричний струм. З ціллю запобігання пресованого матеріалу від окислення використовують захисні середовища (відновні чи інертні) або вакуумування.

Спікання це - одна із основних технологічних операцій порошкової металургії, в процесі якої відбувається перетворення брикету, який спресований з порошоків, в міцне спечене тіло із властивостями, які наближаються до властивостей компактного матеріалу. Тому зрозуміло, що з усіх питань теорії процесу порошкової металургії найбільший інтерес фахівці виявляють саме до теорії спікання [5].

У процесі спікання пресованих брикетів та деталей і заготівель з порошоків високолегованих сталей та сплавів виникає небезпека їх окислення у зв'язку із наявністю великих кількостей хрому, а у окремих марках також і титану, що відрізняє їх високою термодинамічною активністю. Вищезазначені порошки потребують необхідних спеціальних умов для безкисневого спікання, особливо при низьких температурах (500...1000) °С, у випадку, коли виникає небезпека окислення хрому та титану, які утворюють міцні окисли Cr_2O_3 і TiO [4].

Теперішній стан теорії процесів спікання характеризується наявністю різноманітних точок зору щодо процесу спікання, а разом з тим і недоліком експериментальних даних, які підтверджують теоретичні висновки. Незважаючи на досить велику кількість робіт, які присвячені вивченню

процесів спікання, на даний час ще немає повної фізичної і математичної теорії спікання однокомпонентних систем, не кажучи вже про процеси спікання багатоконпонентних систем чи про спікання із утворенням рідкої фази. Своєрідність сучасної порошкової металургії на теперішній час полягає в тому, що її технологія в багатьох випадках випереджає теорію. Параметри процесу спікання, такі як температура, тривалість і атмосфера, на практиці зазвичай приймаються емпірично, без належного пояснення і обґрунтування.

Заключна стадія спікання відбувається при температурі, яка становить $(0,7...0,9)$ від температури плавлення $T_{пл}$ металу порошку та характеризується інтенсивним підвищенням щільності брикету, завершується процес відновлення оксидів, контакти між частинками стають повністю металевими та відбуваються всі основні процеси спікання - згладжування поверхні частинок, сфероїдизація та коалесценція пір, рекристалізація і насамперед зміцнення. Зрозуміло, що такий постадійний поділ процесу спікання являється умовним, тому що всі процеси на етапі спікання відбуваються одночасно [5].

2 ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ НАГРІВУ МАТЕРІАЛІВ У ТЕПЛОТЕХНІЧНІЙ УСТАНОВЦІ

2.1 Розрахунок пропонованої печі

Проведений аналіз коефіцієнтів застосування нагрівальних печей заводу "Дніпроспецсталь" показав, що існує деякий резерв потужностей, який відкриває перспективи можливостей використання вищезазначеного обладнання у процесах спікання заздалегідь підготовленої вторинної сировини. Стає очевидною потреба в розробці та впровадженні технології утилізації вторинної сировини в умовах власного виробництва. Але, при неможливості задіяння печей попереднього нагріву з метою спікання дрібнодисперсних відходів пропонується розрахунок додаткової електричної ковпакової печі задля нагрівання капсул.

Ковпакова піч це - циліндрична камера із люком знизу. Завантаження проводиться знизу, завдяки маніпулятору. Ковпакова печ широко застосовується на металургійних заводах. Потужність печі - 75 кВт. Завдяки тому, що печі герметизовані, нагрівання та охолодження садки виконується в захисній атмосфері.

Тепловий розрахунок електричної печі.

Проект електричної печі для нагріву капсул з діаметром 500 мм та довжиною 1720 мм. Температурний режим складається із нагріву до 1150 °С. В період нагріву температурний перепад у виробках не повинен перевищувати 200 °С. Теплопровідність матеріалу прийmemo рівній $\lambda=21$ Вт/(м·°С), питома теплоємність $c = 0,32$ кДж/(кг·°С), коефіцієнт температуропровідності $a = 0,9 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Підігрівання капсули повинно відбуватися у вертикальному положенні. Маса капсули приймаємо 1500 кг. Тому що за завданням підігрів повинен виконуватися у вертикальному положенні капсул і продуктивність установки невелика, то найбільш відповідним типом печей є ковпакові

циліндричні електричні печі, які розраховані на одночасний підігрів однієї капсули.

Визначимо час нагріву капсули.

Температуру печі приймаємо - 1200 °С.

Корисний тепловий потік q_n , Вт/м², визначається за формулою:

$$q_n = C_{np} \left[\left(\frac{T_{печі}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{вир}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.1)$$

де q_n – постійний тепловий потік, який сприймається одиницею поверхні виробів, які нагріваються, Вт/м²;

C_{np} – приведений коефіцієнт промінєвипускання;

$T_{печі}$ – поточна температура печі, К;

$T_{вир}$ – поточна температура виробу, К.

$$C_{np} = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{вир}} + \frac{F_{вир}}{F_{печі}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{печі}} - 1 \right)}, \quad (2.2)$$

де $\varepsilon_{вир}$ – ступінь чорноти виробу, приймаємо рівною 0,8;

$\varepsilon_{печі}$ – ступінь чорноти стін пічної камери і нагрівачів, приймаємо рівною 0,9;

$F_{вир}$ – площа поверхні виробу, м²,

$F_{печі}$ – площа поверхні печі, м².

$$F_{вир} = 2 \cdot \pi \cdot R^2 + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L, \quad (2.3)$$

$$F_{вир} = 3,14 \cdot 0,25^2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 1,72 = 3,0929 \text{ м}^2,$$

$$F_{неці} = 2 \cdot \pi \cdot R^2 + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot L, \quad (2.4)$$

$$F_{неці} = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5^2 + 2 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 2,13 = 8,2582 \text{ м}^2.$$

Тоді:

$$c_{np} = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + \frac{3,0929}{8,2582} \left(\frac{1}{0,9} - 1 \right)} = 4,4595.$$

Приймаємо, що температура виробів у кінці першого періоду становить 0,85 кінцевої температури:

$$T'_{\text{вир}} = 0,85 \cdot t_{\text{вир}} + 273, \quad (2.5)$$

$$T'_{\text{вир}} = 0,85 \cdot 1150 + 273 = 977,5 + 273 = 1250,5 \text{ K},$$

$$T'_{\text{неці}} = t_{\text{неці}} + 273, \quad (2.6)$$

$$T'_{\text{неці}} = 1150 + 273 = 1423 \text{ K},$$

$$q_n = 4,4595 \left[\left(\frac{1423}{100} \right)^4 - \left(\frac{1250,5}{100} \right)^4 \right] = 73805,733 \text{ Вт/м}^2.$$

Визначаємо максимально допустимий питомий тепловий потік q_n з умови $\Delta t_{\text{max}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, Вт/м^2 :

$$q_n^{\text{don}} = \frac{\Delta t \cdot 2 \cdot \lambda}{R}, \quad (2.7)$$

де λ – теплопровідність матеріалу, $\lambda = 21$ Вт/(м·К);

Δt – максимально допустимий температурний перепад у виробі, приймаємо, що $\Delta t = 200$ °С;

R – радіус капсули, м,

$$q_n^{\text{don}} = \frac{200 \cdot 2 \cdot 21}{0,25} = 33600 .$$

Кінцева температура поверхні виробу етапа нагрівання при $q_{\text{п}} = \text{const}$:

$$t''_{\text{sup}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left[\left(\frac{T''_{\text{nevi}}}{100} \right)^4 - \frac{q_n^{\text{don}}}{c_{\text{np}}} \right]} - 273, \quad (2.8)$$

де T''_{nevi} – кінцева температура нагріву капсули, К:

$$t''_{\text{sup}} = 100 \cdot \sqrt[4]{\left[\left(\frac{1423}{100} \right)^4 - \frac{33600}{4,4595} \right]} - 273 = 1079,6^{\circ}\text{C} .$$

Час нагріву капсули до $t''_{\text{ia}} = 1079,6^{\circ}\text{C}$:

$$\tau_I = \frac{\left[0,25 \cdot \frac{R^2}{a} + \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot a \cdot q_i^{\text{air}}} \cdot (t''_{\text{ia}} - t'_{\text{ia}}) \right]}{3600}, \quad (2.9)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

$t'_{\text{п\acute{o}в}} - \text{початкова температура поверхні, } ^\circ\text{C}.$

Вважаючи, що початкова температура виробу склала 10°C , отримуємо, що температура поверхні виробу до моменту регулярного режиму досягне значення:

$$t'_{\text{нов}} = 1,27 \cdot \Delta t + t_{\text{нач}}, \quad (2.10)$$

$$t'_{\text{нов}} = 1,27 \cdot 200 + 10 = 264^\circ\text{C}.$$

Температура на його осі:

$$t'_{\text{центр}} = 0,27 \cdot \Delta t + t_{\text{поч}}, \quad (2.11)$$

$$t'_{\text{центр}} = 0,27 \cdot 200 + 10 = 64^\circ\text{C}.$$

Температура на осі до моменту закінчення регулярного режиму:

$$t''_{\text{центр}} = t''_{\text{нов}} - \Delta t, \quad (2.12)$$

$$t''_{\text{центр}} = 1079,6 - 200 = 879,6^\circ\text{C}.$$

Середня температура по перетину капсули до моменту закінчення регулярного режиму:

$$t''_{\text{сеп}} = t''_{\text{нов}} - 0,6 \cdot \Delta t, \quad (2.13)$$

$$t''_{\text{сеп}} = 1079,6 - 0,6 \cdot 200 = 959,6^\circ\text{C},$$

$$\tau_I = \frac{\left[0,25 \cdot \frac{0,25^2}{0,9 \cdot 10^{-6}} + \frac{21 \cdot 0,25}{2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-6} \cdot 33600} \cdot (1079,572 - 264) \right]}{3600} = 24,5 \text{ годин.}$$

Через 24,5 годин в печі буде досягнута температура 1200 °С, спрацює терморегулятор і почнеться другий етап нагрівання при $t_{\text{печи}} = \text{const}$.

Визначаємо час нагріву капсули при $t_{\text{печи}} = \text{const}$ до досягнення його поверхнею максимальної допустимої температури:

$$t_{\text{пов.мах}} = t_{\text{вир}} + 20, \quad (2.14)$$

$$t_{\text{пов.мах}} = 1150 + 20 = 1170 \text{ °С.}$$

На початку нагріву $t_{\text{печи}} = 1200 \text{ °С}$, $t_{\text{пов}} = 1079,6 \text{ °С}$. Коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha^{1079,6} = c_{np} \cdot \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{вир}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{печи}} - t_{\text{вир}}}, \quad (2.15)$$

$$\alpha^{1079,6} = 4,4595 \cdot \frac{\left[\left(\frac{1473}{100} \right)^4 - \left(\frac{1352,6}{100} \right)^4 \right]}{1200 - 1079,6} = 503,922.$$

В кінці нагріву $t_{\text{печи}} = 1200 \text{ °С}$, $t_{\text{вир}} = 1170 \text{ °С}$. Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha^{1170} = c_{np} \cdot \frac{\left[\left(\frac{T_{\text{печи}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{вир}}}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{печи}} - t_{\text{вир}}}, \quad (2.16)$$

$$\alpha^{1170} = 4,4595 \cdot \frac{\left[\left(\frac{1473}{100} \right)^4 - \left(\frac{1443}{100} \right)^4 \right]}{1200 - 1170} = 552,923 \text{ Bm} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) .$$

Середнє значення коефіцієнта тепловіддачі:

$$\alpha_{\text{сер}} = \frac{\alpha^{1079,6} + \alpha^{1170}}{2} , \quad (2.17)$$

$$\alpha_{\text{сер}} = \frac{503,922 + 552,923}{2} = 528,42 \text{ Bm} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}) .$$

Температурний критерій:

$$\Theta_{\text{нов}} = \frac{t_{\text{нечі}} - t_{\text{нов}}'''}{t_{\text{нечі}} - t_{\text{сер}}''} , \quad (2.18)$$

$$\Theta_{\text{нов}} = \frac{1200 - 1170}{1200 - 959,6} = 0,125 .$$

Критерій Біо:

$$Bi = \frac{\alpha_{\text{сер}}}{\lambda} \cdot R , \quad (2.19)$$

$$Bi = \frac{528,42}{21} \cdot 0,25 = 6,291 .$$

Критерій Фур'є визначається за методикою [17]

Fo=0,22.

Звідки:

$$\tau_{II} = \frac{Fo \cdot R^2}{a \cdot 3600}, \quad (2.20)$$

де Fo – число Фур'є,

$$\tau_{II} = \frac{0,22 \cdot 0,25^2}{0,9 \cdot 10^{-6} \cdot 3600} = 4,24 \text{ годин.}$$

Температурний критерій центру визначається за методикою [17]

$$\Theta_{\text{центр}} = 0,6.$$

Звідки

$$t'''_{\text{центр}} = t_{\text{нечі}} - (t_{\text{нечі}} - t''_{\text{сер}}) \cdot \Theta_{\text{центр}}, \quad (2.21)$$

$$t'''_{\text{центр}} = 1200 - (1200 - 959,6) \cdot 0,6 = 1055,76^\circ\text{C}.$$

Перепад температур в кінці періоду витримки, $^\circ\text{C}$:

$$\Delta_{\text{кін}} = t'''_{\text{нов}} - t'''_{\text{центр}}, \quad (2.22)$$

$$\Delta_{\text{кін}} = 1170 - 1055,76 = 114,24.$$

Повний час нагріву виробу, годин:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II}, \quad (2.23)$$

$$\tau = 24,5 + 4,24 = 28,74 .$$

З метою визначення теплових втрат печі конструюємо її футеровку. Внутрішній діаметр печі вибираємо, враховуючи тяжкість завантаження і необхідність у спеціальній для неї підвісці, рівним 1000 мм, діаметр люка печі становить 650 мм, корисна висота - 2130 мм. Стіни викладаємо з шару легковажної цегли з $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ і товщиною 200 мм та шару діатомитової цегли з $\rho = 650 \text{ кг/м}^3$, товщиною 250 мм. Склепіння печі викладаємо з легковага товщиною 200 мм і товщиною діатоміту 200 мм. Кришка печі набирається з шамотових плит товщиною 200 мм і з шару шлакової вати з $\rho = 300 \text{ кг/м}^3$ товщиною 300 мм.

Для температури всередині печі в 1200°C приймаємо, що температура на межі легковага - діатоміт в стінках печі складає 650°C і в склепінні 500°C , а температура кожуха печі 50°C .

Для стін печі коефіцієнти теплопровідності при середніх температурах в шарі:

$$\lambda_{\text{легк}} = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{t_{\text{печи}} + t_{\text{легк-діам}}}{2} \cdot 10^{-3}, \quad (2.24)$$

$$\lambda_{\text{легк}} = 0,29 + 0,26 \cdot \frac{1200 + 650}{2} \cdot 10^{-3} = 0,5305 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\lambda_{\text{діам}} = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{t_{\text{легк-діам}} + t_{\text{кож}}}{2} \cdot 10^{-3}, \quad (2.25)$$

$$\lambda_{\text{діам}} = 0,145 + 0,314 \cdot \frac{650 + 50}{2} \cdot 10^{-3} = 0,2549 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)} .$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі на поверхні стін за номограмою [17]

$$\alpha_{\text{зов}} = 11,6 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} .$$

Тепловий потік при теплопередачі через циліндричну стінку визначається за формулою:

$$q_{втрати \rightarrow ст} = \frac{\pi \cdot L_{сер} \cdot (t_{вн} - t_{нс})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{(d_3 + 2 \cdot \delta)}{d_3} + \frac{1}{\alpha_{зов} \cdot (d_3 + 2 \cdot \delta)}}, \quad (2.26)$$

де $L_{сер}$ – середня висота печі, м;

$t_{вн}$ – температура печі, °С;

$t_{нс}$ – температура навколишнього середовища, °С;

d_3 – зовнішній діаметр ділянки, м;

δ – товщина матеріалу, м,

$$q_{втрати \rightarrow ст} = \frac{3,14 \cdot 2,51 \cdot (1200 - 10)}{\frac{1}{2 \cdot 0,5305} \cdot \ln \frac{(1 + 2 \cdot 0,2)}{1} + \frac{1}{2 \cdot 0,2549} \ln \frac{(1,4 + 2 \cdot 0,25)}{1,4} + \frac{1}{11,6 \cdot (1,4 + 2 \cdot 0,25)}} =$$

$$= 9754,188 \text{ Вт},$$

Перевіряємо температури:

$$t_{шам.діам.} = t_{печі} - q_{втрати \rightarrow ст} \cdot \frac{1}{\pi \cdot L_{сер}} \cdot \frac{1}{\lambda_{легк} \cdot 2} \cdot \ln \frac{(d_3 + 2 \cdot \delta)}{d_3}, \quad (2.27)$$

$$t_{шам.діам.} = 1200 - 9754,188 \cdot \frac{1}{3,14 \cdot 2,51} \cdot \frac{1}{0,5305 \cdot 2} \cdot \ln \frac{(1 + 2 \cdot 0,2)}{1} = 807,5,$$

$$t_{кож} = t_{н.с.} + \frac{q_{втрати \rightarrow ст}}{\pi \cdot L_{сер}} \cdot \frac{1}{\alpha_{зов} \cdot (d_3 + 2 \cdot \delta)}, \quad (2.28)$$

$$t_{кож} = 10 + \frac{9754,188}{3,14 \cdot 2,51} \cdot \frac{1}{11,6 \cdot (1,4 + 2 \cdot 0,25)} = 66,15^\circ \text{C},$$

$$t_{\text{кож}} = t_{\text{шам.діам}} - \frac{q_{\text{втрата} \rightarrow \text{ст}}}{\pi \cdot L_{\text{сер}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \lambda} \cdot \ln \frac{(d_3 + 2 \cdot \delta)}{d_3}, \quad (2.29)$$

$$t_{\text{вів}} = 807,5 - \frac{9754,188}{3,14 \cdot 2,51} \cdot \frac{1}{2 \cdot 0,2549} \cdot \ln \frac{1,9}{1,4} = 66,13^\circ \text{C}.$$

Збіг задовільний, розрахунок зупиняємо.

Для склепіння печі коефіцієнт теплопровідності при середніх температурах в шарах:

$$\lambda_{\text{легк}} = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{t_{\text{печі}} + t_{\text{легк-діам}}}{2} \cdot 10^{-3}, \quad (2.30)$$

$$\lambda_{\text{легк}} = 0,29 + 0,26 \cdot \frac{1200 + 500}{2} \cdot 10^{-3} = 0,511 \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}),$$

$$\lambda_{\text{діам}} = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{t_{\text{легк-діам}} + t_{\text{кож}}}{2} \cdot 10^{-3}, \quad (2.31)$$

$$\lambda_{\text{діам}} = 0,145 + 0,314 \cdot \frac{500 + 50}{2} \cdot 10^{-3} = 0,23135 \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}).$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі на поверхні склепіння за номограми [17]

$$\alpha_{\text{зов}} = 11,6 \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Визначаємо площі поверхонь :

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}, \quad (2.32)$$

$$F_1 = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} = 0,785 \text{ м}^2,$$

$$F_2 = \frac{3,14 \cdot 1,4^2}{4} = 1,5386 \text{ м}^2,$$

$$F_3 = \frac{3,14 \cdot 1,9^2}{4} = 2,834 \text{ м}^2,$$

$$F_I = \sqrt{(F_1 \cdot F_2)}, \quad (2.33)$$

$$F_I = \sqrt{(0,785 \cdot 1,5386)} = 1,099 \text{ м}^2,$$

$$F_{II} = \sqrt{(F_2 \cdot F_3)}, \quad (2.34)$$

$$F_{II} = \sqrt{(1,5386 \cdot 2,834)} = 2,088 \text{ м}^2.$$

Тепловий потік при теплопередачі через плоске склепіння:

$$q_{\text{втрата} \rightarrow \text{зовніш}} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нс}}}{\frac{\delta_{\text{легк}}}{\lambda_{\text{легк}} \cdot F_I} + \frac{\delta_{\text{діам}}}{\lambda_{\text{діам}} \cdot F_{II}} + \frac{1}{\alpha_{\text{зов}} \cdot F_3}}, \quad (2.35)$$

$$q_{\text{втрата} \rightarrow \text{зовніш}} = \frac{1200 - 10}{\frac{0,2}{0,511 \cdot 1,099} + \frac{0,2}{0,23135 \cdot 2,088} + \frac{1}{11,6 \cdot 2,83}} = 1486,38 \text{ Вт.}$$

Перевіряємо температури:

$$t_{шам.диам} = t_{печи} - q_{втрата \rightarrow звид} \cdot \frac{\delta_{легк}}{\lambda_{легк} \cdot F_I}, \quad (2.36)$$

$$t_{шам.диам} = 1200 - 1486,38 \cdot \frac{0,2}{0,511 \cdot 1,099} = 670,652^\circ C,$$

$$t_{кож} = t_{шам.диам} - q_{втрата \rightarrow звид} \cdot \frac{\delta_{диам}}{\lambda_{диам} \cdot F_{II}}, \quad (2.37)$$

$$t_{кож} = 670,652 - 1486,38 \cdot \frac{0,2}{0,23135 \cdot 2,0881} = 55,28^\circ C,$$

$$t_{кож} = t_{нс} + q_{втрата \rightarrow звид} \cdot \frac{1}{\alpha_{зов} \cdot F_3}, \quad (2.38)$$

$$t_{кож} = 10 + 1486,38 \cdot \frac{1}{11,6 \cdot 2,83} = 55,28^\circ C.$$

Збіг прийнятний, розрахунок зупиняємо.

Задаємося температурою в кришці на границі шамоту зі шлаковою ватою в $800^\circ C$ і температурою на кожусі $30^\circ C$, тоді коефіцієнт теплопровідності при середніх температурах в шарах:

$$\lambda_{шам} = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{t_{печи} + t_{шам-шл.вата}}{2} \cdot 10^{-3}, \quad (2.39)$$

$$\lambda_{шам} = 0,84 + 0,58 \cdot \frac{1200 + 800}{2} \cdot 10^{-3} = 1,42 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}),$$

$$\lambda_{шл.вата} = \lambda_1 + \lambda_2 \cdot \frac{t_{шам-шл.вата} + t_{кож}}{2} \cdot 10^{-3}, \quad (2.40)$$

$$\lambda_{\text{шл.вата}} = 0,06 + 0,157 \cdot \frac{800 + 30}{2} \cdot 10^{-3} = 0,1252 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}).$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі на поверхні кришки з номограми [17]

$$\alpha_{\text{зоб}} = 10,6 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Визначаємо площі поверхонь:

$$F_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4}, \quad (2.41)$$

$$F_1 = \frac{3,14 \cdot 0,65^2}{4} = 0,332 \text{ м}^2,$$

$$F_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} + \pi \cdot D_2 \cdot \delta_2, \quad (2.42)$$

$$F_2 = \frac{3,14 \cdot 1,2^2}{4} + 3,14 \cdot 1,2 \cdot 0,2 = 1,884 \text{ м}^2,$$

$$F_I = \sqrt{(F_1 \cdot F_2)}, \quad (2.43)$$

$$F_I = \sqrt{(0,332 \cdot 1,884)} = 0,791 \text{ м}^2,$$

$$F_3 = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} + \pi \cdot D_3 \cdot \delta_3, \quad (2.44)$$

$$F_3 = \frac{3,14 \cdot 1,8^2}{4} + 3,14 \cdot 1,8 \cdot 0,5 = 5,37 \text{ м}^2,$$

$$F_{II} = \sqrt{(F_3 \cdot F_2)}, \quad (2.45)$$

$$F_{II} = \sqrt{(5,37 \cdot 1,884)} = 3,18 \text{ м}^2.$$

Тепловий потік при теплопередачі через кришку, Вт:

$$q_{\text{втрати} \rightarrow \text{кришки}} = \frac{t_{\text{вн}} - t_{\text{нс}}}{\frac{\delta_{\text{шам}}}{\lambda_{\text{шам}} \cdot F_I} + \frac{\delta_{\text{шл.вата}}}{\lambda_{\text{шл.вата}} \cdot F_{II}} + \frac{1}{\alpha_{\text{зов}} \cdot F_3}}, \quad (2.46)$$

$$q_{\text{втрати} \rightarrow \text{кришки}} = \frac{1200 - 10}{\frac{0,2}{1,37 \cdot 0,791} + \frac{0,3}{0,1252 \cdot 3,18} + \frac{1}{10,6 \cdot 5,37}} = 1245,24.$$

Перевіряємо температури:

$$t_{\text{шам.шл.вата}} = t_{\text{печі}} - q_{\text{втрати} \rightarrow \text{кришки}} \cdot \frac{\delta_{\text{шам}}}{\lambda_{\text{шам}} \cdot F_I}, \quad (2.47)$$

$$t_{\text{шам.шл.вата}} = 1200 - 1245,24 \cdot \frac{0,2}{1,37 \cdot 0,791} = 970,18^\circ \text{C},$$

$$t_{\text{кож}} = t_{\text{шам.шл.вата}} - q_{\text{втрати} \rightarrow \text{кришки}} \cdot \frac{\delta_{\text{шл.вата}}}{\lambda_{\text{шл.вата}} \cdot F_{II}}, \quad (2.48)$$

$$t_{\text{кож}} = 970,18 - 1245,24 \cdot \frac{0,3}{0,1252 \cdot 3,18} = 31,88^\circ \text{C},$$

$$t_{\text{кож}} = t_{\text{нс}} + q_{\text{втрати} \rightarrow \text{кришки}} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{зов}} \cdot F_3}, \quad (2.49)$$

$$t_{\text{кож}} = 10 + 1245,24 \cdot \frac{1}{10,6 \cdot 5,37} = 31,88^\circ\text{C}.$$

Збіг задовільний.

Таким чином, сумарні теплові втрати печі при температурі всередині 1200 °С дорівнюють, Вт:

$$q_{\text{втр}} = 1,2 \cdot (q_{\text{втр.ст}} + q_{\text{втр.звід}} + q_{\text{втр.кришки}}), \quad (2.50)$$

$$q_{\text{втр}} = 1,2 \cdot (9754,188 + 1486,38 + 1245,24) = 14983,$$

де 1,2 – коефіцієнт запасу, враховує втрати через теплові короткі замикання і можливе старіння теплоізоляції печі в експлуатації.

Для розрахунку часу охолодження печі визначаємо акумульоване її кладкою тепло.

Маса легковага стін печі, кг:

$$G_{\text{легк.ст}} = \rho_{\text{легк}} \cdot \pi \cdot h_{\text{сер.легк.ст}} \cdot \delta_{\text{легк.ст}} \cdot D_{\text{сер.легк.ст}}, \quad (2.51)$$

$$G_{\text{легк.ст}} = 1000 \cdot 3,14 \cdot 2,59 \cdot 0,2 \cdot 1,2 = 1951,8.$$

Акумульоване легковагом стін печі тепло, МДж:

$$Q_{\text{ак.легк.ст}} = c_{\text{легк}} \cdot G_{\text{легк.ст}} \cdot t_{\text{сер.легк.ст}}, \quad (2.52)$$

$$Q_{ак.легк.ст.} = 1,068 \cdot 10^3 \cdot 1951,8 \cdot 1003,75 = 2092,34 \text{ .}$$

Маса легковага склепіння, кг:

$$G_{легк.звід} = \rho_{легк} \cdot F_1 \cdot \delta_{легк.звід}, \quad (2.53)$$

$$G_{легк.звід} = 100 \cdot 1,099 \cdot 0,2 = 219,8 \text{ .}$$

Акумуляване тепло склепіння, МДж:

$$Q_{ак.легк.звід} = c_{легк} \cdot G_{легк.звід} \cdot t_{сер.легк.звід}, \quad (2.54)$$

$$Q_{ак.легк.звід} = 1,054 \cdot 10^3 \cdot 219,8 \cdot 935,326 = 216,69 \text{ .}$$

Маса шамоту кришки, кг:

$$G_{шам.кр} = \rho_{шам} \cdot F_1 \cdot \delta_{шам.кр}, \quad (2.55)$$

$$G_{шам.кр} = 1850 \cdot 0,791 \cdot 0,2 = 292,67 \text{ .}$$

Акумуляване шамотом кришки тепло, МВт:

$$Q_{ак.шам.кр.} = c_{шам} \cdot G_{шам.кр} \cdot t_{сер.шам.кр}, \quad (2.56)$$

$$Q_{ак.шам.кр.} = 1,087 \cdot 10^3 \cdot 292,67 \cdot 1085,09 = 345,2 \text{ .}$$

Маса діатоміта стін, кг:

$$G_{\text{diam.cm}} = \rho_{\text{diam}} \cdot \pi \cdot h_{\text{cep.diam}} \cdot \delta_{\text{diam.cm}} \cdot D_{\text{cep.diam}}, \quad (2.57)$$

$$G_{\text{diam.cm}} = 650 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 1,65 \cdot 2,79 = 2348,9 .$$

Акумуляване діатомітом стін тепло, МДж:

$$Q_{\text{ак.diam.cm.}} = c_{\text{diam}} \cdot G_{\text{diam.cm}} \cdot t_{\text{cep.diam.cm}}, \quad (2.58)$$

$$Q_{\text{ак.diam.cm.}} = 0,879 \cdot 10^3 \cdot 2348,9 \cdot 436,815 = 901,88 .$$

Маса діатоміта склепіння, кг:

$$G_{\text{diam.звїд}} = \rho_{\text{diam}} \cdot \delta_{\text{diam.звїд}} \cdot F_{II}, \quad (2.59)$$

$$G_{\text{diam.звїд}} = 650 \cdot 0,2 \cdot 2,088 = 271,44 .$$

Акумуляване діатомітом склепіння тепло, МДж:

$$Q_{\text{ак.diam.звїд}} = c_{\text{diam}} \cdot G_{\text{diam.звїд}} \cdot t_{\text{cep.diam.звїд}}, \quad (2.60)$$

$$Q_{\text{ак.diam.звїд}} = 0,879 \cdot 10^3 \cdot 271,44 \cdot 362,965 = 86,6 .$$

Маса шлакової вати кришки, кг:

$$G_{\text{шл.ватакр}} = \rho_{\text{шл.ватакр}} \cdot \delta_{\text{шл.ватакр}} \cdot F_{II}, \quad (2.61)$$

$$G_{\text{шл.ватакр}} = 300 \cdot 0,3 \cdot 3,18 = 286,2 .$$

Акумуляване шлаковою ватою кришки тепло, МДж:

$$Q_{ак.шл.ватакр.} = c_{шл.вата} \cdot G_{шл.ватакр.} \cdot t_{сер.шл.ватакр.}, \quad (2.62)$$

$$Q_{ак.шл.ватакр.} = 1,047 \cdot 10^3 \cdot 286,2 \cdot 501,03 = 150,13 .$$

Сумарне акумульване кладкою тепло при температурі печі 1200 °С складає, МДж:

$$Q_{ак.кладкою} = Q_{ак.легкст.} + Q_{ак.легкзвід} + Q_{ак.шам.кр.} + Q_{ак.діат.ст.} + Q_{ак.діат.звід} + Q_{ак.шл.ватакр.}, \quad (2.63)$$

$$Q_{ак.кладкою} = 2092,34 + 216,69 + 901,88 + 345,2 + 86,6 + 150,13 = 3792,84 .$$

Кількість тепла, акумульованного виробом, МДж:

$$Q_{ак.вир} = c_{капсули} \cdot G_{капсули} \cdot t_{сер.капсули}, \quad (2.64)$$

$$Q_{ак.вир} = 0,32 \cdot 10^3 \cdot 1500 \cdot 1150 = 552 .$$

Кількість тепла, акумульованого жаротривкою підвіскою, МДж:

$$Q_{ак.підвіскою} = c_{підвіски} \cdot G_{підвіски} \cdot t_{сер.підв.}, \quad (2.65)$$

$$Q_{ак.підвіскою} = 0,5 \cdot 10^3 \cdot 150 \cdot 1150 = 86,25 ,$$

де $G_{підв.} = 150$ кг – приблизна маса підвіски (10 % від маси виробу);

$c = 0,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ - питома теплоємність жаротривкої хромонікелевої сталі.

Повна кількість тепла, акумульованого завантаженою піччю МДж:

$$Q_{ак}^{1200} = (Q_{ак.кладкою} + Q_{ак.вир.} + Q_{ак.підв.}), \quad (2.66)$$

$$Q_{ак}^{1200} = (3792,84 + 552 + 86,25) = 4431,09 .$$

Так як розрахунки наближені, то акумульоване кладкою та виробом тепло, а також теплові втрати печі можна прийняти пропорційними її температурі.

Після нагрівання капсула в печі остигає до 950 °С:

$$Q_{ак}^{950} = \frac{Q_{ак}^{1200} \cdot t_{остигання}}{t_{печи}}, \quad (2.67)$$

$$Q_{ак}^{950} = \frac{4431,09 \cdot 950}{1200} = 3507,95 \text{ МДж},$$

$$q_{втр}^{950} = \frac{q_{втр} \cdot t_{остигання}}{t_{печи}}, \quad (2.68)$$

$$q_{втр}^{950} = \frac{14983 \cdot 950}{1200} = 11861,54 \text{ Вт}.$$

Кількість тепла, що піч повинна втратити за час остигання, МДж:

$$Q_{ак.(1200-950)} = Q_{ак}^{1200} - Q_{ак}^{950}, \quad (2.69)$$

$$Q_{ак.(1200-950)} = 4431,09 - 3507,95 = 923,14 .$$

Середні теплові втрати за час остигання, Вт:

$$q_{втр.ост.сер.} = \frac{q_{втр} + q_{втр}^{950}}{2}, \quad (2.70)$$

$$q_{втр.ост.сер.} = \frac{14983 + 11861,54}{2} = 13422,27 .$$

Час остигання печі, год:

$$\tau_{ост} = \frac{Q_{ак}^{1200-950}}{q_{ном.ост.сер.} \cdot 3600}, \quad (2.71)$$

$$\tau_{ост} = \frac{923,14 \cdot 10^6}{13422,27 \cdot 3600} = 19,1 .$$

Швидкість охолодження, °C/год:

$$\frac{t_{печи} - t_{остиг}}{\tau_{ост}}, \quad (2.72)$$

$$\frac{1200 - 950}{19,1} = 13,1 ,$$

$$\tau_{циклу} = \tau_{нагр} + \tau_{ост} + \tau_{завант}, \quad (2.73)$$

де $\tau_{завант}$ – час завантаження капсули в піч, приймемо $\tau_{завант} = 1$ год.

$$\tau_{\text{циклу}} = 28,74 + 19,1 + 1 = 48,84 .$$

Теплові втрати за час нагрівання, МДж:

$$Q_{\text{втр.нагр}} = q_{\text{втр.ост.сер.}} \cdot \tau_{\text{нагр}} \cdot 3600 , \quad (2.75)$$

$$Q_{\text{втр.нагр}} = 13422,27 \cdot 28,74 \cdot 3600 \cdot 10^{-6} = 1388,72 .$$

Теплові втрати за час остигання, МДж:

$$Q_{\text{втр.ост}} = Q_{\text{ак.кл}} \cdot \frac{t_{\text{печи}} - t_{\text{остиг}}}{t_{\text{печи}}} , \quad (2.76)$$

$$Q_{\text{втр.ост}} = 3792,84 \cdot \frac{1200 - 950}{1200} = 790,175 .$$

Теплові втрати за час простою, МДж:

$$Q_{\text{втр.прост}} = q_{\text{втр}}^{950} \cdot \tau_{\text{загр}} \cdot 3600 + \left[5,76 \cdot 0,8 \cdot 0,62 \cdot \left(\left(\frac{t_{\text{ост}} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{нс}} + 273}{100} \right)^4 \right) \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \delta_{\text{шам}} \cdot 3600 \right] , \quad (2.77)$$

де 0,62 – коефіцієнт діафрагмування

$$Q_{\text{втр.прост}} = 11861,54 \cdot 1 \cdot 3600 + 5,76 \cdot 0,8 \cdot 0,62 \cdot \left(\left(\frac{950 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{10 + 273}{100} \right)^4 \right) \cdot \frac{3,14 \cdot 0,65^2}{4} \cdot 0,2 \times \\ \times 3600 \cdot 10^{-6} = 57,92 .$$

Повна витрата тепла за цикл, МДж:

$$Q_{\text{цикл}} = Q_{\text{ак.вир}} + Q_{\text{ак.лідв}} + Q_{\text{втр.нагр}} + Q_{\text{втр.ост.}} + Q_{\text{втр.прост.}}, \quad (2.78)$$

$$Q_{\text{цикл}} = 552 + 86,25 + 1388,72 + 790,175 + 57,92 = 2875,065 .$$

Питома витрата енергії, МДж/кг:

$$A = \frac{Q_{\text{циклу}}}{G_{\text{капсули}}}, \quad (2.79)$$

$$A = \frac{2875,065}{1000} = 2,875 .$$

Коефіцієнт корисної дії печі, %:

$$\eta_{\text{печі}} = \frac{Q_{\text{ак.вир}}}{Q_{\text{циклу}}}, \quad (2.80)$$

$$\eta_{\text{печі}} = \frac{552}{2875,065} \cdot 100 = 19,2 .$$

Як бачимо, ККД печі дуже низький, що обумовлюється великими втратами акумульованого кладкою тепла при остиганні виробів в печі.

Якщо нагрівання капсул буде проводитися циклами, без охолодження печі та втрат тепла на акумуляцію кладкою, ККД підвищиться [17].

2.2 Розрахунок нагрівача обраної печі

Нагрівання капсул здійснюється до 1150 °С, температура печі 1200 °С, потужність печі прийнята 75 кВт, напруга живлення - 220 В. Висота печі - 2,130 м, ділимо її на три рівні зони за висотою, потужністю по 25 кВт кожна. Нагрівачі розташовуються на стінах.

При робочій температурі 1200 °С можуть бути використані такі матеріали для нагрівальних елементів (режим переривчастий): ОХ27Ю5А, карборундові нагрівачі, нагрівачі з дисилицида молібдену.

Доцільно буде застосувати ОХ27Ю5А, незважаючи на те, що їх робота протікає за максимально припустимих для вказаних сплавів температурах і їх строк служби буде обмеженим, тому що більш жаростійкі карборундові чи дисилицидові нагрівачі також мають короткий строк служби, окрім того, вони менш зручні у експлуатації, вимагають регулювання напруги, яка підводиться, а молібден, вольфрам дорогі і дефіцитні та потребують захисної атмосфери.

Приймаємо робочу температуру 1200 °С (перевищує рекомендовану, однак не перевищує граничну 1250 °С), для зазначеної температури за графіком [17] визначаємо: $W_{ид} = 2 \text{ Вт/см}^2$.

Перевіримо нагрівачі: стрічковий зигзаг і дровову спіраль.

Для стрічки при нагріванні сталі по таблиці [17]: сталь у захисній атмосфері (аргон) :

$$\varepsilon = 0,45,$$

$$d/b = 0,8,$$

$$W/W_{ид} = 0,51,$$

$$W = 1,02 \text{ Вт/см}^2,$$

де W – питома поверхнева потужність нагрівача, Вт/см^2 ,

$W_{ид}$ – ідеальна поверхнева потужність нагрівача.

Для дроту на полиці:

$$W/W_{\text{id}} = 0,44,$$

$$W = 0,88 \text{ Вт/см}^2.$$

Приймаємо, що нагрівачі з'єднані за схемою "зірка", так як потужність зони невелика, фазова напруга 127 В, потужність кожної фази $25/3 = 8,33$ кВт.

Розраховуємо стрічку:

$$m = \frac{b}{a} = 10, \quad (2.81)$$

де a, b - сторони прямокутного стрічкового нагрівача, мм;

Питомий опір матеріалу нагрівача, віднесений до його робочої температури, $\text{Ом} \cdot \text{м}$:

$$\rho = 1,4 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-11} \cdot t, \quad (2.82)$$

де t – робоча температура нагрівальних елементів,

$$\rho = 1,4 \cdot 10^{-6} + 5,0 \cdot 10^{-11} \cdot 1200 = 1,46 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

$$a = \sqrt[3]{\left(\frac{\rho \cdot P^2 \cdot 10^{11}}{2 \cdot m \cdot (m+1) \cdot U^2 \cdot W} \right)}, \quad (2.83)$$

$$a = \sqrt[3]{\left(\frac{1,46 \cdot 10^{-6} \cdot 8,33^2 \cdot 10^{11}}{2 \cdot 10 \cdot (10+1) \cdot 127^2 \cdot 1,02} \right)} = 1,409 \text{ мм},$$

$$b = 1,409 \cdot 10 = 14,09 \text{ мм}.$$

Вибираємо найближчий стандартний перетин, стрічку $1,5 \times 15$ мм, тобто $a = 1,5$ мм і $b = 15$ мм.

Опір фази, Ом:

$$R = \frac{U^2}{10^3 \cdot P}, \quad (2.84)$$

де U – напруга живильної мережі, В,
 P – потужність зони, кВт.

$$R = \frac{127^2}{10^3 \cdot 8,33} = 1,936.$$

Перетин стрічки, мм²:

$$q = a \cdot b, \quad (2.85)$$

$$q = 15 \cdot 1,5 = 22,5.$$

Звідси довжина стрічки на фазу, м:

$$L = \frac{R \cdot q}{\rho \cdot 10^{-6}}, \quad (2.86)$$

де R – опір нагрівача, Ом,

$$L = \frac{1,936 \cdot 22,5 \cdot 10^{-6}}{1,46 \cdot 10^{-6}} = 29,83.$$

Дійсна питома поверхнева потужність, Вт/см²:

$$W = \frac{10^2 \cdot P}{\Pi \cdot L}, \quad (2.87)$$

$$П = 2 \cdot (b + a), \quad (2.88)$$

$$П = 2 \cdot (15 + 1,5) = 33 \text{ мм},$$

$$W = \frac{10^2 \cdot 8,33}{33 \cdot 29,83} = 0,846.$$

Маса нагрівача однієї фази, кг:

$$G = \rho_m \cdot L \cdot q, \quad (2.89)$$

$$G = 7190 \cdot 29,83 \cdot 22,5 \cdot 10^{-6} = 4,826 .$$

Маса нагрівачів всієї печі (запас 10 %), кг:

$$G' = 1,1 \cdot 9 \cdot G, \quad (2.90)$$

$$G' = 1,1 \cdot 9 \cdot 4,826 = 47,8 .$$

Розміщуємо нагрівач в дев'ять рядів за висотою, по одному ряду на фазу, висота кожного ряду $H = 2130/9 = 236$ мм, висоту зигзага приймаємо $H' = 160$ мм, довжина кожної хвилі 320 мм, число хвиль на фазу $29830/320 = 93$.

Довжина кожного нагрівача, мм:

$$l = \pi \cdot D_{вн} - l_{вувід}, \quad (2.91)$$

$$l = 3,14 \cdot 1000 - 100 = 3040 ,$$

де $l_{\text{вивід}}$ – відстань між выводами, прийmemo $l_{\text{вивід}} = 100$ мм.

Звідси крок, мм:

$$h = l/93, \quad (2.92)$$

$$h = 3040/93 = 32,7 .$$

Що більш ніж в 2 рази перевищує ширину стрічки.

Перевіряємо температуру нагрівача в роботі.

Поверхня нагрівача:

$$F_1 = 9 \cdot L \cdot 2 \cdot (a + b), \quad (2.93)$$

$$F_1 = 9 \cdot 29,83 \cdot 2 \cdot (0,0015 + 0,015) = 8,86 \text{ м}^2,$$

$$d = h/2 - a, \quad (2.94)$$

$$d = 0,0327/2 - 0,0015 = 0,01485 \text{ м},$$

$$\phi_{12н} = \frac{a + b + d - \sqrt{(b^2 + d^2)}}{2 \cdot (a + b)}, \quad (2.95)$$

де ϕ_i - коефіцієнт взаємного опромінення.

Тоді:

$$\phi_{12н} = \frac{0,0015 + 0,015 + 0,01485 - \sqrt{(0,015^2 + 0,01485^2)}}{2 \cdot (0,0015 + 0,015)} = 0,31,$$

$$\phi_{12_{н.н}} = \frac{b + H' + (H - H') - \sqrt{(b^2 + (H - H')^2)}}{b + H'}, \quad (2.96)$$

$$\phi_{12_{н.н}} = \frac{0,015 + 0,16 + (0,236 - 0,16) - \sqrt{(0,015^2 + (0,236 - 0,16)^2)}}{0,015 + 0,16} = 0,99,$$

$$F_{12} = F_{13} = F_1 \cdot \phi_{12_{н}} \cdot \phi_{12_{н.н}}, \quad (2.97)$$

де F_{12} , F_{13} – взаємна поверхня опромінення зигзага стрічкового нагрівача на сусідні зигзаги стрічкового нагрівача,

$$F_{12} = F_{13} = 8,86 \cdot 0,31 \cdot 0,99 = 2,72 \text{ м}^2.$$

Внутрішня поверхня печі:

$$F_3 = \pi \cdot D \cdot H_{\text{печі}}, \quad (2.98)$$

де D – внутрішній діаметр печі, м;

$H_{\text{печі}}$ – внутрішня висота печі,

$$F_3 = 3,14 \cdot 1 \cdot 2,13 = 6,688 \text{ м}^2,$$

$$F_{32} = F_3 - F_{12}, \quad (2.99)$$

де F_{32} – взаємна поверхня опромінення футеровки на виріб,

$$F_{32} = 6,688 - 2,72 = 3,968 \text{ м}^2.$$

Теплові втрати стін печі рівні: $1,2 \cdot 9754,188 = 11705,026$ Вт, отже, розрахунковий коефіцієнт теплових втрат:

$$\gamma = \frac{1,2 \cdot q_{\text{втр.стін}} \cdot 2}{75 \cdot 10^3}, \quad (2.100)$$

де γ - коефіцієнт теплових втрат печі,

$$\gamma = \frac{1,2 \cdot 9754,188 \cdot 2}{75 \cdot 10^3} = 0,31.$$

Звідси активна поверхня нагрівача, м^2 :

$$F_{\text{аєò}} = \frac{(1-\gamma) \cdot (F_{12}^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot F_{32})}{(1-\gamma) \cdot F_{12} + F_{32}}, \quad (2.101)$$

$$F_{\text{аєò}} = \frac{(1-0,31) \cdot (2,72^2 + 2 \cdot 2,72 \cdot 3,968)}{(1-0,31) \cdot 2,72 + 3,968} = 3,42.$$

Тут $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0,8$, значить і $c_{12} = c_{13} = c_{32}$.

Поверхня виробу, м^2 :

$$F_2 = \pi \cdot D_{\text{капсули}} \cdot L_{\text{капсули}}, \quad (2.102)$$

$$F_2 = 3,14 \cdot 0,5 \cdot 1,72 = 2,7.$$

Звідси рівняння теплопередачі системи нагрівач – виріб:

$$(1-\gamma) \cdot 75 \cdot 10^3 = \frac{5,76}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{вир}}} + \frac{F_2}{F_{\text{акт}}} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_{\text{неі}}} - 1\right)} \cdot \left[\left(\frac{T_{\text{нагр}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{плав.нагр}}}{100}\right)^4 \right], \quad (2.103)$$

$$(1-0,31) \cdot 75 \cdot 10^3 = \frac{5,76}{\frac{1}{0,8} + \frac{2,7}{3,42} \cdot \left(\frac{1}{0,8} - 1\right)} \cdot \left[\left(\frac{\dot{Q}_{\text{іаа\ddot{o}}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{1200+273}{100}\right)^4 \right].$$

Тоді $T_{\text{нагр}}=1566 \text{ K} = 1293 \text{ }^\circ\text{C}$.

Розраховуємо дрiт:

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \rho \cdot P^2 \cdot 10^{11}}{\pi^2 \cdot U^2 \cdot W}}, \quad (2.104)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,46 \cdot 10^{-6} \cdot 8,33^2 \cdot 10^{11}}{3,14^2 \cdot 127^2 \cdot 0,88}} = 6,6 \text{ мм.}$$

Вибираємо дрiт діаметром 7 мм, його перетин, мм²:

$$q = \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.105)$$

$$q = \frac{3,14 \cdot 7^2}{4} = 38,5.$$

Довжина дроту нагрівача фази, м:

$$L = \frac{R \cdot q}{\rho \cdot 10^{-6}}, \quad (2.106)$$

$$L = \frac{1,936 \cdot 38,5 \cdot 10^{-6}}{1,46 \cdot 10^{-6}} = 51,05 .$$

Дійсна питома поверхнева потужність, Вт/см² :

$$W = \frac{10^2 \cdot P}{\Pi \cdot L} , \quad (2.107)$$

$$\Pi = 2 \cdot (b + a) , \quad (2.108)$$

$$\Pi = 2 \cdot (15 + 1,5) = 33 \text{ мм},$$

$$W = \frac{10^2 \cdot 8,33}{33 \cdot 51,05} = 0,49 .$$

Маса нагрівача, кг:

$$G = \rho_m \cdot L \cdot q , \quad (2.109)$$

$$G = 7190 \cdot 51,05 \cdot 38,5 \cdot 10^{-6} = 14,13 .$$

Маса нагрівачів всієї печі, кг:

$$G' = 1,1 \cdot 3 \cdot G , \quad (2.110)$$

$$G' = 1,1 \cdot 3 \cdot 14,13 = 46,6 .$$

Розміщуємо нагрівач на стандартних керамічних поличках, по чотири ряди полиць за висотою на зону, всього 12 рядів спіралей на піч. Полички встановлюємо за висотою з кроком 150 мм.

Приймаємо діаметр спіралі 40 мм, довжина одного витка - 126 мм, число витків $51050/126 = 405$, або по 101 витку на спіраль, звідси крок спіралі, мм:

$$h = \frac{l}{101}, \quad (2.111)$$

$$h = \frac{3040}{101} = 30,1 .$$

Так як крок спіралі перевищує в 2,9 рази прийнятий по таблиці [17], то перевірку температури нагрівача не робимо, вона нижче 1293 °С .

Необхідну температуру нагрівача і температуру печі слід забезпечити за допомогою системи регулювання теплової потужності печі [17].

2.3 Обґрунтування складу шихти

На заводі "Дніпроспецсталь" дрібнодисперсні відходи представлені некондиційним порошком і циклонним пилом, а з ковальсько - пресового цеху одержують дрібнофракційні відходи тієї ж марки у вигляді стружки силового шліфування. Саме вищевказані матеріали і використовуються в запропонованій технології.

Обсяги відходів за одну плавку (4 т) знаходяться в межах:

1. некондиційний порошок (100...200) кг, (2,53... 5,06) %;
2. циклонний пил (100...160) кг (2,4...4,06) %;
3. стружка (50...300) кг.

За рік вищеперераховані обсяги досягають:

1. некондиційний порошок (70000...140000) кг/год;
2. циклонний пил (70000...112000) кг/год;
3. стружка (35000...210000) кг.

У роботі заплановано дослідити вплив усіх трьох складових в різному процентному співвідношенні на теплофізичні параметри засипки капсули та на процес спікання. Однак, як видно за об'ємами дрібнодисперсних відходів, відсоток стружки силового шліфування буде лежати у межах (20...8) %, суміш порошку, який складається з пилу та занадто великих часток, в межах (17...80) %.

2.4 Визначення теплофізичних властивостей для обраного складу шихти

З метою покращення режимів нагрівів в існуючих агрегатах потрібно знати теплові властивості матеріалів, які підлягають обробці, а саме: теплоємність, теплопровідність та температуропровідність. Відсутність цих даних не дає змоги скласти тепловий баланс, заздалегідь забезпечити потрібний температурний рівень процесу та розробити оптимальний режим термічної обробки у печі.

У довідкових виданнях теплофізичні властивості наведені тільки для деяких матеріалів, чи простих за складом, чи найбільш вживаних у техніці. У зв'язку зі швидким прогресом промисловості у багатьох випадках потрібно обробляти (сушити і обпалювати, нагрівати і плавити, піддавати термообробці) зовсім нові матеріали, теплофізичні характеристики яких або відомі мало або зовсім невідомі. Особливо не вивчені характеристики сипучих (дрібнодисперсних) матеріалів.

Вищенаведені характеристики не має можливості визначити і теоретичним розрахунком, тому що не вивчено, чи мають теплофізичні властивості аддитивності. До того ж значна кількість вихідних матеріалів має складний хімічний та мінералогічний склад, що ще більше ускладнює завдання [18].

Температуропровідність планується визначати двома способами.

Спосіб перший: визначаємо експериментальним шляхом коефіцієнт температуропровідності сипучого матеріалу, використовуючи при цьому метод регулярного режиму.

Процеси нестационарної теплопровідності описуються диференціальним рівнянням теплопровідності, що за умови відсутності внутрішніх джерел тепла виглядає наступним чином:

$$\frac{\partial v}{\partial \tau} = a \cdot \nabla^2 v, \quad (2.112)$$

де v – надлишкова температура тіла, °С,

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

∇ – оператор Лапласа,

$$v = t_3 - t_{nc}, \quad (2.113)$$

де t_3 – температура засипки, °С;

t_{nc} – температура навколишнього середовища, °С.

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}. \quad (2.114)$$

Як початковими умовами для вирішення даного рівняння приймається розподіл температури в початковий момент часу:

$$\tau = 0; v = f(x, y, z),$$

в якості граничних умов - закон теплообміну на межі поверхні тіла із навколишнім середовищем (граничні умови III роду):

$$\lambda \left(\frac{\partial v}{\partial n} \right)_c = -\alpha \cdot v_c, \quad (2.115)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності тіла, Вт/(м·К);
 α – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні тіла, Вт/(м²·К);
 v_c – надлишкова температура на поверхні тіла,

$$v_c = t_c - t_a. \quad (2.116)$$

Рішення рівняння (2.112) при граничних умовах (2.115) має наступний вигляд:

$$v = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot U_n \cdot e^{-m_n \cdot \tau}, \quad (2.117)$$

де A_n – постійна, що залежить від форми тіла і початкового розподілу температури;
 U_n – функція координат, що характеризує просторовий розподіл температур і містить в якості параметрів фізичні характеристики тіла;
 m – постійна величина, що росте з ростом числа n і залежить від розмірів і форми тіла та умов теплообміну із навколишнім середовищем.

З ростом τ ряд (2.117) швидко сходиться, тому, починаючи з деякого значення $\tau \geq \tau_1$, можна обмежитися його першим членом:

$$\nu = A_1 \cdot U_1 \cdot e^{-m_1 \cdot \tau}. \quad (2.118)$$

В момент часу $0 < \tau < \tau_1$ розподіл температури в тілі залежить від початкових умов. Ця стадія охолодження називається неупорядкованим режимом.

При $\tau_1 < \tau < \infty$ температурне поле не залежить від початкових умов. Ця стадія процесу називається регулярним режимом. Логарифмуючи (2.118), взявши похідну по часу, отримуємо:

$$\ln \nu = -m_1 \cdot \tau + \ln A_1 \cdot U_1, \quad (2.119)$$

звідки:

$$m = -\frac{1}{\nu} \cdot \frac{d\nu}{d\tau}, \quad (2.120)$$

де m – темп охолодження або відносна зміна температури в часі. У регулярному режимі ця величина постійна для будь-якої точки тіла, що охолоджується.

Інтегруючи рівняння (2.120), отримуємо наступний вираз для визначення темпу охолодження:

$$m = \frac{\ln \nu_1 - \ln \nu_2}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (2.121)$$

Як видно з виразу (2.121), в координатах $\ln(\nu) = f(\tau)$ темп охолодження являє собою тангенс кута нахилу прямий до осі абсцис $tg\alpha$.

За теоретичним даними, при інтенсивному теплообміні (критерій Біо $\rightarrow \infty$) величина m прямо пропорційна коефіцієнту температуропровідності тіла, що охолоджується (друга теорема Кондратьєва):

$$a = k \cdot m, \quad (2.122)$$

де k – коефіцієнт форми тіла.

Рівняння (2.122) справедливе для тіл будь-якої геометричної форми в процесах охолодження, що протікають при постійній температурі навколишнього середовища ($t_{\text{жс}} = \text{const}$) [19].

Спосіб другий: температуропровідність різних заповнювачів визначається з використанням відомого в літературі способу (за методом Н.Ю.Тайца), що передбачає в своїй постановці застосування методу регулярного теплового режиму за нагрівання необмеженого суцільного циліндра в умовах лінійної зміни температури його поверхні та початкової різниці Δt_0 по перетину.

Для розрахунку режиму нагріву важливо знати коефіцієнт температуропровідності, тому що ця величина входить в розрахункові формули. Коефіцієнт температуропровідності пов'язаний з теплопровідністю співвідношенням:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}, \quad (2.123)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К),

c_p – ізобарна питома теплоємність, Дж/(кг К),

ρ – щільність, кг/м³.

Запропонована методика дає можливість безпосередньо визначати теплопровідність сталі тими засобами, які, як правило, мають лабораторія заводу та ВУЗ.

Методика заснована на рішенні диференціального рівняння теплопровідності за умови постійності швидкості нагріву та наявності різниці температур у початковий момент по перетину тіла.

Якщо C – швидкість нагріву, °C/с, Δt_0 – різниця температур поверхні і середини тіла в початковий момент, °C, Δt – різниця температур на поверхні і в якійсь проміжній точці в даний момент часу, то рішення рівняння теплопровідності для циліндра нескінченної довжини радіуса R буде мати наступний вигляд:

$$\frac{\Delta t}{C \cdot \tau} = \frac{R^2}{4 \cdot a \cdot \tau} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) - \left(\frac{R^2}{a \cdot \tau} - \frac{4 \cdot \Delta t_0}{C \cdot \tau}\right) \cdot \hat{O}\left(\frac{a \cdot \tau}{R^2}, \frac{r}{R}\right), \quad (2.124)$$

де τ – час, с;

a – коефіцієнт теплопровідності, м²/с;

$\left(\frac{a \cdot \tau}{R^2}\right)$ – критерій Фур'є;

r – координата;

Φ – позначення сум нескінченної низки.

Значення цієї суми можуть бути визначені за номограми Н.Ю.Тайца "Функції $\hat{O}\left(\frac{a \cdot \tau}{R^2}; \frac{r}{R}\right)$ для циліндра при постійній швидкості нагріву" залежно від критеріїв $\left(\frac{a \cdot \tau}{R^2}, \frac{r}{R}\right)$ [20].

Якщо визначається різниця температур поверхні і середини тіла, то $\left(\frac{r}{R}\right)=0$, і тоді рішення рівняння (2.124) приймає наступний вигляд:

$$\frac{\Delta t}{C \cdot \tau} = \frac{R^2}{4 \cdot a \cdot \tau} \cdot \left(\frac{R^2}{a \cdot \tau} - \frac{4 \cdot \Delta t_o}{C \cdot \tau} \right) \cdot \hat{O} \left(\frac{a \cdot \tau}{R^2} \right). \quad (2.125)$$

Інакше кажучи, $\frac{\Delta t}{C \cdot \tau}$ може бути представлене у вигляді залежності від двох критеріїв $\frac{\Delta t_o}{C \cdot \tau}$ і $\left(\frac{a \cdot \tau}{R^2} \right)$, так як тільки вони входять в праву частину виразу (2.125).

Поставивши поруч значень цих двох критеріїв, можна, користуючись номограмою Н.Ю.Тайца "Функції $\hat{O} \left(\frac{a \cdot \tau}{R^2}; \frac{r}{R} \right)$ для циліндра при постійній швидкості нагріву" [20], визначити критерій $\frac{\Delta t}{C \cdot \tau}$ для циліндра.

Результати таких розрахунків наведені на номограмах Н.Ю.Тайца "Графік для визначення коефіцієнта теплопровідності циліндра" [20].

Метод зводиться до нагрівання зразків у формі циліндра і до вимірювання температури на поверхні і в середині зразка. По різниці температур Δt на початку і кінці кожного інтервалу і по швидкості нагріву обчислюються критерії $\frac{\Delta t_o}{C \cdot \tau}$ і $\frac{\Delta t}{C \cdot \tau}$, після чого за графіком визначаються критерії $\left(\frac{a \cdot \tau}{R^2} \right)$, а потім коефіцієнт теплопровідності a .

Викладеним методом визначається середня по перетину величина коефіцієнта теплопровідності, що, власне кажучи, і потрібно для вирішення практичних питань нагріву.

2.5 Експериментальна частина

2.5.1 Установка для визначення теплофізичних властивостей і експеримент

Опис експериментальної установки для методики визначення теплових характеристик тіл за методом регулярного режиму.

Експериментальна установка складається із калориметру, термостата, сушильної шафи та вимірювальних приладів: a – калориметр являє собою мідний циліндр, який наповнений досліджуваним матеріалом з внутрішнім діаметром $d = 36$ мм і довжиною $l = 65$ мм. Для забезпечення умови $t_{ж} = \text{const}$ калориметр поміщений в термостат ТС – 24.

Різниця температур в a – калориметрі і термостаті вимірюється диференціальною хромеллю – копелевою термопарою. Один спай термопари розміщуємо в центрі a – калориметру з досліджуваним матеріалом, а другий – у термостаті.

Порядок проведення досліду: перед початком досліду a – калориметр із досліджуваним матеріалом прогріваємо у сушильній шафі до заданих температур 100, 80, 60 °С. Потім a – калориметр поміщуємо в термостат. Температура води в термостаті автоматично підтримується постійною: у момент розміщення калориметру в термостат включається мішалка, яка дозволяє безперервно перемішувати шари води в термостаті, стабілізуючи її температуру.

Відлік показань надлишкової температури ведемо через кожні 10 секунд до тих пір, аж поки температури термостата і калориметру не зрівняються.

Було проведено 22 досліди з різними засипками при температурах нагріву 60, 80, 100 °С [19].

Одним із підходів до визначення теплофізичних параметрів є проведення дослідних нагрівів спеціально підготовлених зразків з досліджуваного матеріалу із одержанням температурного поля та наступним рішенням зворотного завдання теплопровідності.

Опис експериментальної установки для методики Н.Ю.Тайца.

Для дослідження температуропровідності використовували дослідну капсулу, яка представляє собою тонкостінну оболонку із нержавіючої сталі з діаметром 36 мм і завдовжки 200 мм, з товщиною стінки 3 мм, закривається з двох сторін знімними пробками, які випиляні з легкого шамоту, що з помітною мірою перешкоджає позовжньому перетіканню тепла, забезпечуючи таким чином умову необмеженості системи. В одній із пробок виконано два наскрізні отвори з метою введення хромель-алюмелевих термопар (діаметром 0,25 мм), вимірюють температуру на поверхні досліджуваного заповнювача і в центрі, при цьому спаї перебувають на рівні середини висоти капсули. Для електроізоляції використовуємо двоканальну алундову соломку.

Перед нагріванням робочу порожнину дослідної капсули заповнюємо досліджуваним матеріалом.

Для нагріву дослідних капсул з експериментальним заповнювачем використовуємо лабораторні електричні печі, які забезпечують симетричний нагрів та розвивають у робочому просторі температури 900 та 1200 °С. У процесі кожного із дослідних нагрівів кожну хвилину здійснюємо фіксування температури поверхні та центру заповнювача капсули за допомогою потенціометра.

Для перевірки методики у якості тестового матеріалу з відомими теплофізичними властивостями використовували пісок.

В печі з максимальним нагріванням 900 °С було проведено 5 дослідів, при температурі 1200°С – 3 дослідів .

2.5.2 Результати експерименту і обробка результатів для отримання теплофізичних властивостей

З метою розробки раціональних режимів нагріву необхідні дані про її теплофізичні характеристики (коефіцієнти теплопровідності та температуропровідності) і їх зміну з температурою. Вказані відомості в літературі відсутні.

Можна зазначити, що дані щодо коефіцієнтів температуро- і теплопровідності використовуються не тільки у модельних розрахунках з метою обліку поздовжнього переносу тепла в шарі, а також знаходять все більш широке застосування при аналізах процесу твердофазного та рідкофазного спікання.

Обробка результатів дослідів виконується за методикою експериментального визначення теплових характеристик тіл з використанням методу регулярного режиму [19]:

1. за даними дослідів побудувати графік $\ln v = f(\tau)$;
2. на прямолінійній ділянці графіка вибрати дві точки з координатами $\tau_1, \ln v_1; \tau_2, \ln v_2$ і за формулою (2.121) визначити значення темпу охолодження m ;
3. визначити коефіцієнт форми тіла, що для даного a – калориметру знаходиться за формулою:

$$k = \frac{1}{\left(\frac{2,408}{R}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}, \quad (2.126)$$

де R – радіус калориметру, м;

l – довжина калориметру, м;

4. використовуючи формулу (2.122), обчислити коефіцієнт температуропровідності a .

Обробка отриманих результатів за методом Н.Ю.Тайца, яка передбачає у своїй постановці застосування методу регулярного теплового режиму, здійснюється у наступному порядку:

1. весь період нагріву розбивається на ділянки таким чином, щоб у межах кожної ділянки зміна температури на поверхні була прямолінійною і щоб, за можливості, вказані ділянки складали $(80...100) ^\circ\text{C}$,
2. визначається підйом температури поверхні на даній ділянці $(C \cdot \tau)$; різниці температур Δt_o і Δt , середні температури зразка на межах ділянки для циліндра:

$$t_{\bar{n}\delta} = t_i - 0,5 \cdot \Delta t, \quad (2.127)$$

де t_i – температури поверхні, $^\circ\text{C}$;

середні температури для кожної ділянки, як середня арифметична для початку і кінця ділянки; критерії $\frac{\Delta t_o}{C \cdot \tau}$ і $\frac{\Delta t}{C \cdot \tau}$; критерій $\frac{a \cdot \tau}{R^2}$ з відповідного графіка ("Графік для визначення коефіцієнта теплопровідності циліндра" Н.Ю.Тайца) залежно від форми зразка; коефіцієнт a для середньої температури в даній ділянці. Дослід повторюється три чи чотири рази, по можливості із зміною швидкості нагріву;

3. результати розрахунку для кожного досліду зображуються графічно у вигляді залежності коефіцієнта теплопровідності від температури.

Результати всіх експериментів представлені у табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Короткий опис експериментів і результати дослідів

Номер досліду	Методика	Призначення нагріву	Склад шихти	Температурний рівень шихти, °С	Тип установки для нагріву	Коефіцієнт температуропровідності	Примітки
1	Метод регулярного режиму	Тестовий	Пісок	101,5	Сушильна шафа	$0,28246 \cdot 10^{-6} / 0,346 \cdot 10^{-6}$	*середнє значення коеф. температуропровідності з/без крайніх точок
2	Метод регулярного режиму	Тестовий	Пісок	84	Сушильна шафа	$0,2472 \cdot 10^{-6} / 0,257 \cdot 10^{-6}$	-//-
3	Метод регулярного режиму	Тестовий	Пісок	80	Сушильна шафа	$0,27462 \cdot 10^{-6} / 0,2472 \cdot 10^{-6}$	-//-
4	Метод регулярного режиму	Тестовий	Пісок	75	Сушильна шафа	$0,2472 \cdot 10^{-6} / 0,2472 \cdot 10^{-6}$	-//-
5	Метод регулярного режиму	Тестовий	Пісок	67,5	Сушильна шафа	$0,24716 \cdot 10^{-6} / 0,26962 \cdot 10^{-6}$	-//-
6	Метод регулярного режиму	Експериментальний	стружка	99	Сушильна шафа	$0,30895 \cdot 10^{-6} / 0,41193 \cdot 10^{-6}$	-//-

Продовження таблиці 2.1

Номер дослідів	Методика	Призначення нагріву	Склад шихти	Температурний рівень шихти, °С	Тип установки для нагріву	Коефіцієнт температуропровідності	Примітки
7	Метод регулярного режиму	Експериментальний	стружка	81,5	Сушильна шафа	$0,29209 \cdot 10^{-6}$ / $0,30419 \cdot 10^{-6}$	-/-
8	Метод регулярного режиму	Експериментальний	стружка	80	Сушильна шафа	$0,2035 \cdot 10^{-6}$ / $0,21969 \cdot 10^{-6}$	-/-
9	Метод регулярного режиму	Експериментальний	стружка	60	Сушильна шафа	$0,28835 \cdot 10^{-6}$ / $0,28246 \cdot 10^{-6}$	-/-
10	Метод регулярного режиму	Експериментальний	100% порошок, зразок №1	103	Сушильна шафа	$0,1589 \cdot 10^{-6}$ / $0,15447 \cdot 10^{-6}$	-/-
11	Метод регулярного режиму	Експериментальний	порошок, зразок №1	80	Сушильна шафа	$0,17975 \cdot 10^{-6}$ / $0,1977 \cdot 10^{-6}$	-/-
12	Метод регулярного режиму	Експериментальний	порошок, зразок №1	60	Сушильна шафа	$0,1699 \cdot 10^{-6}$ / $0,16477 \cdot 10^{-6}$	-/-
13	Метод регулярного режиму	Експериментальний	порошок, зразок №2	111	Сушильна шафа	$0,16477 \cdot 10^{-6}$ / $0,1561 \cdot 10^{-6}$	-/-
14	Метод регулярного режиму	Експериментальний	порошок, зразок №2	62	Сушильна шафа	$0,1765 \cdot 10^{-6}$ / $0,1821 \cdot 10^{-6}$	-/-

Продовження таблиці 2.1

Номер дослідів	Методика	Призначення нагріву	Склад шихти	Температурний рівень шихти, °С	Тип установки для нагріву	Коефіцієнт температуро-провідності	Примітки
15	Метод регулярного режиму	Експериментальний	некондиційний порошок	100	Сушильна шафа	$0,1273 \cdot 10^{-6}$ / $0,13 \cdot 10^{-6}$	-//-
16	Метод регулярного режиму	Експериментальний	некондиційний порошок	58	Сушильна шафа	$0,1359 \cdot 10^{-6}$ / $0,1348 \cdot 10^{-6}$	-//-
17	Метод регулярного режиму	Експериментальний	циклонний пил	100	Сушильна шафа	$0,1957 \cdot 10^{-6}$ / $0,18 \cdot 10^{-6}$	-//-
18	Метод регулярного режиму	Експериментальний	циклонний пил	61	Сушильна шафа	$0,1854 \cdot 10^{-6}$ / $0,1977 \cdot 10^{-6}$	-//-
19	Метод регулярного режиму	Експериментальний	стружка електродна	100	Сушильна шафа	$0,6844 \cdot 10^{-6}$ / $0,81208 \cdot 10^{-6}$	-//-
20	Метод регулярного режиму	Експериментальний	стружка електродна	75	Сушильна шафа	$1,059 \cdot 10^{-6}$ / $0,89 \cdot 10^{-6}$	-//-
21	Метод регулярного режиму	Експериментальний	стружка прокатного цеху	102	Сушильна шафа	$0,4943 \cdot 10^{-6}$ / $0,4943 \cdot 10^{-6}$	-//-

Продовження таблиці 2.1

Номер дослідів	Методика	Призначення нагріву	Склад шихти	Температурний рівень шихти, °С	Тип установки для нагріву	Коефіцієнт температуропровідності	Примітки
22	Метод регулярного режиму	Експериментальний	стружка прокатного цеху	63	Сушильна шафа	$0,565 \cdot 10^{-6}$ / $0,6344 \cdot 10^{-6}$	-//-
23	Метод Н.Ю.Тайца	Тестовий	пісок	900	Муфельна піч	$0,34 \cdot 10^{-6}$ / $0,405 \cdot 10^{-6}$	*середнє /максимальне значення коеф. температуропровідності
24	Метод Н.Ю.Тайца	Експериментальний	стружка	657	Муфельна піч	$0,91 \cdot 10^{-6}$ / $1,18 \cdot 10^{-6}$	-//-
25	Метод Н.Ю.Тайца	Експериментальний	стружка	898	Муфельна піч	$0,95 \cdot 10^{-6}$ / $1,18 \cdot 10^{-6}$	-//-
26	Метод Н.Ю.Тайца	Експериментальний	35,15% стружка, 64,85% порошок. зразок №2	895	Муфельна піч	$0,42 \cdot 10^{-6}$ / $0,9 \cdot 10^{-6}$	-//-
27	Метод Н.Ю.Тайца	Експериментальний	порошок, зразок №2	897,5	Муфельна піч	$0,345 \cdot 10^{-6}$ / $0,62 \cdot 10^{-6}$	-//-
28	Метод Н.Ю.Тайца	Експериментальний	стружка	1279	Піч Тамана	$0,75 \cdot 10^{-6}$ / $0,95 \cdot 10^{-6}$	-//-

Продовження таблиці 2.1

Номер дослідів	Методика	Призначення нагріву	Склад шихти	Температурний рівень шихти, °С	Тип установки для нагріву	Середній коефіцієнт температуропровідності	Примітки
29	Метод Н.Ю.Тайца	Експериментальний	20,73% стружка, 79,27% робоча фракція №1	1242	Піч Тамана	$0,91 \cdot 10^{-6}$ / $1,22 \cdot 10^{-6}$	-//-
30	Метод Н.Ю.Тайца	Експериментальний	15,34% стружка, 36,02% циклонний пил, 48,64% некондиційний порошок	1256,5	Піч Тамана	$2,75 \cdot 10^{-6}$ / $4,05 \cdot 10^{-6}$	-//- Невдалий експеримент

3 ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНИХ ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ

В якості матеріалу для нагрівання і спікання використовували шихту наступного складу: дрібнодисперсні металеві відходи виробництва порошкової швидкоріжучої сталі Р6М5 (циклонний пил) – 79 %, стружка силового шліфування швидкоріжучої сталі Р6М5 – 21 %. Ефективний коефіцієнт температуропровідності a для використаної в розрахунках шихти визначався у рамках даної роботи розрахунково-експериментальним шляхом та представлений на рис. 3.1.

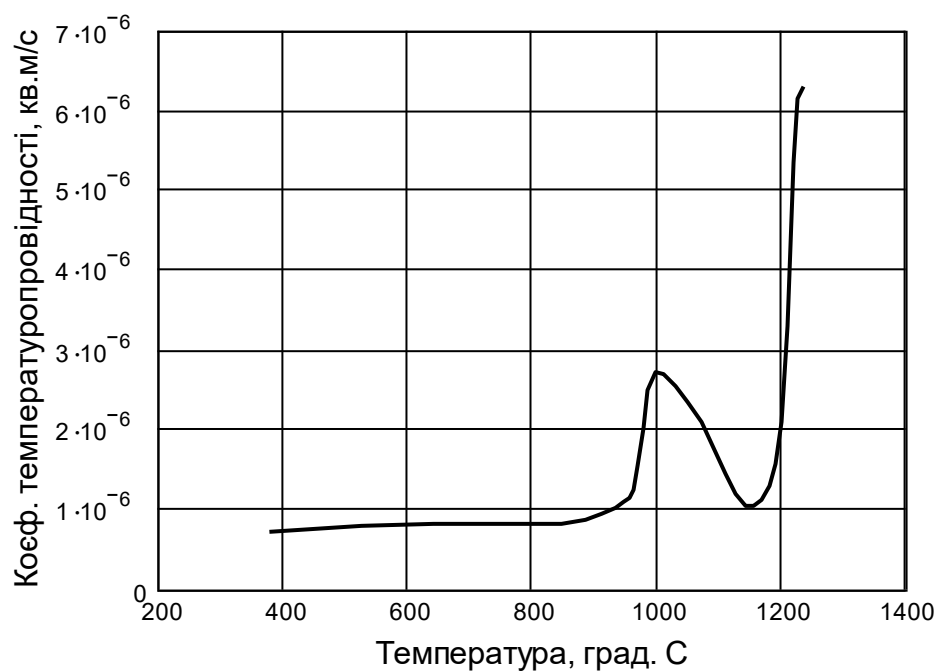


Рисунок 3.1 – Ефективний коефіцієнт температуропровідності відомого складу шихти

Для умов проведення експерименту з визначення ефективного коефіцієнта температуропровідності був зроблений розрахунок температурного поля в експериментальній капсулі для граничних умов першого роду:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{ep} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad 0 < \tau \leq \tau_k, \quad 0 < r < R_e, \quad (3.1)$$

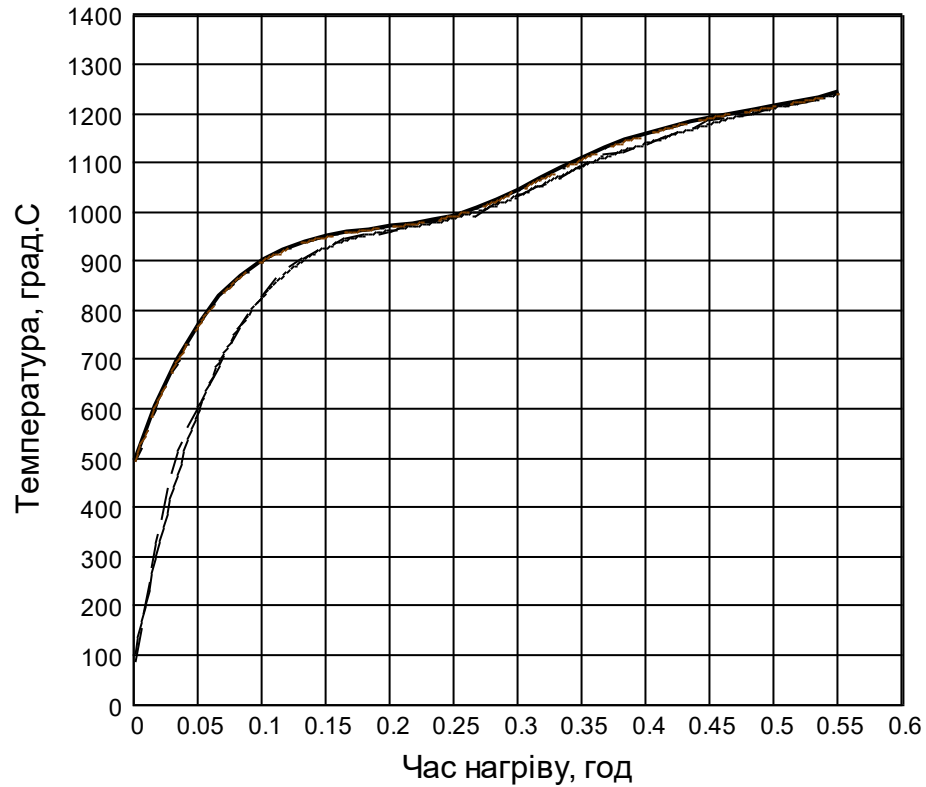
$$t(r, 0) = t_{n.m}, \quad 0 \leq r \leq R_e, \quad (3.2)$$

$$\lambda_{ep} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad (3.3)$$

$$t \Big|_{r=R_e} = t_{n.e}, \quad (3.4)$$

де R_e – радіус поверхні експериментальної капсули, м;
 $t_{n.e}$ – температура поверхні експериментального зразка (за даними експерименту), °С.

Рішення крайової задачі (3.1) – (3.4) виконано методом кінцевих різниць за наведеною вище процедурою. Зіставлення експериментального температурного поля t^e з його розрахунковим аналогом t^p показує їх практично повний збіг - середня помилка відновлення температурного поля не перевищує 1,5 %, див. рис. 3.2.



- – температура центру дослідна;
- _____ – розрахункова температура центру;
- _____ – досвідчена температура поверхні

Рисунок 3.2 – Результати порівняння експериментального температурного поля зразка з його розрахунковим аналогом

За розрахунковим температурним полем t^p зразка із застосуванням відомого алгоритму рішення зворотного завдання теплопровідності [24, 25] для шихти, розглянутого складу, одержані значення ефективного коефіцієнта теплопровідності та ефективної питомої об'ємної теплоємності, рис. 3.3 і рис. 3.4, які необхідні для розрахунку граничних умов і рішення диференціального рівняння нестационарної теплопровідності в циліндричних координатах, що описує нагрівання та спікання шихти із дрібнодисперсних металевих відходів в капсулі.

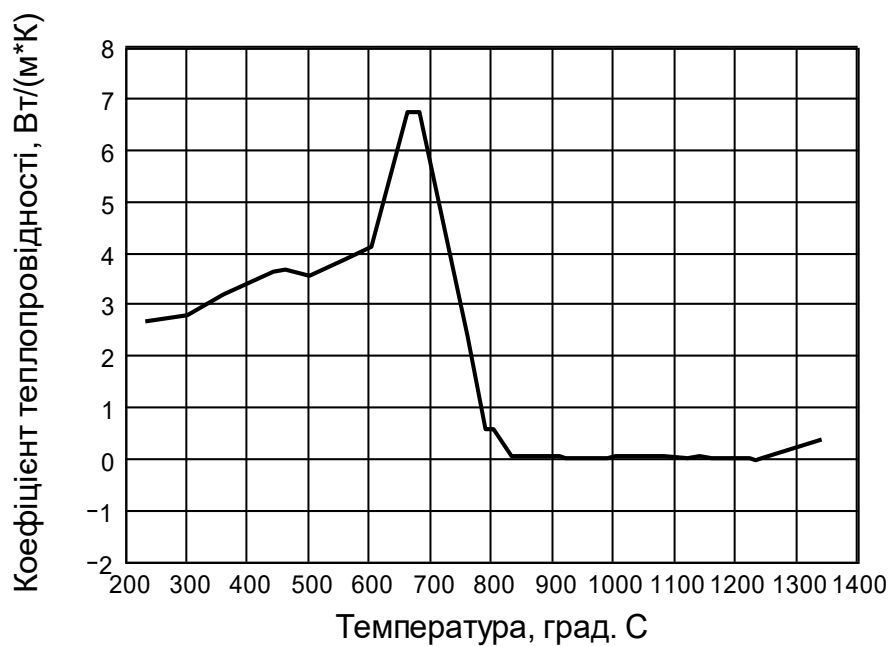


Рисунок 3.3 – Розрахункові значення ефективного коефіцієнта теплопровідності відомого складу шихти

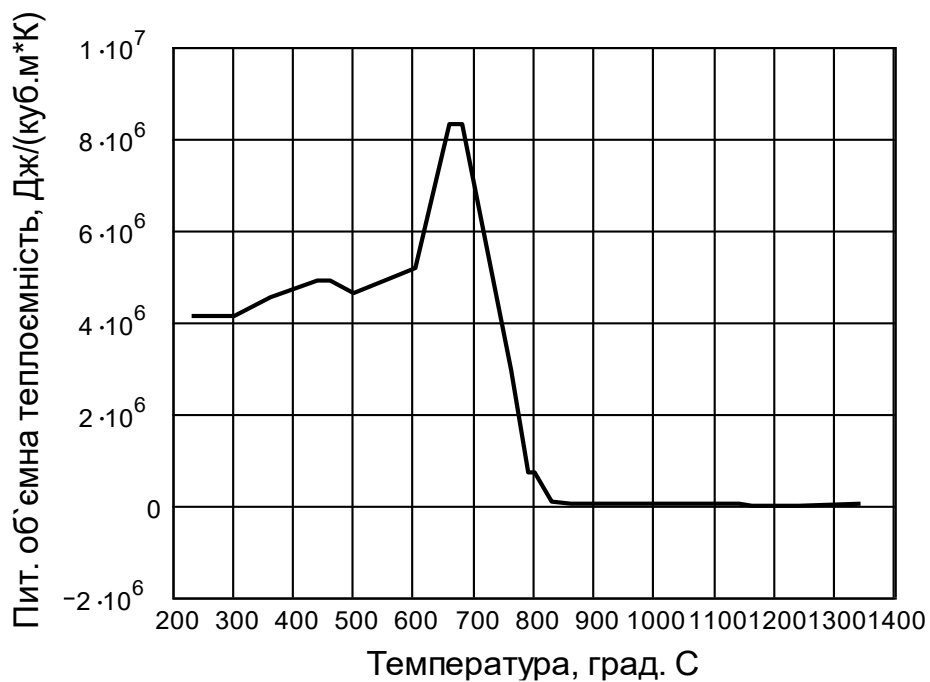


Рисунок 3.4 – Розрахункові значення ефективної об'ємної теплоємності відомого складу шихти

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі було проведено комплекс лабораторних досліджень теплофізичних закономірностей, вибір оптимальних умов підготовки шихти та технології отримання спечених матеріалів із вторинної сировини стосовно до умов промислового підприємства.

Проведені експерименти дали можливість визначити залежність ефективного коефіцієнта температуропровідності від температури при відомому складі шихти, а також залежність ефективного коефіцієнта теплопровідності та ефективної об'ємної теплоємності від температури. Вищезазначена інформація є основою для створеної математичної моделі, результатами якої є - температурний та тепловий режим нагріву шихти.

Рециклінг дрібнодисперсних металовмісних відходів металургійного виробництва найбільш ефективний при використанні сучасних технологій згрудкування, до якого відноситься спікання у капсулах. Розроблена технологія суттєво зменшує угар дорогих легованих матеріалів за рахунок зменшення поверхні окислення дрібнофракційних відходів. Даний спосіб компактування матеріалів дозволяє значною мірою забезпечити технологічні умови утилізації відходів і поліпшити екологічну обстановку в тих регіонах, де спостерігається накопичення даного виду відходів, а також вирішити питання енергозбереження в металургійній галузі.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах : монография. Донецк : Ноулидж, 2012. 247 с.
2. Баріщенко О. М., Ревун М. П. Актуальні енергозберігаючі методи роботи нагрівальних печей : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 138 с.
3. Ерёмин А. О. Современные способы отопления нагревательных печей. *Металлургическая теплотехника* (Сб.научн. трудов НМетАУ). Днепропетровск : Новая идеология, 2008. С. 139 – 151.
4. Пилипенко Р. А. Интенсификация тепловой работы камерных печей, отапливаемых природным газом. *Металлургическая теплотехника* (Сб. науч. трудов НМетАУ). Днепропетровск: НМетАУ, 2002. Т.8. С.99-105.
5. Soroka B. Fuel Furnaces in the problem of enhancement the process of heat- and mass transfer. In: V Minsk Intern. Heat & Mass transfer Forum Proceedings. – section 9 “Thermophysics and Thermal Engineering of Metallurgical Process”. 2004. №3 . 35p.
6. Soroka B., Zgurskyi V. Updating the modern techniques of radiative heat transfer calculation within fuel furnaces and boilers. *WSEAS transactions on heat and mass transfer*. 2014. № 9. P. 205-220.
7. Єр'омін О. О., Сибір А. В., Губинський В. Й. Дослідження об'ємно – регенеративного опалення камерної печі на основі математичного моделювання руху газів і теплообміну. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика* : зб. наук. пр. Дніпропетровськ : Нова ідеологія. 2010. Вип. 2. С. 96–106.
8. Ревун М. П., Зинченко В. Ю. Перспективные направления совершенствования тепловой работы нагревательных и термических камерных печей. *Металлургическая теплотехника* (Сборник научных трудов НМетАУ). 2006. № 6. С. 294-302.

9. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Менделев Д.В., Ратников П.Э. Анализ методов математического моделирования процессов теплообмена в промышленных печах для нагрева металла. *Литьё и металлургия*. 2012. № 2 (65). С. 102 – 107.
10. Технологическая инструкция по производству порошка методом распыления расплавов.- Запорожье: ОАО «Днепрспецсталь», 2002.- 22 с.
11. Носков В.А. Брикетирование, как технология рециклирования мелкофракционных промышленных отходов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*.-1998.-№3.-с.119-121.
12. Ревун М.П., Каюков Ю.Н., Чепрасов А.И., Иванов В.И. Математическое моделирование нагрева металла в пламенной печи камерного типа. *Металургія. Збірник наукових праць / Відп. редактори Колесник М.Ф., Колобов Г.О. Запоріжжя: ЗДІА, 2009.-Вип.20.- 163 с., с.130-140.*
13. Тайц Н.Ю., Гольдфарб Э.М.. Методика определения коэффициентов температуропроводности и теплопроводности сталей // *Заводская лаборатория*, Т.16.- 1950.- №3.-с.314-319
14. Візер А. А. Щодо недоліків теплової роботи камерних печей. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2015. № 34. С. 89 - 92.
15. Аругтюнов В. А., Ибадуллаев Т. Б. Развитие методов математического моделирования теплофизических процессов в топливных промышленных печах. *Металлург*. 2011. № 1. С. 33–36.
16. Сибирь А. В., Решетняк С. И., Романько Я. В. Применение современных методов моделирования для расчета тепловой работы топливных нагревательных печей. *Теплотехника и энергетика в металлургии*. Днепропетровск, 2008. С. 204–20.
17. Зінченко В. Ю., Іванов В. І., Чепрасов О. І., Каюков Ю. М. Аналіз сучасного стану оптимізації теплової роботи нагрівальних печей камерного типу. *Металургія*. 2016. Вип. 2. С. 93-97.

18. Ткаченко В. Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Київ : Наукова думка, 2008. 244 с.
19. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Моделирование нестационарного теплопереноса в замкнутой области с локальным источником тепловыделения. *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. № 2. С. 305-314.
20. Рыжов Э. В., Горленко О. А. Математические методы в технологических исследованиях. К : Наук. думка, 1990. 184 с.
21. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е. Методики расчета нагревательных и термических печей : учеб. пособ. Москва : Теплотехник, 2004. 400 с.
22. Гаврилко С.А., Дятел С.И., Тибина О.А., Моисейко Ю.В. Особенности производства быстрорежущей высокованадиевой стали методом порошковой металлургии. *Металургія. Збірник наукових праць / Запоріжжя: ЗДІА, 2008.-Вип.18.-175 с.*
23. Босов А. А. Функции множества и их применение : монография. Днепродзержинск : Андрей. 2007. 182 с.
24. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособ. для вуз. 10-е изд, стереотипное. Москва : Высшая школа, 2004. 479 с.
25. Елисеева И. И. Общая теория статистики : учеб. пособ. 4-е изд. перераб. и доп. Москва : Финансы и Статистика, 2002. 480 с.
26. Адлер Ю.П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука.,1976. - 279 с.
27. Лукомский Ф.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. Москва : Госстатиздат, 1958. 120 с.
28. Тымчак В. М., Гусовский В. Л. Расчет нагревательных и термических печей. М. : Металлургия, 1983. – 480 с.

29. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е. Методики расчета нагревательных и термических печей : учеб. пособ. Москва : Теплотехник, 2004. 400 с.

30. Зінченко В. Ю., Іванов В. І., Чепрасов О. І., Каюков Ю. М. Аналіз сучасного стану оптимізації теплової роботи нагрівальних печей камерного типу. *Металургія*. 2016. Вип. 2. С. 93-97.

31. Візер А. А. Щодо недоліків теплової роботи камерних печей. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2015. № 34. С. 89 - 92.