МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проєкт)

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

на тему Дослідження методів зменшення перепаду температури при термообробці металу

Виконав: студент __курсу, групи _____
спеціальності 144 «Теплоенергетика»
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Теплоенергетика
(назва освітньої програми)
Мінгазова Дар'я Вікторівна
(ініціали та прізвище)
Керівник к.т.н., доцент Барішенко О.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент заст. к.т.н., доцент Воляр Р.М.
_____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність144 «Теплоенергетика»
(код та назва)

Спеціалізація _____
(код та назва)

Освітня програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
д.т.н., проф.__ ____В.Л. Коваленко
«_01___»_____12_____2024__року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ
Мінгазова Дар'я Вікторівна
(прізвище, ім'я, по батьков)

Тема роботи (проекту)Дослідження методів зменшення перепаду температури при термообробці металу

керівник роботи Барішенко Олена Миколаївна, канд.техн.наук, доцент,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_28_»_02__2024__року №_361 - с_____
1. Строк подання студентом роботи _____01 грудня 2024 р._____
2. Вихідні дані до роботи: технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики
3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)1. Огляд сучасного стану теплової обробки сталі в термічних печах, 2. Розробка математичної моделі та дослідження розподілу температури по ширині печі, 3. Результати експерименту і моделювання, 4. Удосконалення системи імпульсного опалення, 5. Розробка стартапу проєкту, 6. Визначення і опис небезпечних і шкідливих факторів на виробництві, 7. Розрахунок техніко-економічних показників проєкту

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)презентація роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Барішенко О.М.		
2	Барішенко О.М.		
3	Барішенко О.М.		
4	Барішенко О.М.		
5	Барішенко О.М.		
6	Барішенко О.М.		
7	Барішенко О.М.		

1. Дата видачі завдання _____01.06.2024_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд сучасного стану теплової обробки сталі в термічних печах	30.09.2024	
2	Розробка математичної моделі та дослідження розподілу температури по ширині печі	05.10.2024	
3	Результати експерименту і моделювання	15.10.2024	
4	Удосконалення системи імпульсного опалення	25.10.2024	
5	Розробка стартапу проєкту	05.11.2024	
6	Визначення і опис небезпечних і шкідливих факторів на виробництві	12.11.2024	
7	Розрахунок техніко-економічних показників проєкту	15.11.2024	
8	Розробка презентації роботи, проходження нормконтролю	25.11.2024	
9	Підготовка доповіді	28.11.2024	

Студент _____ Мінгазова Д. В.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Барішенко О.М.
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Коваленко І.І.
(підпис) (ініціали та прізвище)

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ВКР – випускна кваліфікаційна робота

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина

КПД–коефіцієнт корисної дії

МТП– металургійна термічна піч

ПТ–пальник топковий

РГ–режим горіння

ЧПС – часткового попереднього змішування

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ 5
ВСТУП 8
1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ В ТЕРМІЧНИХ ПЕЧАХ 13
1.1 Технологія теплової обробки сталі в термічних печах 13
1.2 Пальникові пристрої термічних печей 17
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ПО ШИРИНІ ПЕЧІ 25
2.1 Короткий огляд теоретичних робіт з розв'язання задач теплообміну в термічних печах 25
2.2. Постановка задачі моделювання теплової обробки металу в термічних печах 26
2.3. Математичне моделювання поля температур у робочому просторі печі 28
2.4 Теоретичний експеримент 29
3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ І МОДЕЛЮВАННЯ 38
3.1 Результаты теоретического эксперимента 38
3.2 Експериментальне обґрунтування залежності температури по ширині печі від коефіцієнта витрати повітря 44
4 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ОПАЛЕННЯ 47
4.1 Вибір раціональної системи управління тепловим режимом 47
5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ 57
Ключові елементи стартапу: 57
Очікувані результати: 58
6 ОХОРОНА ПРАЦІ 65
6.1. Загальні заходи з охорони праці при термічній обробці металу 65

6.2 Охорона праці оператора АСУ ТП 67
6.3 Пожежна безпека 71
7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ 73
7.1 Визначення капітальних вкладень 73
7.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат 74
7.3 Річні витрати на ЗП 74
7.4 Розрахунок річних амортизаційних відрахувань 75
7.5 Річні витрати на ремонт 76
7.6 Витрати електроенергії на живлення 76
7.7 Інші витрати 76
7.8 Річна економія експлуатаційних витрат 77
ВИСНОВКИ 81
ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА 83

ВСТУП

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

На сьогодні питання економії палива у печах набувають все більшого значення. Оскільки потреби в енергоносіях за рахунок внутрішніх ресурсів забезпечуються лише на 38-40 %, Україна належить до енергодефіцитних країн. У порівнянні з країнами Європейського Союзу, споживання енергії у чорній металургії на 1 тонну перевищує показники у 1,6 раза, а витрати на енергоресурси у собівартості металургійної продукції досягають 45 %.

Близько 18 % палива, що споживається у металургійному виробництві, витрачається на нагрів металу. Чинні режими управління нагрівом, орієнтовані на досягнення максимальної продуктивності печей, виявляються занадто дорогими за сучасних умов. Впровадження оптимальних режимів термічної обробки металу, які дозволяють мінімізувати витрати палива, вимагає перегляду існуючих методів та пристроїв для нагріву металу у термічних печах.

У зв’язку зі зростанням ринкової вартості палива для промислових підприємств України актуальним стає питання зменшення споживання природного газу. Це особливо важливо для однієї з найбільш енергоємних галузей країни – металургійного виробництва.Однак зниження використання природного газу не повинно погіршувати якість виробничих процесів металургії, зокрема такого важливого етапу, як нагрів металу у термічних печах. Тому актуальним є вдосконалення методів і пристроїв термічної обробки металу, які забезпечують мінімізацію витрат природного газу.

Одним із перспективних способів скорочення споживання природного газу в термічних печах є впровадження вдосконалених пальникових пристроїв. Це дозволить не лише знизити витрати палива, а й підвищити якість термічної обробки.

Для термічних печей із підподовими топками важливим є відпрацювання режимів опалення з перемінним коефіцієнтом витрати повітря. Крім того, перспективним напрямом є застосування імпульсного способу опалення, для якого необхідно вирішити теоретичну проблему визначення тривалості імпульсів подачі палива та повітря у робочий простір печі.

Варто також зазначити, що досягнення економії енергоресурсів у металургії потребує комплексного підходу. Це включає модернізацію обладнання, автоматизацію процесів управління нагрівом та впровадження сучасних систем моніторингу витрат енергії. Лише так можна досягти високої ефективності роботи печей за одночасного зниження собівартості продукції та збереження її якості.

МЕТА, ОБ’ЄКТ, ПРЕДМЕТ І ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження:аналіз методів зменшення перепаду температури при термообробці металу в термічних печах.

Об’єкт дослідження: тепломасообмінні процеси в термічних печах.

Предмет дослідження:камерні термічні печі з нерухомим подом.

Відповідно до поставленої мети дослідженя в роботі сформульовані наступні задачі:

– виконати аналіз сучасного стану термічних печей, методів і пристроїв теплової обробки металу;

– розробити та випробувати на фізичній моделі оптимальні конструктивні елементи пальникових пристроїв, які працюватимуть у широкому діапазоні температур із регульованою довжиною факела та змінним коефіцієнтом витрати повітря. Запропоновані пальникові пристрої повинні забезпечити покращене змішування продуктів згоряння в робочому просторі печі;

– провести експериментальні дослідження вдосконалених пальникових пристроїв;

– розробити теоретичну методику визначення тривалості подачі палива при імпульсному опаленні, виконати теоретичні та експериментальні дослідження за запропонованою методикою розрахунку параметрів імпульсного опалення;

– розробити математичну модель і виконати дослідження розподілу температур по ширині печі;

– отримати залежність витрати палива від зміни коефіцієнта витрати повітря.

– розробити та обґрунтувати стартап проекту;

– розглянути організацію охорони праці, провести аналіз умов праці та визначити заходи зниження впливу небезпечних і шкідливих факторів;

– виконати розрахунок економічного обґрунтування проекту та визначити економічну ефективність впровадженої автоматизованої системи управління технологічним процесом.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

У роботі використано: метод фізичного моделювання під час розробки конструкції пальникового пристрою; лабораторні та промислові експерименти для випробування розроблених пристроїв і методів теплової обробки металу; методи математичного моделювання для дослідження залежності розподілу температури по ширині печі; аналітичні методи для оцінки енергетичної ефективності запропонованих рішень; методи комп’ютерного моделювання для візуалізації процесів тепломасообміну; статистичні методи для обробки та аналізу результатів експериментальних досліджень; графоаналітичні методи для визначення оптимальних режимів роботи печей; порівняльний аналіз сучасних конструкцій та принципів роботи термічних печей із метою вибору найефективніших рішень. Такий

комплексний підхід дозволив забезпечити всебічне дослідження об’єкта і досягти поставлених цілей.

НАУКОВА НОВИЗНА ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

1. На основі математичного моделювання та експериментальних досліджень досліджено залежність розподілу температур по ширині печі в період витримки, а також сумарної витрати палива на нагрів металу від коефіцієнта витрати повітря.

2. На основі досліджень фізичної моделі пальника досліджено функціональну залежність довжини факела від сумарної площі отворів у газовому каналі та площі перерізу розсікачів газоповітряної суміші, що в перспективі дозволить забезпечити керований теплоперенос у робочому просторі печі.

3. Досліджено методику визначення тривалості імпульсів подачі палива та повітря у робочий простір печі в період витримки металу на основі динамічних характеристик температури у різних точках по ширині печі.

ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ

Запропонована для подальшого впровадження на підприємстві технологія для зменшення перепаду температури в процесі термообробки металу, що дозволить підвищити якість продукції, скоротити витрати палива та знизити зношення обладнання.

ОСОБИСТИЙ ВНЕСОК

Теоретичні дослідження, їх опрацювання, а також узагальнення отриманих результатів виконані здобувачем самостійно. У роботах, опублікованих у співавторстві, автор брав участь у постановці завдання дослідження, отриманні та обговоренні експериментальних і числових результатів, узагальненні дослідних даних. Участь у розробці

експериментальної методики, аналізі ефективності запропонованих рішень та підготовці висновків на основі отриманих результатів. Значна увага приділялася аналізу сучасних методів теплової обробки металу, порівнянню їх із запропонованими підходами та розробці рекомендацій для впровадження на промислових підприємствах.

СТРУКТУРА МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Магістерська робота складається з вступу, семи розділів, загальних висновків, списку літератури із 48найменування і вміщує80сторінок основного тексту,10таблиць,19рисунків, усього88 сторінок.

1 ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕПЛОВОЇ ОБРОБКИ СТАЛІ В ТЕРМІЧНИХ ПЕЧАХ

1.1 Технологія теплової обробки сталі в термічних печах

На сьогоднішній день у металургійному виробництві та машинобудуванні організація виробництва з повним комплексом виконання технологічних операцій у цехах базується на використанні термічних печей різних конструкцій. Це зумовлено тим, що процеси нагріву, які виконуються у печах за допомогою нагрівальних пристроїв, широко застосовуються у всіх галузях промисловості, що працюють із металом. Тому термічні печі є одним із основних видів технологічного обладнання.

Теорія печей як галузь технічної науки виникла на початку XX століття завдяки роботам В. Є. Грум-Гржимайла. Подальший розвиток цієї галузі відбувався під впливом таких вчених, як Н. М. Доброхотов, І. Д. Семикін, М. Ю. Тайц, Є. М. Гольдфарб, Ю. І. Розенгарт, М. А. Глінков, Г. П. Іванцов, С. Є. Ростовський, Б. І. Китаєв та його учні, В. М. Тимофєєв, А. С. Невський, І. В. Бєлов, А. В. Кавадеров, Р. Є. Шкляр та інші.

Технологія теплової обробки сталі в термічних печах передбачає контрольоване нагрівання та охолодження матеріалу для досягнення необхідних фізико-механічних властивостей. Основними етапами є:

– нагрівання сталі до заданої температури відповідно до технологічного процесу, з урахуванням типу сталі та її властивостей.

– витримка при високій температурі, яка забезпечує рівномірний розподіл тепла по всьому об’єму матеріалу та створює умови для фазових перетворень.

– контрольоване охолодження, яке впливає на кінцеву структуру матеріалу (наприклад, гартування, відпуск, нормалізація).

До термічних печей висуваються все більш високі вимоги:

– забезпечення високої продуктивності та зниження енерговитрат за заданих технологічних умов нагрівання (температура та графік її зміни, перепад температур у робочому просторі печі та за перетином металу тощо);

– мінімальна питома витрата палива;

– можливість зміни продуктивності та сортаменту нагрітих виробів;

– наявність механізації завантаження і вивантаження виробів;

– простота й безпечність обслуговування та ремонту; можливість автоматичного управління піччю та відділенням печей.

Термічні печі класифікуються за технологічними, конструктивними та іншими ознаками. Вони працюють за зниженої температури робочого простору порівняно з нагрівальними печами, що виключає перегрів сталі. Режими нагріву включають період витримки, необхідний для структурних перетворень сталі. За конструктивними особливостями термічні печі поділяються на камерні печі зі стаціонарним і висувним подом. Термічні печі також можна класифікувати за видом енергоносія. Загальною ознакою всіх термічних печей є температурний режим, який передбачає дві або більше стадії теплової обробки металу.

Широке застосування термічних печей зумовлене їх універсальністю у виконанні режимів термообробки, формою, розмірами та масою оброблюваної продукції, а також використанням газоподібного палива. Є можливість реконструкції цих печей відповідно до зростаючих вимог до термічної обробки.

Термічні печі широко застосовуються в цехах промислових підприємств. Це пояснюється різноманітністю як режимів термообробки, так і форм і розмірів заготовок, що завантажуються в піч. В одних і тих самих печах може здійснюватися теплова обробка злитків, заготовок, сортового пруткового та бунтового прокату, поковок, підката. Нагрітий

метал піддається тепловій обробці за високих, середніх і низьких температур, за різного часу технологічного режиму та кількості стадій нагріву й охолодження залежно від характеристик режиму та марки сталі.

Термічні печі заводу «Дніпроспецсталь» використовуються для виконання пом'якшувального відпалу, протифлокенного та структурного відпалу, нормалізації й загартування. Печі дають змогу обробляти малі партії прокату, а також сталі різних марок одного розміру та профілю за одним режимом відповідно до технологічної інструкції, оскільки ризик змішування металу відсутній[7].

Камерна термічна піч – це спеціальна піч, призначена для нагрівання металу з використанням палива і оптимізації продуктивності процесу. Основне завдання такої печі – забезпечити ефективне нагрівання металу, зберігаючи при цьому максимальну кількість тепла.

Ці печі мають широке застосування завдяки їхній універсальності: вони можуть працювати в різних режимах та здійснювати різні види термообробки для різних форм і розмірів продукції.

Особливість камерних термічних печей полягає в тому, що завантаження та вивантаження металу здійснюється за допомогою механічних пристроїв, розташованих поза піччю. Це дозволяє уникнути втрати тепла, яка відбувається у печах з викотним подом при завантаженні металу. Однак процес завантаження металу в таку піч складніший через зовнішню механізацію. Зазвичай для завантаження великих печей використовують потужну напільну завантажувальну машину, яка переміщується по рейках вздовж торців ряду печей і обслуговує цей процес [17].

Камерна універсальна піч (рис. 1.1) призначена для термічної обробки в контрольованій атмосфері. Піч складається із трьох основних частин: камери нагрівання, гартівного бака й завантажувального тамбура.

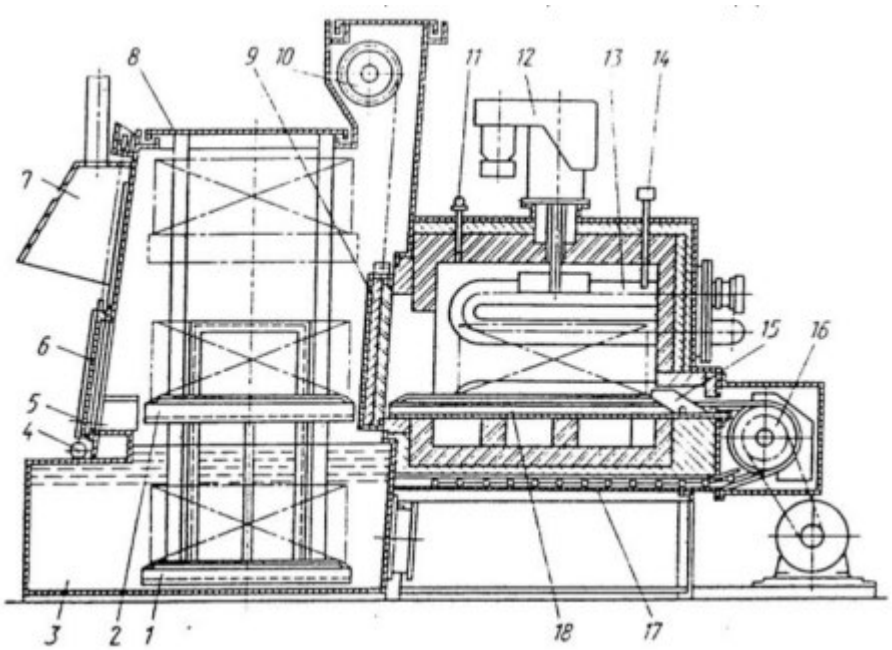


Рисунок 1.1 – Камерна універсальна піч [26]

Основними недоліками термічних печей є:

– нерівномірність нагріву по об’єму завантаження, особливо при низькотемпературних режимах термічної обробки та режимах технологічної витримки, де допустима нерівномірність нагріву не перевищує 0°С;

– відсутність надійного автоматичного управління в широкому діапазоні зміни температурних режимів (300…1250 °С);

– підвищені витрати палива на одиницю продукції;

– низька ефективність використання палива;

– низький коефіцієнт корисної дії.

Сучасні термічні печі відрізняються за конструкцією (камера з нерухомим або рухомим подом, тунельні, ротаційні тощо) та за принципом нагріву (газове, електричне, індукційне). Вони мають відповідати сучасним вимогам розвитку технології теплової обробки сталі, тобто бути енергоефективними, з використанням вдосконаленних теплоізоляційних матеріалів, розробкою нових пальникових пристроїв і застосуванням

математичного моделювання для оптимізації процесів нагріву та охолодження.

Для того, щоб термічні печі відповідали висунутим до них вимогам, необхідно вдосконалити як конструктивні елементи печі, так і способи обігріву, що значно розширить можливості термічних печей, підвищить їх продуктивність і покращить якість теплової обробки.

На сучасному етапі розвитку техніки управління роботою термічних печей умовно можна поділити на три рівні:

– локальні системи управління параметрами теплового режиму;

– комплексні системи управління тепловим і технологічним режимом із використанням математичних моделей;

– управління ділянкою термічних печей.

1.2 Пальникові пристрої термічних печей

Для задоволення високих вимог до якості продукції впроваджуються принципово нові або корінним чином вдосконалюються існуючі печні агрегати. Системи обігріву термічних печей та автоматизовані системи управління виробництвом значною мірою визначають дотримання технології, економічності та зручності експлуатації. Одним з основних пристроїв системи обігріву печі є пальниковий пристрій [9].

На промислових печах основних паливоспоживаючих підприємств чорної металургії експлуатується більше 60 тисяч пальникових пристроїв різної конструкції та теплової потужності. З них понад 75 % пальників працюють на природному газі, решта розраховані на спалювання попутних газів металургійного виробництва, а також їх сумішей з різним співвідношенням складу і теплоти згоряння [10].

У кінетичних пальниках забезпечується хороше перемішування газу з усією необхідною кількістю повітря, спалювання з мінімальним

надлишком повітря в короткому малосвітному факелі. Недоліком є можливість пропуску полум'я та збільшені габарити пальників [11].

У дифузійних пальниках газ і повітря змішуються за межами пальникового пристрою, що ускладнює достатнє змішування газу і повітря та призводить до необхідності працювати з підвищеним коефіцієнтом витрати повітря.

У пальниках часткового попереднього змішування здійснюється добре перемішування газу з частиною необхідного для згоряння повітря (первинного), а додаткове подавання решти повітря (вторинного) до кореня факела [12].

Поширені в чорній металургії пальники типу «трубка в трубці», що створюють дифузійний факел, мають вузький діапазон регулювання за тепловою потужністю та коефіцієнтом витрати повітря. При збільшенні коефіцієнта витрати повітря до 1,35–1,5 відбувається відрив факела, що виключає ступінчасту зміну витрати палива і повітря, тому для експлуатації цих пальників на печах необхідно встановлювати системи контролю факела і запалювальні пристрої [13].

Для покращення змішування палива та повітря були розроблені пальники для природного газу низького тиску типу ГНП (рис. 1.2).

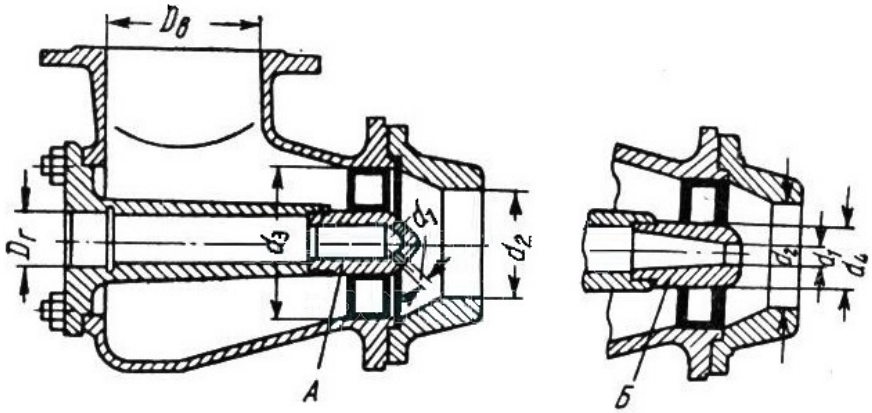


Рисунок 1.2 – Пальник типу ГНП

Пальники цього типу широко використовуються на нагрівальних і термічних печах, сушарках і пристроях низькотемпературного обігріву в

металургійній промисловості та машинобудуванні. Стабільна робота пальників гарантована на природному газі в межах зміни теплової потужності 1:8 та коефіцієнті витрати повітря 1,05-1,15 [10]. Вказані межі зміни теплової потужності та коефіцієнта витрати повітря, а також робота на одному виді палива суттєво обмежують діапазон використання пальників, особливо на камерних печах металургійних заводів. В умовах зміни калорійності палива та через інерційність системи співвідношення «паливо-повітря» пальники можуть вийти з робочого режиму або взагалі не запалитися.

Розглянуті недоліки пальників ГНП не дозволяють ефективно управляти тепло-масообмінними процесами при змінному температурному режимі в камерних печах, а також при зміні швидкості переміщення заготовок у прохідних печах. Це призводить до зниження якості нагріваного металу, збільшення питомої витрати палива, обмеження продуктивності печі та скорочення області використання пальників по теплотворній здатності палива [10].

Для усунення перерахованих недоліків пальників на базі ГНП розроблений новий пальник з перфорованою донною та боковою поверхнею газового сопла ГНПЗп. При максимальних витратах обох компонентів горіння перетік повітря через бічні отвори всередину наконечника здійснюється завдяки інжекційним властивостям газових струменів, швидкість яких вища за швидкість повітряного потоку, та наявності вільного простору між ними. Для покращення змішування палива і повітря на виході на внутрішній поверхні наконечника встановлені розсікачи.

Використання пальників ГНПЗп на термічних і нагрівальних печах дозволило забезпечити стійку роботу на будь-якому температурному рівні робочої камери при зміні теплової потужності в діапазоні 1:25 і коефіцієнті витрати повітря 1:5. Однак практика тривалої експлуатації на термічних печах з зовнішньою механізацією, камерних і двокамерних печах показала,

що неможливо їх тривала експлуатація при використанні штучних та пилуватих газів, наприклад, коксового газу і його сумішей з природним газом через небезпеку заростання отворів перфорованої перегородки високомолекулярними вуглецевими сполуками [12].

Вдосконаленню роботи різних типів пальникових пристроїв присвячено багато наукових робіт, багато з яких суттєво покращили роботу металургійного виробництва [13, 15].

Пальники «трубка в трубці», які застосовуються в термічному цеху заводу «Дніпроспецсталь», не дозволяють реалізувати на них сучасну технологію імпульсного обігріву. Оскільки ці пальники працюють у порівняно вузькому діапазоні зміни теплових потужностей, не представляється можливим реалізація технології термообробки на одній і тій самій печі низькотемпературних та високотемпературних режимів. Тому в цеху для реалізації цієї задачі застосовуються низькотемпературні та високотемпературні печі. Оскільки низькотемпературне нагрівання застосовується в цеху періодично, тому основну частину часу ці печі працюють в холосту, марно спалюючи паливо. Через це відбуваються значні втрати тепла.

В останні роки розроблені та впроваджені в виробництво пальники ЧПС (часткового попереднього змішування) на базі пальників «трубка в трубці». Але для реалізації роботи різних металургійних нагрівальних агрегатів пальників ЧПС недостатньо.

У зв’язку з цим виникла необхідність розробки надійних пальникових пристроїв, що відповідають технологічним режимам у термічних печах і відповідають поставленим вимогам.

1.3 Режими опалення в термічних пічах

Підтримування раціональних режимів нагріву металу, що забезпечують мінімальні енергозатрати при високій якості вихідної

продукції, вимагає об'єктивної інформації про температуру поверхні садки металу, яку можна отримати безпосередньо або за допомогою математичної моделі нагріву, яку необхідно коригувати відповідно до істинної температури металу, що нагрівається. Тому існують вимоги до мінімальної різниці між виміряною та істинною температурою і відсутності впливу датчика на результати вимірювання [52]. Різноманіття даних і їх суперечливість свідчать про те, що для кожного конкретного технологічного об'єкта, залежно від його конструкції і продуктивності, можливостей охолодження, складу обладнання, а також сортаменту металу, повинен бути розроблений свій температурний режим нагріву [53…55].

Режими термічної обробки металу в термічних печах характеризуються такими особливостями [53]:

– швидкість підйому температури металу залежно від його сортаменту складає 70 – 200 °С/год;

– тривалість витримки при заданій температурі встановлюється залежно від маси садки в печі;

– температура нагріваного металу в процесі термообробки контролюється термоелектричними перетворювачами (термопарами), розташованими на відстані 200 – 250 мм;

– початок витримки відліковується при досягненні потрібної температури на всіх печних термопарах, розбіжності допускаються не більше ніж 10 °С;

– допускаються відхилення від заданих параметрів: за температурою (термопари у нагріваного металу) – не більше 10 °С;за тривалістю витримки – не більше 5 хвилин; за швидкістю охолодження – 10 °С/год.

Режими термообробки класифікуються по групах (в режимних картах термічного відділення) залежно від марки сталі, профілю металу, виду термообробки, температури витримки, кількості періодів

термообробки (підйом температури, витримка, охолодження), способів охолодження металу.

Сутність стратегії розробки і впровадження раціональних температурних режимів роботи нагрівальних печей полягає у:

– визначенні динаміки нагріву заготовок у печі з урахуванням фізичного стану для збору вихідного матеріалу, необхідного для адекватності математичної моделі до реального об'єкта;

– в математичному моделюванні процесу нагріву в термічній печі різних вихідних заготовок при різній продуктивності печі;

– у виборі таких температурно-теплових режимів роботи печі, які повинні забезпечувати в усьому діапазоні зміни продуктивності печі і необхідну якість нагріву (кінцеву середньомасову температуру і перепад по перерізу), а також мінімальну витрату палива і найменший брак (окалиноутворення, недопал садки тощо) [16].

На стадії промислового випробування і впровадження нових режимів для кожного типорозміру і сортаменту вихідної заготовки встановлюються необхідні температури в зонах камери печі, визначається теплове навантаження, яке забезпечує заданий ритм роботи печі. Після цього проводяться порівняння питомих витрат палива до і після впровадження диференційованих по продуктивності режимів і визначається їх ефективність.

Удосконалення систем автоматичного управління з використанням математичних моделей оптимізації питомої витрати палива повинно забезпечувати раціональний нагрів металу при максимальній продуктивності печі, потужності пальникових пристроїв, що працюють на різних видах і сумішах газоподібного палива з безперервною або імпульсною подачею, враховуючи при цьому всі особливості режимів термообробки [17].

Нерівномірний нагрів часто призводить до місцевого перегріву та перегоряння металу, вимагає збільшення тривалості витримки, що знижує ефективність використання палива та продуктивність печі.

Одним із шляхів вирішення проблеми рівномірності нагріву є застосування циклічних способів обігріву, заснованих на періодичній зміні тепломасообмінних процесів у робочому просторі печі. Циклічні способи обігріву поділяються на гармонійні та імпульсні. Тривалість часу циклу залежить від властивостей металу, необхідної інтенсивності впливу, конструкції печі, схеми обігрівальних систем та багатьох інших факторів. Тривалість може змінюватися від часток секунди до кількох хвилин.

Для імпульсного обігріву термічних печей актуальним є розробка надійних пальникових пристроїв з розширеним діапазоном регулювання по тепловій потужності, видам і сумішам палива та коефіцієнту витрати палива. Не вирішене питання стабільної роботи системи при використанні електричних виконавчих механізмів. Існуючі технічні розробки базувались на експериментальному визначенні тривалості імпульсу, яке підходить лише для конкретного об'єкта дослідження.

1.4Постановка задачі

Результати аналізу досліджень роботи термічних печей показали, що вузький діапазон зміни теплової потужності та коефіцієнта витрати повітря існуючих двопровідних пальників типу «трубка в трубці» та ГНП, які застосовують до 40 % термічних печей, ускладнює їх обслуговування і виключає впровадження прогресивних способів обігріву. Виникла необхідність розробки надійних пальникових пристроїв з стійким факелом при безперервному та імпульсному обігріві печі і широкими межами регулювання за тепловою потужністю та коефіцієнтом витрати повітря при використанні різних газоподібних палив.

Виходячи з наведених недоліків нагріву металу в термічних печах, а

також оцінки їх роботи, виникає необхідність розробки методів і пристроїв теплової обробки сталі. За допомогою статичної ідентифікації та активного теоретичного експерименту на математичних моделях в кваліфікаційній роботі магістра необхідно дослідити теплові режими нагріву металу з метою економії палива та покращення якості теплової обробки.

Використання сучасних методів моделювання та сучасної техніки дозволить забезпечити рішення задач покращення якості теплової обробки металу в термічних печах з метою економії витрат палива.

Наведені методи використання імпульсного обігріву на різних нагрівальних печах були отримані експериментальним шляхом і, відповідно, застосовні лише для конкретного об'єкта дослідження. Для термічних печей необхідно вибрати надійну систему автоматичного регулювання при імпульсному способі обігріву.

Для широкого поширення на термічних печах імпульсного обігріву необхідно розробити методику для визначення тривалості імпульсів, яка може бути застосовна не тільки для об'єкта дослідження, але й на інших печах, а також дозволить вирішити задачу управління тепловим режимом в період витримки при імпульсному обігріві.

*Висновки.*У першому розділі ВКР розглянуто основні проблеми і недоліки теплової обробки сталі в термічних печах, зокрема неравномірність нагріву металу, низька ефективність використання палива і обмежений діапазон регулювання теплової потужності існуючих пальників. Аналіз режимів опалення в термічних печах показує необхідність розробки нових методів і пристроїв для покращення теплообміну та управління температурним режимом у печах, зокрема через впровадження імпульсного обігріву. Для досягнення цієї мети важливо використовувати сучасні методи моделювання і автоматизації. Крім того, необхідно створити універсальні пальники з широкими можливостями регулювання і підвищеною ефективністю.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ПО ШИРИНІ ПЕЧІ

2.1 Короткий огляд теоретичних робіт з розв'язання задач теплообміну в термічних печах

Процеси теплообміну в матеріалі, що нагрівається, широко поширені на всіх етапах металургійного та машинобудівного виробництва, зокрема під час термічної обробки металу в термічних печах.

Розв’язання задачі теплообміну багатьма авторами розглядалося як модель теплообміну в шарі для високотемпературних агрегатів, у яких передача тепла від теплоносія здійснюється за допомогою випромінювальної або конвективно-випромінювальної тепловіддачі [8, 18].

Більшість відомих задач теплообміну відрізняються великою складністю, особливо при розв’язанні нестаціонарних двовимірних і тривимірних задач [19, 20]. Для вирішення застосовувалися різні припущення або спрощення поставлених задач: нагрівання тонких або масивних тіл; класифікація джерел тепла як доданків джерела під час лінеаризації рівняння теплопровідності; розгляд температури в шарі у часі за відомого розподілу по перерізу; нагрівання тіл правильної форми (пластина, циліндр, куля); прості крайові умови [8].

У роботах, присвячених застосуванню при розв’язанні задач теплопровідності різницевих схем, використовується числовий метод кінцевих різниць [8, 18, 19, 20]. Характерною особливістю цього методу є його неоднозначність, яка дає свободу вибору параметрів різницевої схеми, що визначають задану за умовою точність розв’язання поставленої задачі. Такими параметрами є кроки за координатою і часом, а також ступінь неявності системи різницевих рівнянь. Цей метод дозволяє

максимально використовувати можливості ЕОМ за мінімального обсягу пам’яті.

Алгоритми кінцево-різницевих схем розрахунку теплообміну базуються на наближеному розрахунку температурних полів, у яких диференціальні рівняння в часткових похідних зводяться до лінійного вигляду. Тут величезну роль відіграє тип теплового джерела: точкове, лінійне або площинне. Цей метод застосовувався багатьма авторами для розв’язання задач теплопровідності для різних високотемпературних нагрівальних агрегатів [19, 20, 21].

Метод дискретного аналога передбачає використання [22, 23] кінцево-різницевих схем із врахуванням функції джерела тепла, а також визначення неявності різницевої схеми.

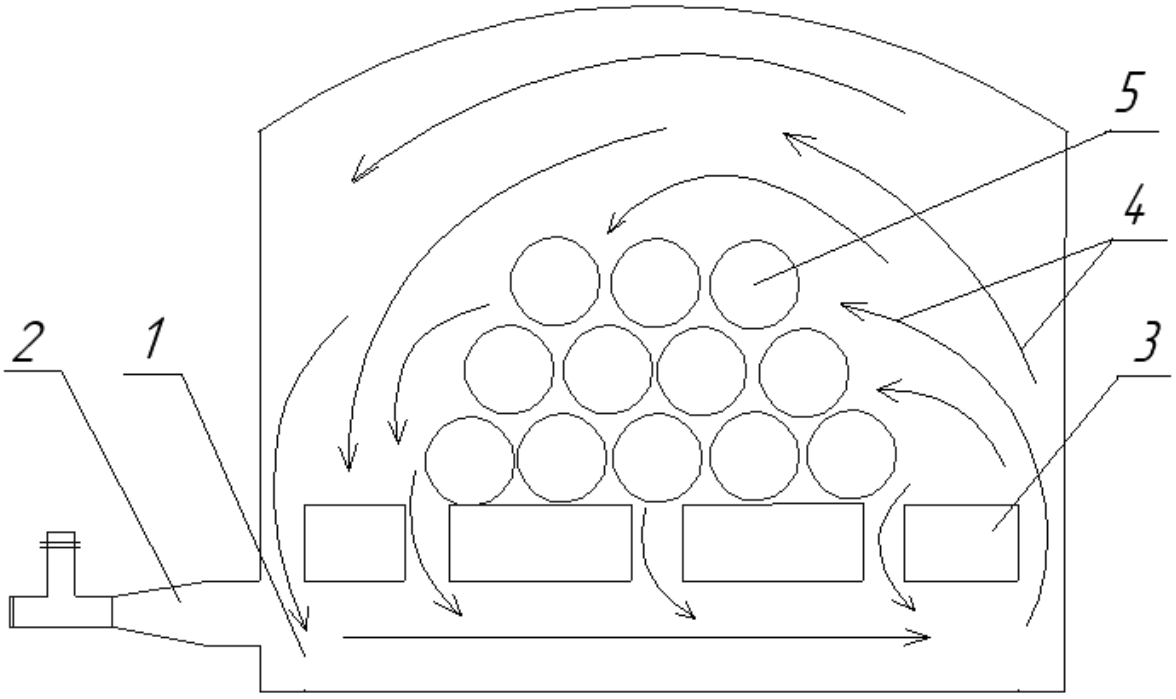
Результати розв’язання, отримані в деяких роботах, складні для практичного використання. Під час розв’язання нестаціонарних багатовимірних задач теплопровідності раціональним є застосування наближених аналітичних методів і числових методів, що дозволяють поєднувати досвід попередніх авторів із новими наближеними розв’язаннями в поставленій задачі.

2.2. Постановка задачі моделювання теплової обробки металу в термічних печах

Під час математичного моделювання теплового режиму нагрівання металу в термічних печах основними блоками моделі є тепловий баланс, рівняння теплопровідності, рівняння теплопередачі. У більшості математичних моделей, присвячених визначенню температури металу, що нагрівається, та оптимізації витрат палива, для розв’язання застосовуються чисельно-аналітичні методи, які дозволяють вирішувати поставлену задачу з мінімально можливими похибками результатів [8].

У багатьох дослідженнях розв’язання задачі розподілу температури по перерізу нагріваного садку в камерних печах із нерухомим подом температура нагрівального середовища приймається постійною за шириною печі та розраховується лише її зміна в часі. Однією з найпоширеніших проблем теплового технологічного режиму є мінімізація перепаду температури по перерізу металу. У випадку, коли нагріваний метал укладений у декілька шарів – багаторядний сад, – до вищезазначеної проблеми додається проблема рівномірного розподілу температури не лише по перерізу металу, а й між окремими елементами саду. Тому актуальним є розгляд питання визначення перепаду температури нагрівального середовища за шириною печі.

На рис. 2.1 схематично показано, як продукти згоряння надходять до нагріваного садку.



1 – підподова топка; 2 – пальниковий пристрій; 3 – подпечі;
4 – напрямок руху продуктів згоряння; 5 – багатошаровий сад металу

Рисунок 2.1 – Схема камерної печі з нерухомим подом

Оскільки камерна піч – це піч із нерухомим подом, а продукти згоряння від пальника надходять не безпосередньо на нагріваний метал, а спочатку перебувають у підподовій топці, то завдяки рециркуляції продуктів згоряння у робочому просторі печі в підподовій топці здійснюється змішування продуктів згоряння у печі з тими, що надходять від пальника. Це означає, що температурне поле нагрівального середовища важливо розглядати в перерізі печі за двома просторовими координатами (ширина і висота печі), оскільки за третьою координатою – довжиною печі – температура буде однаковою в будь-який момент часу в кожній точці по всій довжині печі.

Важливо розрахувати температурне поле за шириною печі, яке буде відображати зміну температури в перерізі. Оскільки сад металу багаторядний, виникає задача рівномірного розподілу температури у робочому просторі печі.

У роботі наведена задача технологічно вирішувалася за допомогою розроблених пальникових пристроїв, експлуатація яких дозволяє змінювати коефіцієнт витрати повітря у широких межах, що, своєю чергою, зменшує перепад температури за шириною печі та сумарну витрату газоподібного палива на піч.

2.3. Математичне моделювання поля температур у робочому просторі печі

Теоретичні дослідження, наведені у роботі, ґрунтуються на визначенні температурного поля нагрівального середовища. Як керуючий вплив використовується коефіцієнт витрати повітря. За цих умов необхідно визначити розподіл температури за шириною печі, що безпосередньо впливає на розподіл температури по перерізу нагрітих заготовок, час періоду нагріву до заданої температури витримки та періоду витримки, а також на сумарну витрату палива на піч [3-7, 20-21].

У розв’язанні поставленої задачі було використано наступне: розрахунок горіння палива, рівняння теплового балансу, рівняння теплопровідності при зовнішньому теплообміні за граничних умов III роду. Для вирішення задачі застосовувався кінцево-різницевий метод при визначенні поля температур у робочому просторі печі, враховувалося вплив коефіцієнта витрати повітря на граничні умови задачі, тепловий баланс для визначення витрати палива як функції часу.

Відповідно до принципів модульного програмування та поетапної розробки алгоритму теоретичні дослідження були представлені у вигляді сукупності модулів із подальшою деталізацією взаємозв’язків. Такий підхід дозволив розглянути окремі частини задачі моделювання, не втрачаючи цілісного уявлення про всю математичну модель. При цьому вхідні та вихідні параметри описувалися блоками:

– «характеристика садки металу»;
– «параметри газоподібного палива»;
– «характеристики термічної печі»;
– «режим термообробки»;
– «розрахунок горіння палива»;
– «розподіл температури за шириною печі»;
– «час термообробки»;
– «температурний режим нагріву металу»;
– «витрата палива як функція часу для двостадійного режиму».

2.4 Теоретичний експеримент

Етапи теоретичного експерименту:

– розрахунок об’єму продуктів згоряння палива залежно від коефіцієнта витрати повітря;

– тепловий баланс камерної печі;

– визначення температури нагрівального середовища;

– визначення температурного поля нагрівального середовища у двовимірній системі координат;

– розрахунок нагріву металу в період підйому температури та в період витримки;

– визначення сумарної об'ємної витрати палива як функції часу залежно від температури нагрівального середовища.

Розрахунок об'єму продуктів згоряння.

Оскільки в камерних печах переважно використовують суміші палива, у моделі застосовувався розрахунок суміші, що складається з двох газів (природно-доменна або коксо-доменна суміш). За відомим складом газоподібного палива, вологістю палива, кількістю повітря для горіння та коефіцієнтом витрати повітря визначався об'єм продуктів згоряння.

Частка першого газу у змішаному паливі становить XXX, частка другого газу – *(1-X)*. За знайденою теплотою згоряння суміші визначалася частка першого та другого газу у суміші:

$$X = \frac{Q_{н1}^{p} - Q_{нсм}^{p}}{Q_{н1}^{p} - Q_{н2}^{p}}, \qquad (2.1)$$

де $Q_{н1}^{p}, Q_{н2}^{p}, Q_{нсм}^{p}$ – теплота згоряння 1, 2 і змішаного газу відповідно, МДж/м³.

$$Q_{н}^{p} = 127{,}7 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 234 \cdot H_2S + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 + \\ + 555 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12}; \qquad (2.2)$$

Склад змішаного газу визначався за співвідношенням (на прикладі CO, для інших компонентів газу аналогічно):

$$CO^{(см)} = X \cdot CO^{(1)} + (1 - X) \cdot CO^{(2)} \qquad (2.3)$$

Кількість повітря для горіння, м³/м³:

$$L_0 = \frac{0,01}{0,21}\left[0,5 \cdot CO + \sum\left(n + \frac{m}{4}\right) \cdot C_n H_m + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 H_2 S - O_2\right] \qquad (2.4)$$

Хімічний склад диму, м³/м³:

$$\begin{cases} V_{CO_2} = 0,01\left(CO + \sum nC_n H_m + CO_2\right); \\ V_{H_2O} = 0,01\left(\sum \frac{m}{2} C_n H_m + H_2 + H_2 S + H_2 O\right); \\ V_{SO_2} = 0,01\left(H_2 S + SO_2\right); \\ V_{N_2} = 0,01\left(N_2 + 79 \cdot L_0 \cdot \alpha_в\right); \\ V_{O_2} = 0,01\left(O_2 + 21 \cdot L_0 \cdot \left(\alpha_в - 1\right)\right); \end{cases} \qquad (2.5)$$

де $\alpha_в$ – де коефіцієнт витрати повітря.

Об'єм продуктів згоряння, м³/м³:

$$V_д = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}. \qquad (2.6)$$

Підставляючи (2.4) і (2.5) в (2.6), була отримана залежність об'єму продуктів згоряння від коефіцієнта витрати повітря:

$$V_д = A^* + L_0 \cdot \alpha_в, \qquad (2.7)$$

де A^* – коефіцієнт, необхідний для спрощення виразу.

$$A^* = 0,01(CO + CO_2 + \sum nC_n H_m + \sum \frac{m}{2} C_n H_m + H_2 + 2 \cdot H_2 S + \\ + H_2 O + SO_2 + N_2 + O_2 - 21 \cdot L_0). \qquad (2.8)$$

З рівняння (2.7) можна зробити висновок, що залежність об'єму продуктів згоряння від коефіцієнта витрати повітря лінійна.

Тепловий баланс термічної камерної печі.

Рівняння теплового балансу [75], з урахуванням основних статей надходження та витрати тепла:

$$B\left(Q_н^р + c_г t_г + L_0 \alpha_в i_в\right)\tau = c_м G\left(t_к - t_н\right) + \sum G_{кл}\left(c_0^к t_к - c_0^н t_н\right) + B c_д t_д \tau + Q_п \quad (2.9)$$

де B – об'ємна витрата палива за одиницю часу, м³/с;

$Q_н^р$ – теплота згоряння палива, кДж/м³;

$c_г$ – середня об'ємна теплоємність газу, кДж/м³·К;

$t_г$ – температура газу, °С;

$i_в$ – ентальпія 1 м³ повітря при температурі повітря, кДж/м³;

τ – проміжок часу, с;

G – маса садки металу, кг;

$c_м$ – молекулярна теплоємність металу, кДж/кг·К;

$c_д$ – об'ємна теплоємність відхідних газів, кДж/м³·К;

$t_д$ – температура відхідних газів, °С;

$G_{кл}$ – маса кладки, кг;

$c_0^к$, $c_0^н$ – середні молекулярні теплоємності матеріалу шару кладки, кДж/(кг·К);

$t_к$, $t_н$ – середні температури кладки в кінці та на початку нагріву, °С;

$Q_п$ – не враховані втрати, кДж.

В результаті огляду публікацій, присвячених розрахунку теплового балансу в термічних печах, можна зробити висновок, що за результатами розрахунку теплового балансу в печі визначаються різні показники печі: витрата палива, температура газів, втрати при нагріванні.

Значення величин $i_в, c_г, c_д, c_0^к, c_0^н$ визначалися за довідковими даними [75]. Неврахованими додатковими надходженнями тепла і неврахованими втратами можна знехтувати. Тепло, яке віддається у зовнішнє середовище, в розрахунку приймалося мінімально-допустимим, згідно з ККД роботи печі.

З рівняння (2.9) отримана залежність витрати палива від коефіцієнта витрати повітря:

$$B = \frac{c_м G(t_к - t_н) + \sum G_{кл}(c_0^к t_к - c_0^н t_н)}{\left(Q_н^р + c_г t_г + L_0 \cdot \alpha_в \cdot i_в\right)\tau - c_д t_д \tau}. \qquad (2.10)$$

Згідно з отриманою залежністю, припущено, що при однакових статтях балансу збільшення коефіцієнта витрати повітря призведе до зменшення сумарного об'ємного витрати палива на піч.

З формули (2.10), враховуючи змінну температуру з часом, отримана залежність сумарного витрати палива від температури нагрівальне середовища з часом, що використовувалося далі в розрахунках для отримання результатів та динаміки зміни витрати палива.

Температура продуктів згоряння.

Температура продуктів згоряння залежить від палива, що подається до пальників, від коефіцієнта витрати повітря та об'єму продуктів згоряння.

Залежність температури продуктів згоряння в робочому просторі печі від коефіцієнта витрати повітря визначалася з теплового балансу печі [75]. Вхідні в тепловий баланс величини дозволяли визначити важливі характеристики процесу горіння – теоретичну та балансову температуру горіння [3, 8, 9, 75, 76].

Теоретична температура горіння зазвичай на 20-25 % перевищує максимальну фактичну температуру газів у металургійних печах. Отже, обчисливши її, можна орієнтовно визначити, чи забезпечує отримання необхідної фактичної температури газів це паливо за даних умов його спалювання [75].

Тоді

$$t_д = \frac{Q_н^p + q_T + q_B}{c_д V_д} \ . \qquad (2.11)$$

Підставивши значення тепла палива та повітря, а також об'єму продуктів згоряння, температура продуктів згоряння була отримана наступною:

$$t_д = \frac{Q_н^p + c_г t_г + L_0 \cdot \alpha_в \cdot i_в}{c_д (A^* + L_0 \cdot \alpha_в)} . \qquad (2.12)$$

Згідно з виразом (2.12), температура продуктів згоряння залежить від коефіцієнта витрати повітря і впливає на початковий розподіл температури в робочому просторі печі. Наведений вираз визначає початкові та граничні умови задачі теплопровідності.

Розрахунок нагріву металу в період підйому температури і в період витримки.

Рішення задачі теплопровідності передбачає її постановку з наведенням краєвих умов, а також використання для її вирішення чисельно-аналітичних методів. У роботі наведена методика розрахунку параметрів нагріву металу в термічній камерній печі з нерухомим подом і підподовими топками, розрахунок поля температур при різних коефіцієнтах витрати повітря за допомогою методу кінцевих різниць і широких можливостей ЕОМ.

На рис. 2.1 представлена схема досліджуваної печі з вказівкою контурів напрямку руху продуктів згоряння та розташування нагріваємої многорядної садки.

Для визначення поля температур в робочому просторі печі наведено рівняння теплопровідності.

В часткових похідних воно має вигляд за законом Фур'є:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -div(\lambda \cdot gradt) \qquad (2.13)$$

де c – теплоємність, кДж/кг·К;

ρ – щільність, кг/м³;

t – температура, °С;

τ – час нагріву, с;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К.

Як було доведено вище, задача теплопровідності для термічної камерної печі розглядається в 2-х координатах, у та z. Рівняння теплопровідності в такому випадку приймається:

$$c\rho\frac{\partial t}{\partial \tau}=\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial t}{\partial z}\right) \qquad (2.14)$$

На рис. 2.2 представлена схема до математичної постановки задачі.

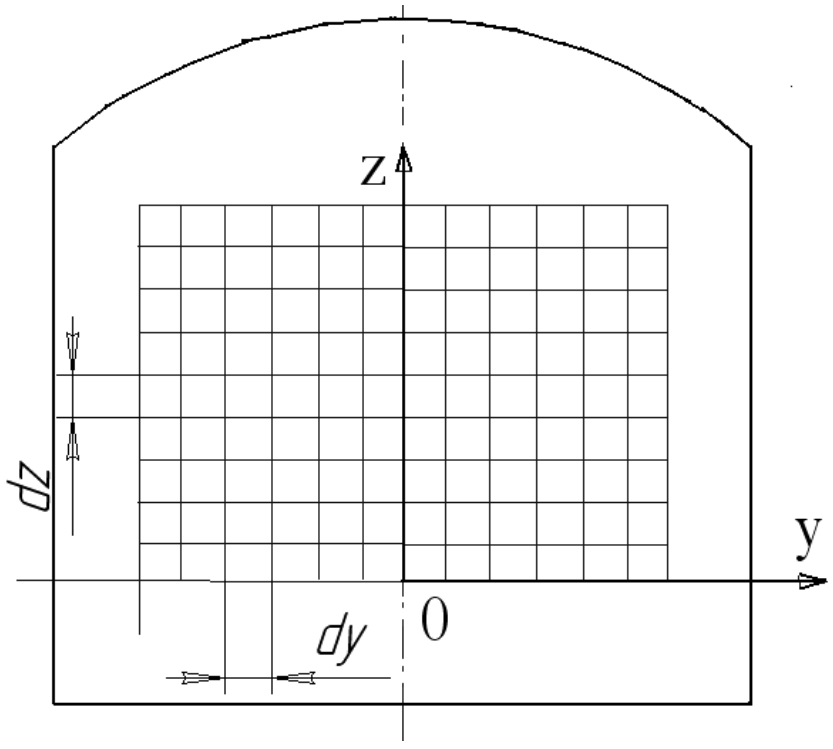


Рисунок 2.2 – К постановке решения задачи теплопроводности

На рисунку показані осі, в напрямку яких досліджується температурне поле. Оскільки піч симетрична за розташуванням многорядної садки металу, початок координат розташований в середині по

ширині печі. Згідно з методом кінцевих різниць, на схемі схематично показано вибір кроку сітки дослідження dy і dz.

Для цієї задачі потрібно записати:

Початкові умови:

$$t(y,z,0) = f(y,z). \tag{2.15}$$

Граничні умови III роду:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha[t_{\partial}(\alpha_{в}) - t(\tau)], \tag{2.16}$$

де α – сумарний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

n – нормаль, що характеризує розподіл температури на площині y, z.

Граничні умови (2.16) для розподілу температури по двовимірній задачі прийняті наступними, згідно з рис. 2.2:

На верхній та боковій поверхнях:

$$-\lambda_y \left.\frac{\partial t_n}{\partial y}\right|_{y=B} = \alpha_{\Sigma y}[t_{\partial.y} - t_{n.y}(\tau)], \tag{2.17}$$

$$-\lambda_z \left.\frac{\partial t_n}{\partial z}\right|_{z=H} = \alpha_{\Sigma z}[t_{\partial.z.} - t_{n.z}(\tau)], \tag{2.18}$$

На лівій та нижній грані:

$$\left.\frac{\partial t_n}{\partial y}\right|_{y=0} = 0, \tag{2.19}$$

$$\left.\frac{\partial t_n}{\partial z}\right|_{z=0} = 0, \tag{2.20}$$

де $\alpha_{\Sigma y}, \alpha_{\Sigma z}$ – сумарний коефіцієнт тепловіддачі по осях y та z, відповідно, Вт/м²·К;

$t_{\partial.y}, t_{\partial.z.}$ – температура продуктів горіння по осях y та z, відповідно, °С;

λ_y, λ_z – коефіцієнт теплопровідності по осях y та z, відповідно, Вт/м·К;

$t_{n.y}, t_{n.z}$ – температура поверхні металу по осях y та z, °С.

Суммарный коэффициент теплоотдачи из уравнения Стефана-Больцмана:

$$\alpha_{\Sigma y} = \frac{q_y}{t_{\partial.y} - t_{n.y}}. \qquad (2.21)$$

Тепловий потік визначався з умовою передачі тепла випромінюванням та 10 % на теплообмін конвекцією.

$$q_y = 1{,}1 \cdot \varepsilon_г \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_{\partial.y}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{n.y}}{100} \right)^4 \right], \qquad (2.22)$$

де 1,1 – коефіцієнт, що враховує 10 % на теплообмін конвекцією;

$\varepsilon_г$ – степінь чорності газу (степінь чорності та кутові коефіцієнти визначалися за методикою з [76]);

C_0 – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, Вт/м²·К⁴.

Для осі z аналогічно.

*Висновки.*У цьому розділі була приведене математичне моделювання процесів теплообміну в термічних печах, зокрема для нагрівання металу в металургійних та машинобудівних виробництвах. Він охоплює методи розв'язання задач теплопровідності, застосування числових методів (кінцевих різниць), постановку задачі моделювання теплової обробки металу.За наведеним розрахунком було визначено розподіл температури по поверхні металу та температури продуктів горіння.

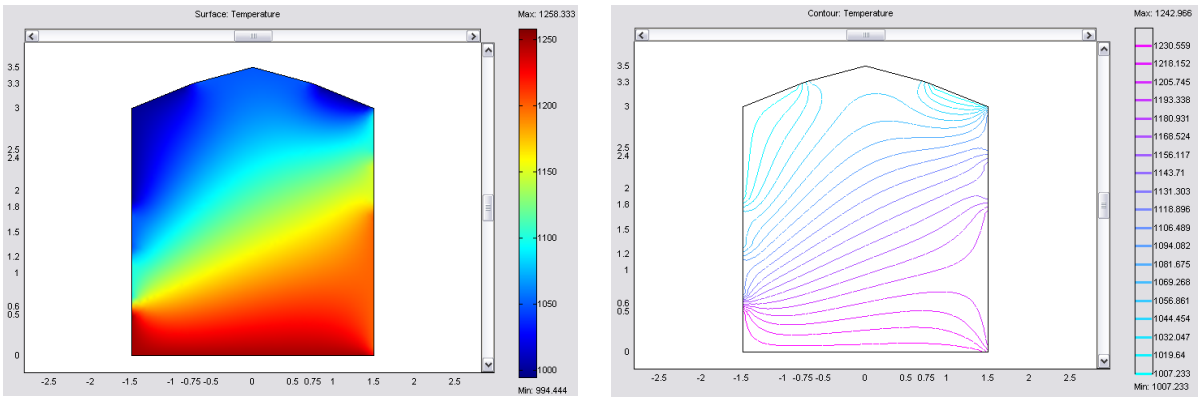
3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ І МОДЕЛЮВАННЯ

3.1 Результаты теоретического эксперимента

Рішення поставленої задачі за допомогою математичного моделювання температурного поля по ширині та висоті здійснюється за допомогою чисельно-аналітичного методу кінцевих різниць, пакету програм Matlab та проєкту Femlab.

На рис. 3.1 – 3.5 представлені результати розрахунку математичної моделі температурного поля залежно від коефіцієнта витрати повітря на наступні моменти часу: початок режиму нагріву (рис. 3.1 при $\alpha_в = 1$ і рис. 3.2 – при $\alpha_в = 2$), кінець режиму нагріву – початок технологічної витримки (рис. 3.2 при $\alpha_в = 1$і рис. 3.3 – при $\alpha_в = 2$), кінець технологічної витримки (рис. 3.4 при $\alpha_в = 1$і рис. 3.5 – при $\alpha_в = 2$).

За результатами розрахунку на рис. 3.1 можна простежити вплив коефіцієнта витрати повітря на температурне поле: на початку нагріву різниці не суттєві, однак на початку та в кінці технологічної витримки при $\alpha_в = 2$ спостерігається більш рівномірний розподіл температури, ніж при $\alpha_в = 1$. Для порівняння результати представлені на одному малюнку для різних моментів часу (рис. 3.6) по осі у – ширина печі.

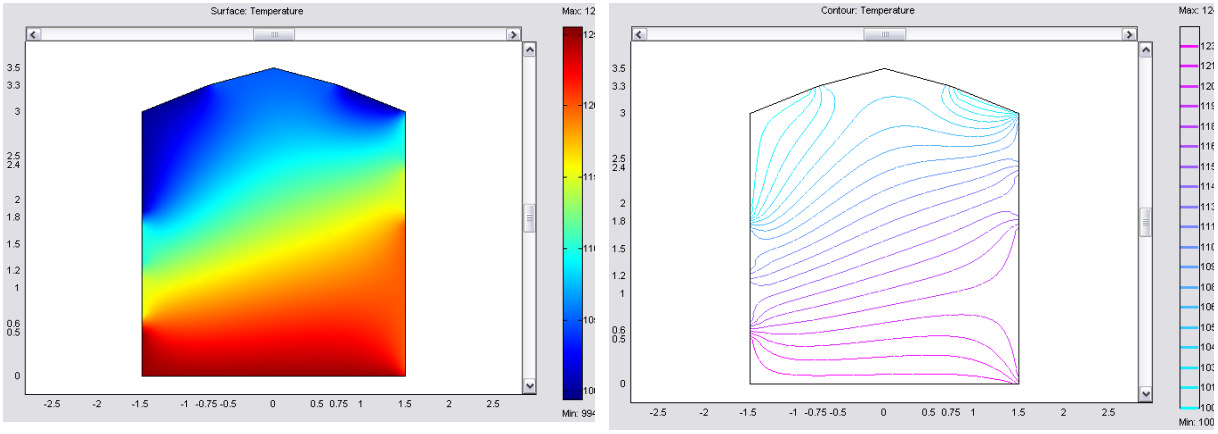


а) б)

Рисунок 3.1 – Початок режиму нагріву при $\alpha_в = 1$:

а) – поле температур, б) – контури розподілу температури

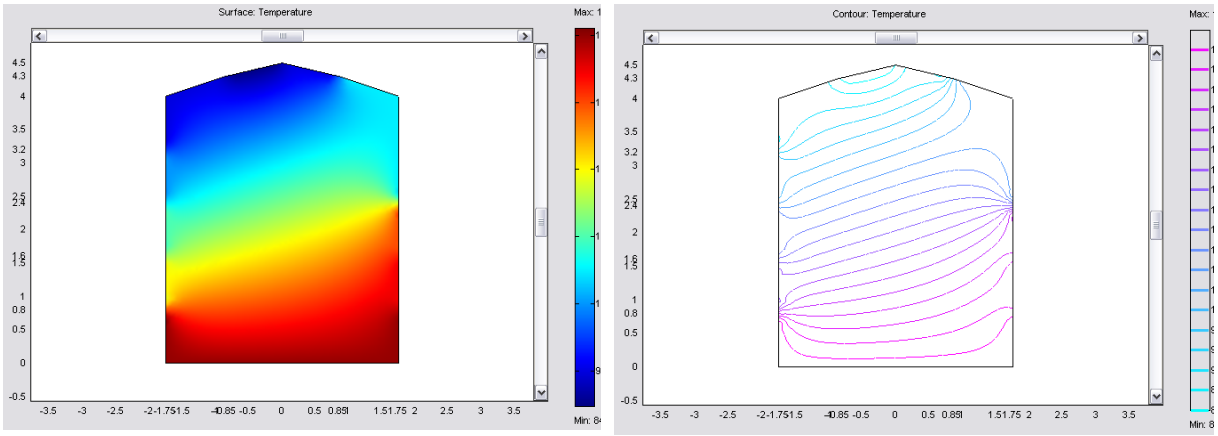
Перепад температури по ширині печі при збільшенні коефіцієнта витрати повітря від 1 до 2 зменшується від 150…200 °С до 20…50 °С в різний час.



а) б)

Рисунок 3.2 – Початок режиму нагріву при$\alpha_в$ = 2:

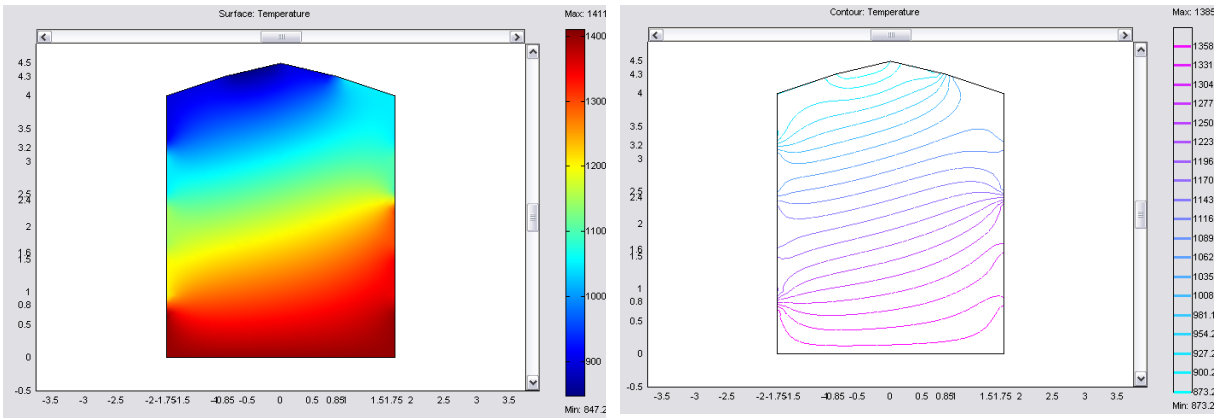
а) – поле температур, б) – контури розподілу температури



а) б)

Рисунок 3.3 – Початок технологічної витримки при$\alpha_в$ = 1:

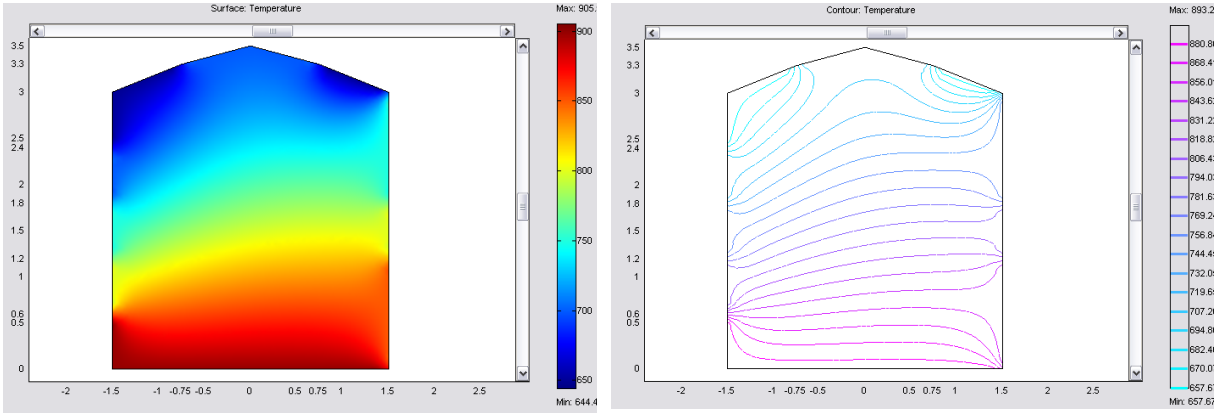
а) – поле температур, б) – контури розподілу температури



а) б)

Рисунок 3.4 – Початок технологічної витримки при$\alpha_в$ = 2:

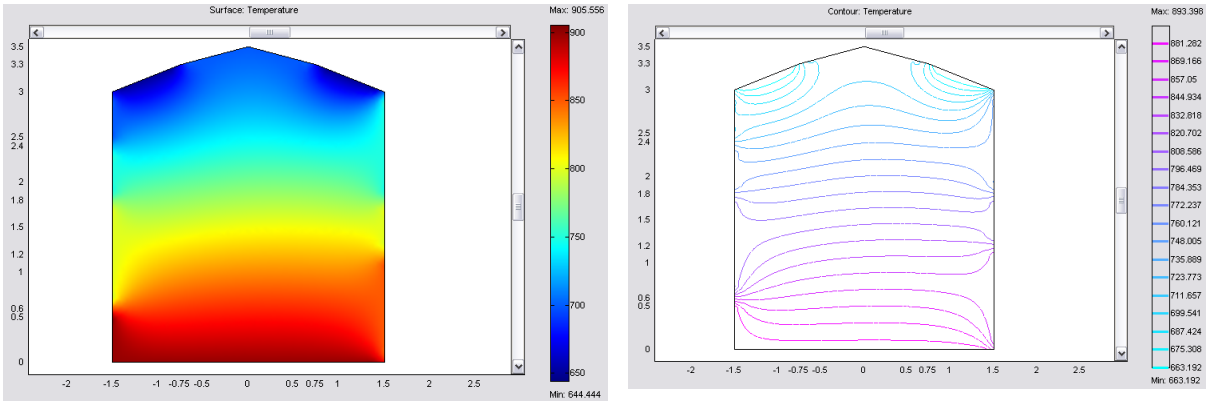
а) – поле температур, б) – контури розподілу температури



а) б)

Рисунок 3.5 – Кінець технологічної витримки при$\alpha_в$ = 1:

а) – поле температур, б) – контури розподілу температури



а) б)

Рисунок 3.6 – Кінець технологічної витримки при$\alpha_в$ = 2:

а) – поле температур, б) – контури розподілу температури

На рисунку 3.7 наведений розподіл температури по ширині печі при різних коефіцієнтах витрати повітря.

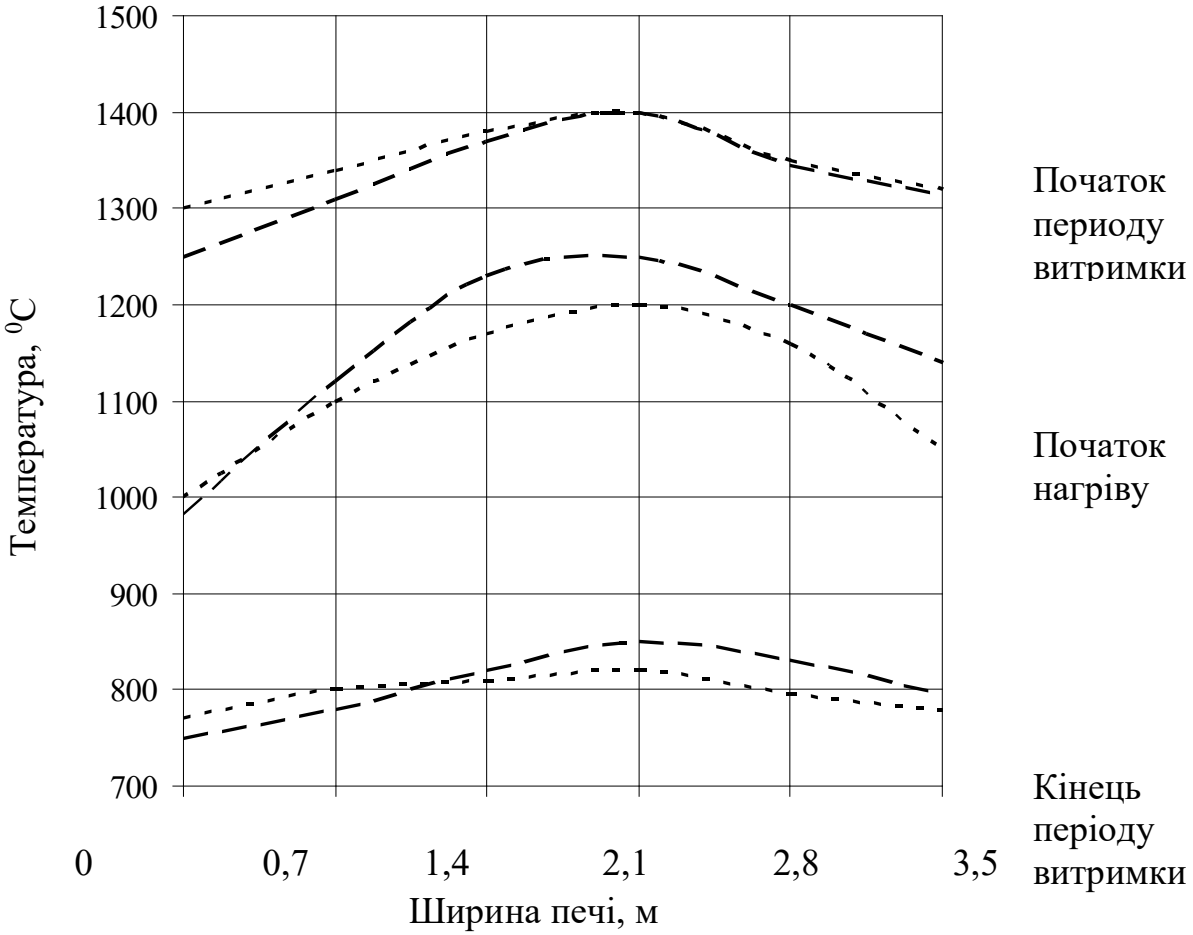


Рисунок 3.7 – Розподіл температури по ширині печі при різних коефіцієнтах витрати повітря:

– – – – $\alpha_в = 1$ $\alpha_в = 2$.....

Для визначення впливу коефіцієнта витрати повітря на обсяг продуктів горіння та витрату пального побудовані залежності перелічених характеристик, у яких коефіцієнт витрати повітря змінювався в тих самих значеннях: 1 і 2 м³/м³.

На рис. 3.8 наведена залежність обсягу продуктів горіння при збільшенні коефіцієнта витрати повітря від 1 до 2. Згідно з рівнянням (2.7), ця залежність лінійна і прямо пропорційна при зміні коефіцієнта витрати повітря.

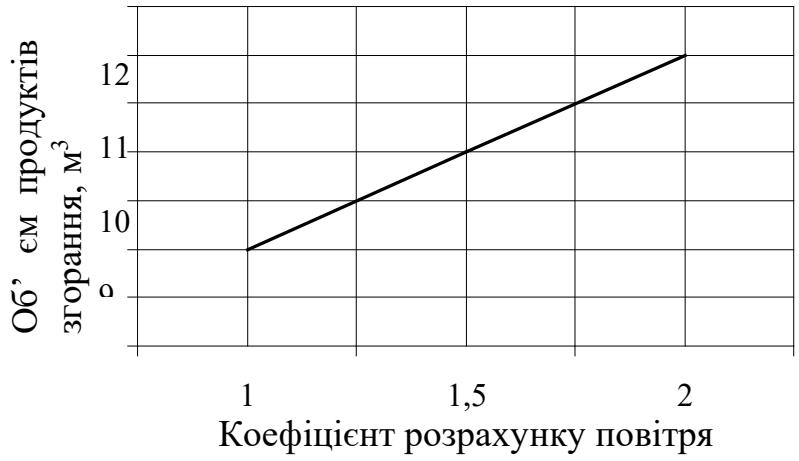


Рисунок 3.8 – Залежність обсягу продуктів горіння від коефіцієнта витрати повітря

На рисунку3.9 наведено результат розрахунків.

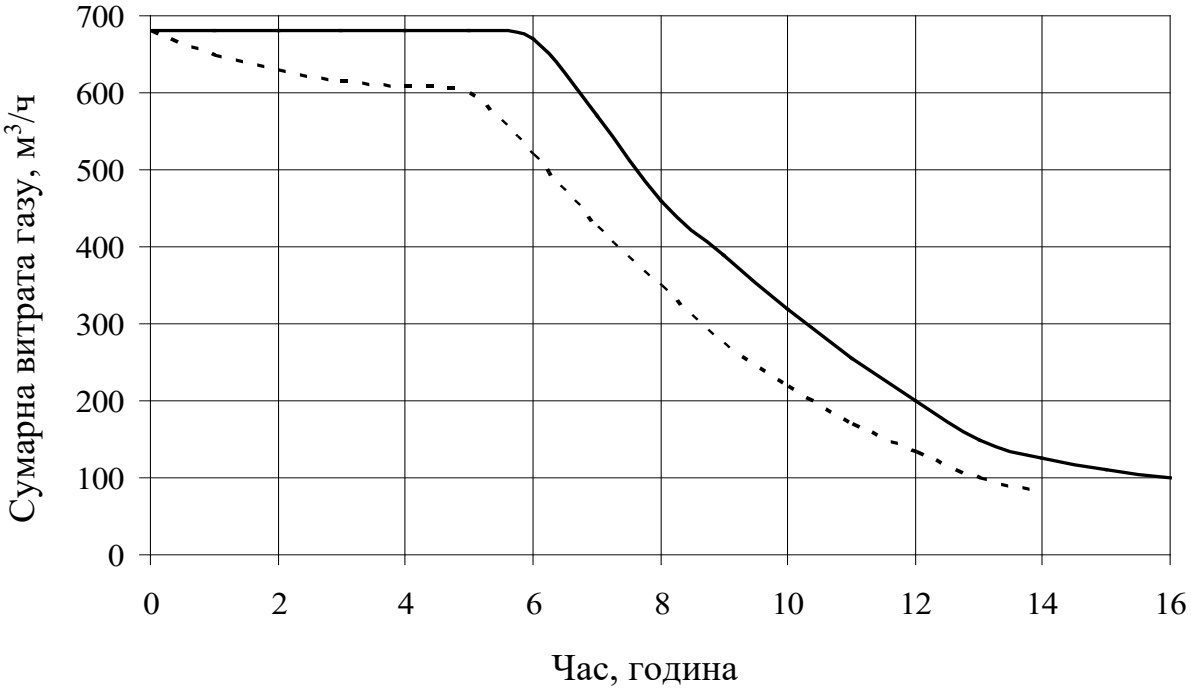


Рисунок 3.9 – Витрати палива при відпалі 760 °С та різних коефіцієнтах витрату палива:

——— $\alpha_в = 1$ ····· $\alpha_в = 2$

Тут представлені значення сумарного витрату повітря при $\alpha_в = 1$ і $\alpha_в = 2$ при максимальному початковому витраті палива 680 м^3/год. У першому випадку при $\alpha_в = 1$ розглядалося практичне випадок, де перший період нагріву – підйом температури – триває 6 годин, період витримки – 10 годин, мінімальне значення витрату палива в кінці теплового режиму становить 100 м^3/год. У другому випадку при $\alpha_в = 2$ витрати палива розраховувалися за запропонованою методикою (2.36) з тими ж початковими даними, що й для першого випадку.

Перший період складав 5 годин, другий – 9 годин, мінімальний витрат – 80 м^3/год. Згідно з рисунком можна зробити висновок, що економія палива при коефіцієнті витрати палива може скласти до 100 м^3/год сумарного витрату палива на піч.

Розрахунок проводився для режиму термообробки відпалу при 860 °С. Маса завантаження металу становила 18 тон. Температура нагрівального середовища досягала максимального значення 1400 °С під час початку періоду витримки.

Результати теоретичного експерименту були підтверджені експериментальним обґрунтуванням залежності температури по ширині печі від коефіцієнта витрати повітря, наведеним у наступному пункті.

Адекватність моделі визначалася за рівнянням регресії за критерієм Фішера за допомогою повного факторного експерименту. Були обрані 4 наступних фактори, за якими проводився факторний експеримент:

- коефіцієнт витрати повітря (межі зміни 1,05 – 1,85);
- кінцева температура нагріву металу (800 – 960 °С);
- маса завантаження (10 – 15 тон);
- час технологічного режиму (14 – 18 годин).

В результаті факторного експерименту після визначення значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії за критерієм Стьюдента було отримано розрахункове значення критерію Фішера, що дозволило зробити висновок,

що математична модель за обраними факторами варіювання адекватна реальному технологічному процесу.

Для забезпечення наведеного режиму роботи, пов'язаного з підвищенням коефіцієнта витрати повітря, у роботі запропоновано практичне рішення цього питання за допомогою використання модернізованого пальникового пристрою, який забезпечить роботу системи автоматизації печі в широкому діапазоні регулювання коефіцієнта витрати повітря.

3.2 Експериментальне обґрунтування залежності температури по ширині печі від коефіцієнта витрати повітря

Для експериментального обґрунтування залежності температури по ширині печі була проведена робота, метою якої було експериментально визначити фактори, що впливають на можливість зменшення перепаду температури нагрівальної середовища в робочому просторі печі.

Експерименти проводилися на вогневому стенді, виконаному у вигляді робочої камери без теплообмінників, що наближає умови до роботи термічних печей. Вимірювали температуру нагрівальної середовища в кількох точках по довжині факела пальника за допомогою встановлених по ширині печі плавких термоелектричних перетворювачів ТХА. Показання температури відображалися на вторинному показуючому та реєструючому приладі КСП-4. В результаті експерименту було визначено, що суттєвий вплив на зменшення перепаду температури нагрівальної середовища має коефіцієнт витрати повітря, оскільки при його збільшенні підвищується обсяг продуктів горіння і покращується змішування нагрівальної середовища, що забезпечує більш рівномірний розподіл температури.

Як видно на рис. 3.10, зміна коефіцієнта витрати повітря в межах 1,02 – 1,25 призводить до незначної зміни температурного режиму в

робочій камері (20 – 25°С). Враховуючи при цьому збільшення об'єму продуктів горіння в робочій камері, перепад температур по ширині печі зменшується при збільшенні коефіцієнта витрати повітря.

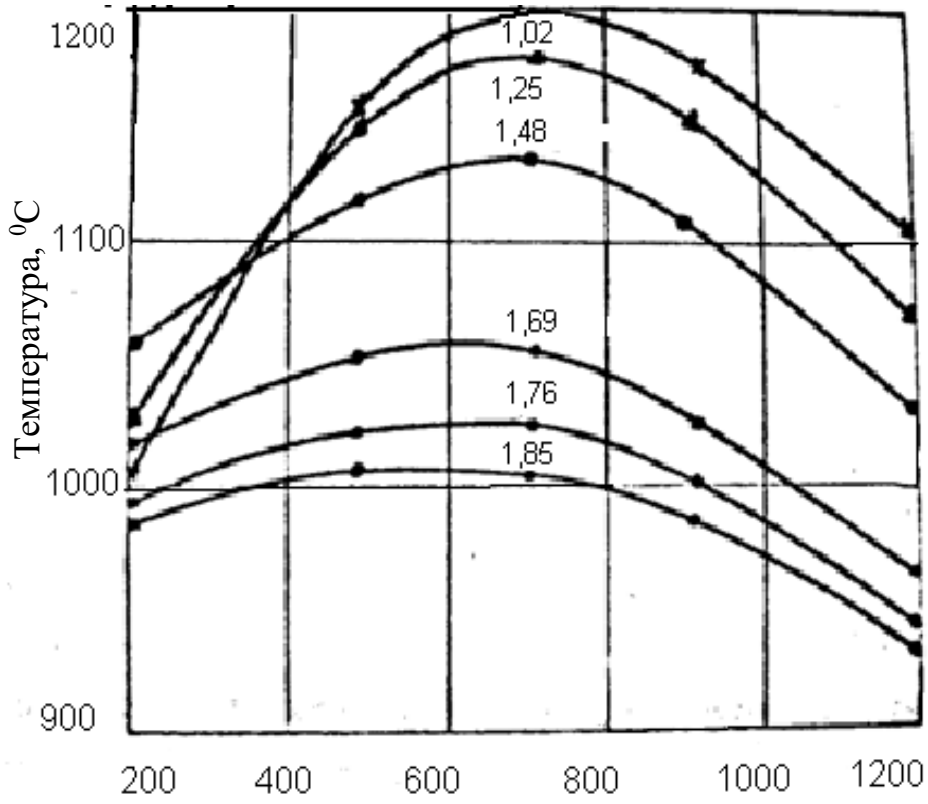


Рисунок 3.10 – Розподіл температур по довжині робочої камери печі для різних значень коефіцієнта витрати повітря

При подальшому збільшенні коефіцієнта витрати повітря до 1,85 зменшується перепад температури по довжині факела з 200°С до 70°С. При збільшенні коефіцієнта витрати повітря до 2 цей перепад буде ще меншим. Збільшення коефіцієнта витрати повітря знижує температуру продуктів горіння і одночасно збільшує їх об'єм. Це призводить до збільшення швидкості руху продуктів горіння, що забезпечує прискорений процес передачі тепла металу, що нагрівається, по ширині печі. Однак суттєве збільшення коефіцієнта витрати повітря порушує хід технологічного

процесу, і режими нагріву не відповідають параметрам технологічних інструкцій. Оптимальні значення коефіцієнта витрати повітря були отримані в межах від 1 до 2.

Висновки.

1. Розроблена математична модель температурного поля в термічній камерній печі з підподовими топками та нерухомим подом, яка дозволяє вибирати економічний режим їх опалення, знижуючи витрату палива, шляхом збільшення коефіцієнта витрати повітря.

2. Результати теоретичного експерименту показали, що збільшення коефіцієнта витрати повітря з 1 до 2 дозволить збільшити об'єм продуктів горіння в робочому просторі печі, зменшити перепад температури по ширині печі протягом всього технологічного режиму з 150…200°С до 20…50°С у різний час, незначно скоротити час теплової обробки металу в період підйому температури та в період технологічної витримки, скоротити сумарний витрат палива на піч до 100 м³/ч.

3. Представлена математична модель адекватна реальному технологічному процесу нагріву металу в термічних камерних печах з нерухомим подом та підподовими топками.

4. Результати роботи були підтверджені експериментальними дослідженнями, за результатами яких було отримано, що збільшення коефіцієнта витрати повітря зменшує перепад температури нагрівальної середовища по ширині печі.

4 УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ОПАЛЕННЯ

Методи імпульсного опалення впроваджувалися на різних конструкціях печей. Результати експериментів і тривалої експлуатації на рекуперативних нагрівальних колодцях і методичних печах показали, що імпульсне опалення забезпечує скорочення витрат палива, тривалості нагріву та браку за нагрівом металу. Наприклад, на заводі «Дніпроспецсталь» після впровадження такої системи на всіх нагрівальних колодцях протягом 10 років не було випадків виникнення браку за нагрівом.

4.1 Вибір раціональної системи управління тепловим режимом

Розробка та впровадження імпульсного опалення проведена на термічних печах з підподовими топками на заводі «ДСС». Печі опалювались коксово-доменною або природно-доменною сумішшю з теплотою згоряння 6,7 МДж/м³. Вага садки в печах становила 20… 30 тон [15].

Піч з підподовими топками умовно поділена на 5 зон. У першому варіанті в системах імпульсного опалення пальники встановлювали у шаховому порядку – зустрічно по одному в сусідніх зонах, а біля вікна видачі дві пальники зустрічно встановлені в одній топці. Досвід експлуатації показав, що при зустрічному напрямку руху газів відбувається втрата кінетичної енергії димових газів, що призводить до зниження ефективності рециркуляційного теплообміну. Тому надалі пальники почали встановлювати з одного боку печі, зокрема й у зоні біля вікна видачі.

Система автоматичного управління температурним режимом показана на рис. 4.1 [16]. Як видно з рисунка, у кожній зоні для

вимірювання температури на бічній стінці встановлені термопари 1, а для управління подачею палива та повітря на зону застосували пневматичні виконавчі механізми 4 і спарені регулюючі дроселі 5.

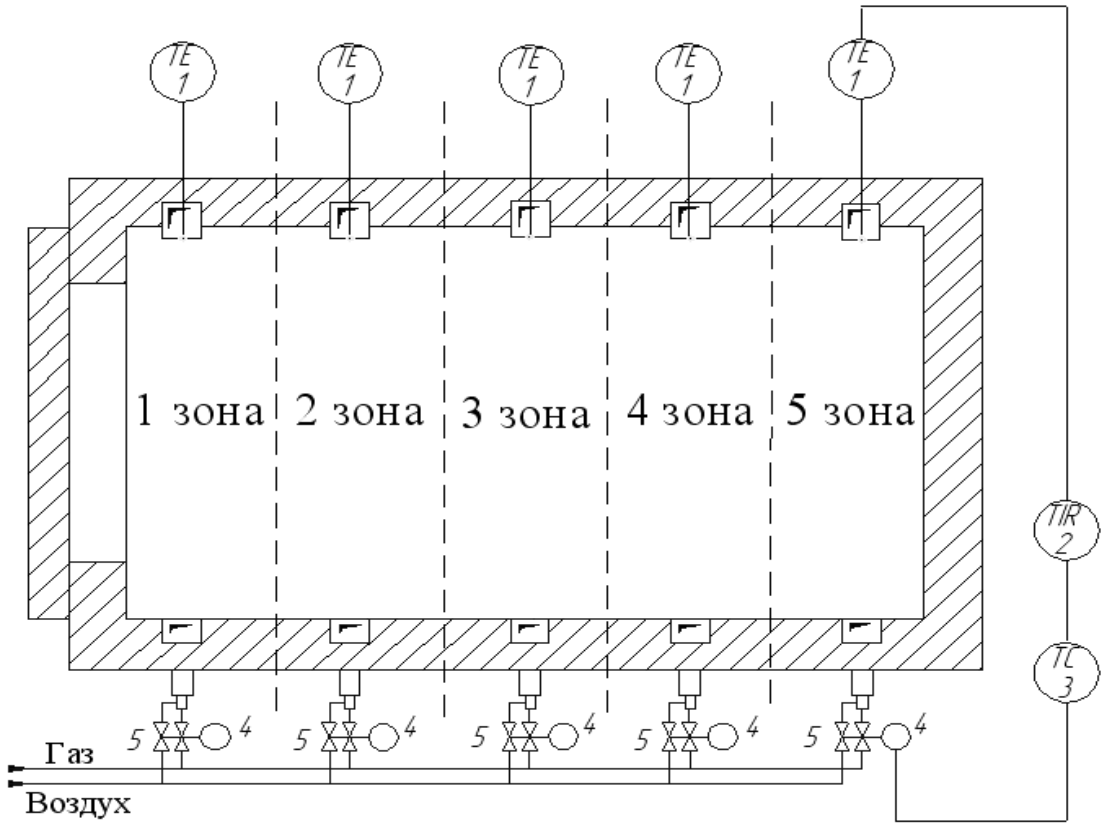


Рисунок 4.1 – Система автоматичного управління температурним режимом печі

Сигнал від термопар передається на один електронний потенціометр через оббігаючий пристрій 2. У системі управління використовується один завдавач, один регулятор температури 3, п’ять виконавчих механізмів та регулювальних органів у вигляді спарених дроселів на повітряному та газовому трактах кожного пальника. Система управління забезпечує автоматичне регулювання температури по п’яти зонах робочого простору печі в імпульсному режимі («відкрито» – «закрито»). Система стабілізації тиску в печі працює в звичайному режимі.

У період підвищення температури на пальники подавали паливо та повітря у співвідношеннях, близьких до стехіометричних. Після

досягнення заданої температури витримки в зоні регулятор зменшував витрату палива на 94 % (до 8 м³/год на пальник) і повітря – на 28 % (до 150 м³/год на пальник), залишаючи пальники практично на контрольному факелі. У разі зниження температури в зоні нижче заданої регулятор подавав максимальну витрату палива та повітря на відповідний пальник. Цикл оббігаючого пристрою є досить коротким, і температура кожної зони контролювалася кожні 1,5 хвилини.

На печі №12 було проведено промислово-експериментальне випробування [96] імпульсного опалення, реалізованого описаною вище системою автоматичного регулювання та комплектом модернізованих пальників. Було проведено серію дослідних віджигів з контролем температури в садці гнучкими термопарами, зокрема п’ять віджигів підшипникової сталі, що постачалася з контролем мікроструктури, і один віджиг хромистої нержавіючої сталі, що постачалася лише з контролем твердості.

У піч завантажувалася садка, упакована відповідно до технологічної інструкції. Розподіл температури за об’ємом садки визначався за допомогою гнучких хромель-алюмелевих термопар, закладених у садку між пакетами та, в деяких випадках, всередину пакета. Термопари встановлювалися в характерних точках за погодженням із ЦЗЛ. Температура по зонах контролювалася стаціонарними термопарами, встановленими в бічній стінці печі. Витрати газу та повітря вимірювалися щитовими приладами КВП і А. Тиск у робочому просторі на рівні поду підтримувався на рівні близько 10 Па.

Розглядалися результати експериментального віджигу №5279 під час нагрівання садки сталі ШХ15 масою 21 т. Режим віджигу включав підвищення температури до 800 °С, витримку при цій температурі протягом 14 годин, охолодження із заданою швидкістю в печі та подальше охолодження на повітрі.

Підвищення температури від 600 до 800 °С відбувалося за максимальних витрат газу (800 м³/год) і повітря (1300 м³/год). Гнучка термопара №5 була встановлена на передньому торці садки, у верхній її частині. Її показання майже збігалися з показаннями стаціонарної термопари, встановленої в цій же зоні.

Найбільше відставання в період підйому спостерігалося в місці встановлення термопари №4 (середня частина пакетів у задній половині печі). Таким чином, у момент початку витримки максимальний перепад температур по садці становив 90 °С.

Витримка здійснювалася за роботи системи автоматичного регулювання, яка реалізує імпульсний спосіб опалення. При цьому витрати газу та повітря на кожну зону змінювалися від мінімального до максимального значення, а температура в зонах періодично змінювалася в інтервалі 790…805 °С.

Періодична подача максимального обсягу газу та повітря призводить до підвищення інтенсивності рециркуляції в робочому просторі печі та вирівнювання температур. Через 9–10 годин витримки максимальний перепад по садці становив 8 °С, що свідчить про високу рівномірність нагріву. Тривалість витримки була скорочена на 4 години, відповідно скоротився й час відпалу. Відпрацьовані зразки пройшли контроль на мікроструктуру в ЦЗЛ без зауважень до якості металу. Усі відпрацьовані контрольні зразки відповідали вимогам ГОСТ 801–78. Інші експериментальні відпали дали подібні результати.

На рис. 4.2 наведено графіки середньої температури по перерізу металу та сумарні витрати палива на піч. Дослідні відпали підтвердили надійну роботу модернізованих пальників і працездатність системи автоматичного регулювання, яка реалізує імпульсний спосіб опалення термічної печі в період витримки металу.

Результати контрольних відпалів свідчать про ефективність імпульсного опалення в період витримки. Узагальнені дані вимірювань

температури металу, а також мікроконтролю показують, що рівномірність нагріву садки наприкінці нагріву дозволяє скоротити тривалість витримки на 3-4 години порівняно з чинною інструкцією.

З результатів, наведених на рис. 4.2, видно, що при безперервній подачі газу час витримки становив 14 годин, а при імпульсній подачі газу – 10 годин.

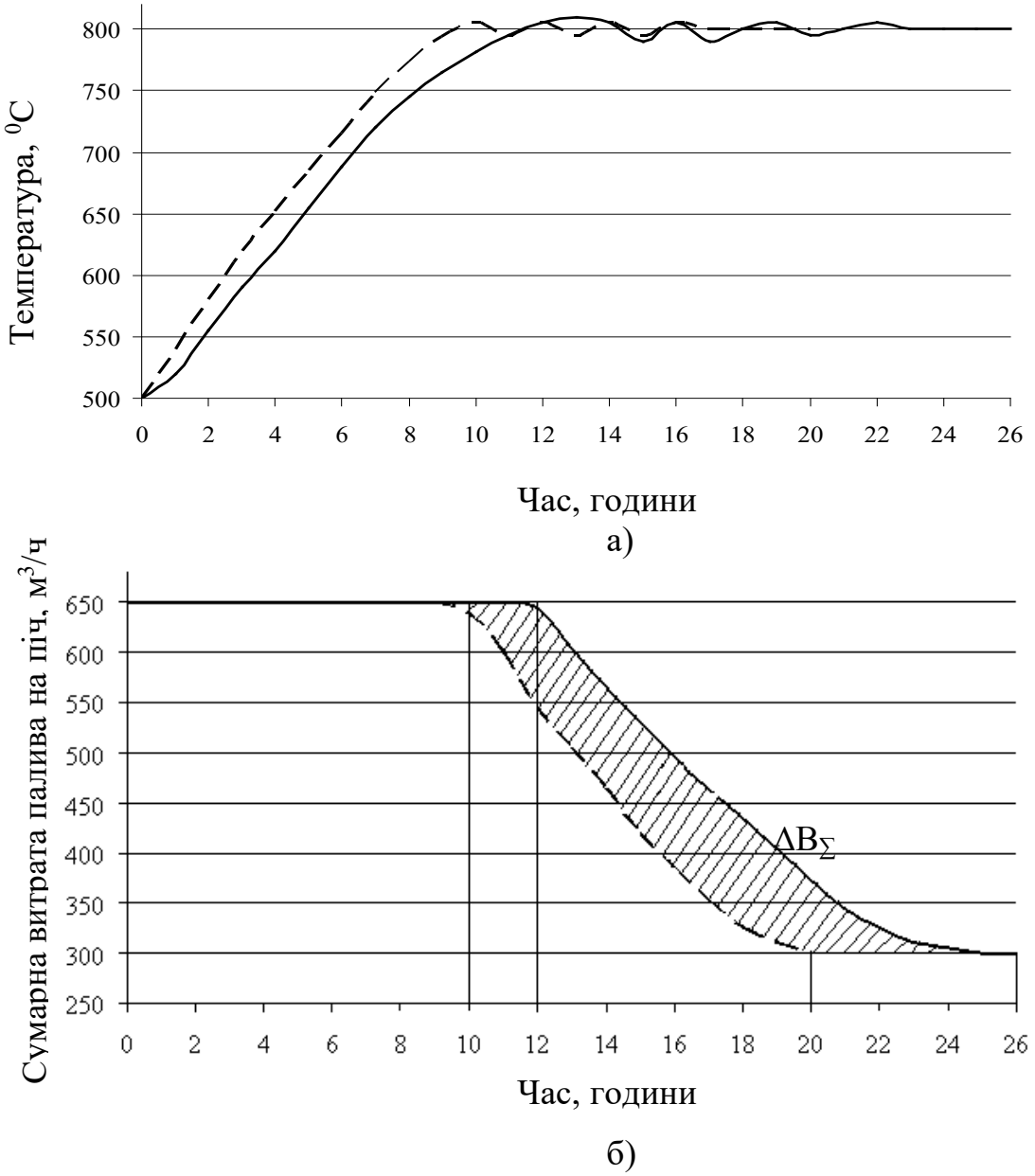


Рисунок 4.2 – Графики температуры металла: а) и суммарного расхода газа б):

———— при непрерывной подачи газа;

– – – – – – при импульсной подачи газа.

На рис. 4.2,б заштрихована область ΔВ∑ представляє собою економію палива при імпульсному способі опалення, яка для даного режиму нагрівання склала близько 1050 м³/год.

У висновку ЦЗЛ за результатами промислового освоєння імпульсного способу опалення зазначена ефективність запропонованого способу та рекомендовано його впровадження на всіх печах термічного цеху.

Однак під час тривалої експлуатації печі, оснащеної електричними та пневматичними виконавчими механізмами з постійною швидкістю переміщення штока, з'ясувалося, що дроселі та виконавчі механізми зношуються і виходять з ладу. Засувковий принцип дії дроселя на трубопроводах діаметром від 40 до 100 мм виявився несумісним з практично миттєвим спрацьовуванням пневматичного виконавчого механізму. Через різке повернення заслінки майже на 90° у високошвидкісному газовому або повітряному потоці виникали значні перепади гідродинамічного напору, що призводило до руйнування кріплення заслінки до поворотного штока дроселя та кінцевих вимикачів. Цей недолік також має місце при використанні електричних виконавчих механізмів з постійною швидкістю.

Для усунення зазначеного недоліку нами були надані рекомендації використовувати пневматичні виконавчі механізми фірми «CAMOZZI» з циліндрами. На поршні циліндрів встановлені постійні магніти. Положення поршня визначаються за допомогою магнітних датчиків, закріплених на циліндрі. Циліндри повинні бути оснащені пристроями демпфірування в кінці ходу з регулюванням інтенсивності гальмування. Швидкість руху циліндра може регулюватися вбудованим регулятором на всьому протязі ходу поршня.

4.2. Результаты экспериментальных исследований

Під час виконання експерименту в робочому просторі печі встановили 5 хромель-алюмелевих термопар на рівній відстані одна від одної по ширині печі в одній із зон. Робочі спаї термопар розміщували на поверхні поду (рис. 4.3). Експериментальний відпал при температурі 680 °С проводили на печі № 19 термічного цеху заводу «Дніпроспецсталь» [21]. Значення температури відображалися на діаграмній стрічці багатоточкового вторинного показувального та реєструвального приладу КСП-4.

Виходячи з наведених вище теоретичних розрахунків, отримано, що перепад температури по ширині печі розраховується за формулою:

$$\Delta t_{\min} = \frac{k}{T^2 \cdot \omega^2 + 1} \qquad (4.9)$$

де ККК – коефіцієнт передачі об’єкта, °С;

τ– час об’єкта, за який досягається усталене значення температури при подачі ступінчастого збурення, с.

Проведені експериментальні дослідження базувалися на періодичному відключенні подачі палива до пальникових пристроїв за різної теплової потужності.

Виконання експерименту здійснювалося шляхом ступінчастої подачі палива та повітря. У цьому випадку на вторинному приладі отримували криві розгону в п’яти точках по ширині печі, які показані на рис. 4.4.

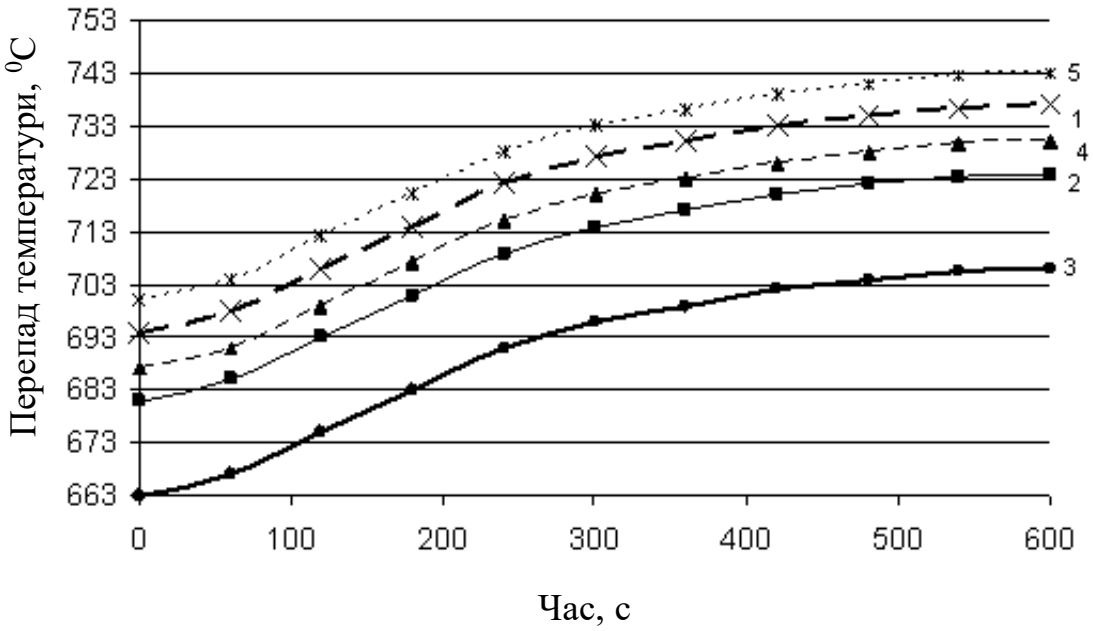


Рисунок 4.4 – Експериментальні криві розгону в 5 точках по ширині однієї зони печі

Значення коефіцієнта передачі ККК та постійної часу об'єкта τ визначаються шляхом графічного диференціювання [17, 18]. Проведено дотичну до кривої розгону. Точка перетину дотичної з віссю часу та лінією усталеного значення відповідає часу об'єкта. Коефіцієнт передачі дорівнює стрибкоподібній зміні сигналу від попереднього до наступного.

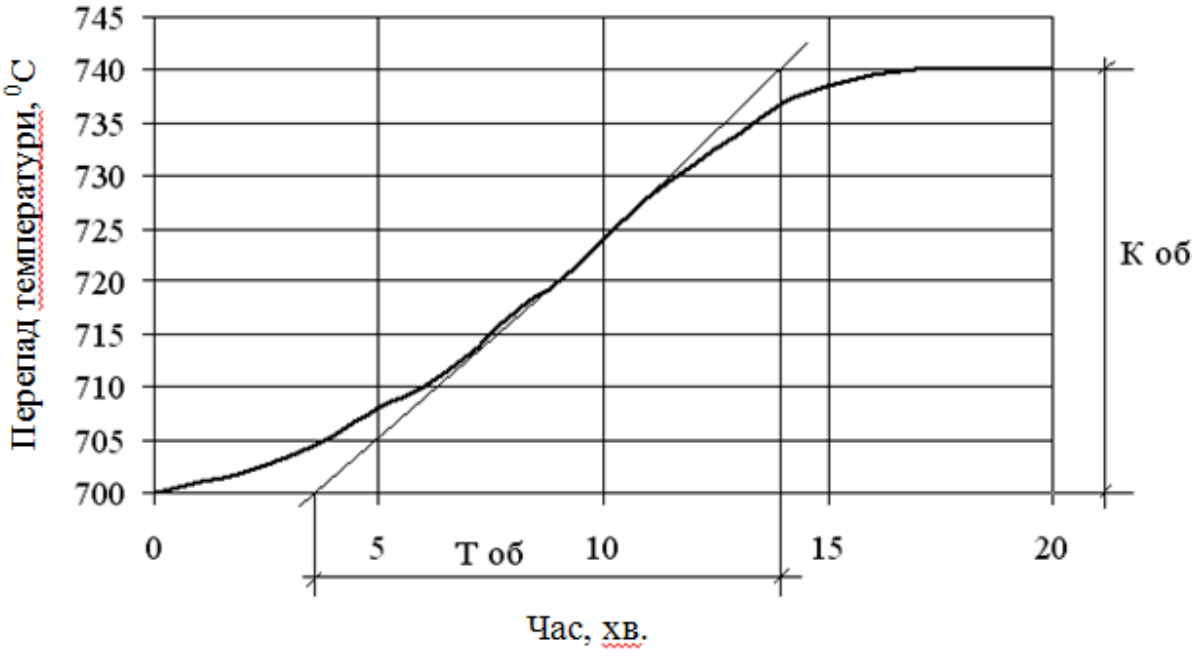


Рисунок 4.5 – Графік кривої розгону температури

Для експерименту ці коефіцієнти складають:

$K = 40\,^0$C і $T = 9{,}8$ мин = 588 сек (рис.4.5).

За формулою (4.5) розраховується амплітудно-частотна характеристика для значень частоти від 0 і більше, що представлено на рис. 4.6. Характеристика розраховувалась для кривої розгону в середній точці 3 по ширині печі (див. рис. 4.3)

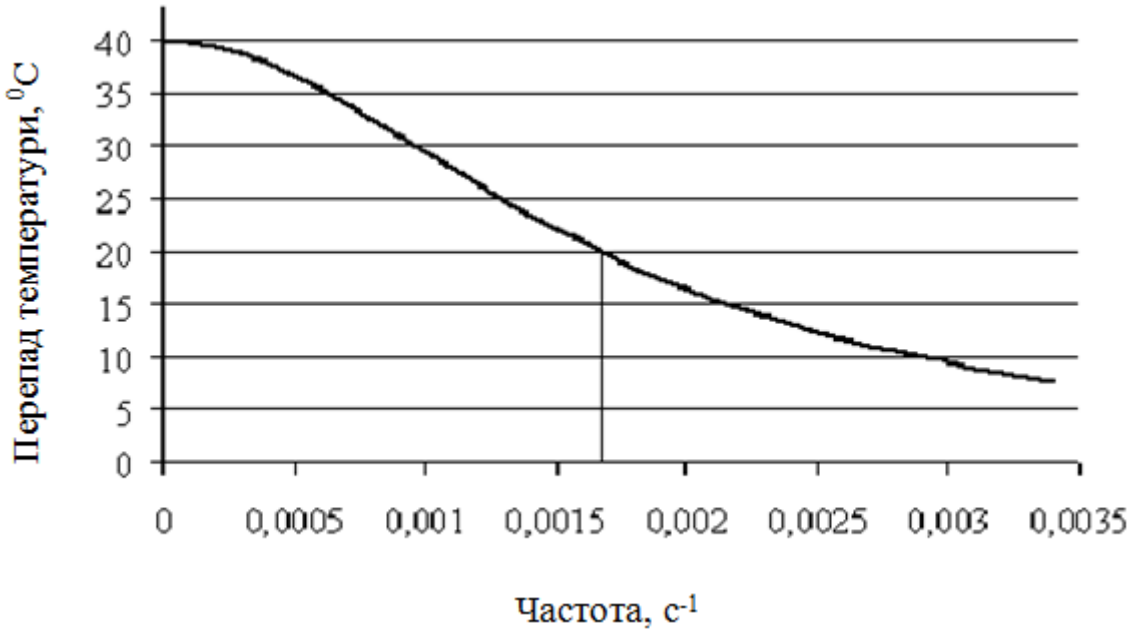


Рисунок 4.6 – Амплитудно-частотные характеристики

Необхіднезначення перепаду температури: $\Delta t_{\min} = 20^0 C$.

По выше приведенной методике получаем амплитудно-частотную характеристику.

$$A(\omega)_3 = \frac{40}{600^2 \cdot \omega^2 + 1},\ t_u = \frac{600}{\sqrt{40/20 - 1}} = 600\,\text{сек},$$

При перепаді температури час тривалості імпульсу становить 600 сек. Для середньої точки по ширині зони печі експериментально було отримано 588 сек (див. рис. 4.5).

Похибка розрахунку становить:

$$\delta = \frac{t_u - T_{об}}{T_{об}} \cdot 100\% = \frac{600 - 588}{588} \cdot 100\% = 2\%.$$

Приведенная методика позволяет определить время длительности импульса подачи топлива и воздуха к горелкам, за которое стабилизируется температура по ширине печи с минимальным перепадом температуры в различных точках.

Висновки.

1. На основі аналізу виробничих випробувань встановлено, що найбільш ефективним у системах імпульсного опалення є використання пневматичного виконавчого механізму з циліндрами та змінною швидкістю переміщення штока.Розроблено методику графоаналітичного методу визначення тривалості імпульсів подачі палива та повітря в період витримки металу для будь-якого технологічного об'єкта.

2. За допомогою динамічної ідентифікації експериментальних даних (перехідних процесів) і частотних характеристик на основі розробленої методики можливо змінювати тривалість подачі палива та повітря в робочий простір печі під час технологічного режиму.

3. Було здійснено розрахунок тривалості імпульсу, а результати оцінювалися за експериментальними даними. Похибка розрахунку склала 2%.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЄКТУ

Стартап-проєкт: «Інноваційні рішення для оптимізації температурного режиму в камерних термічних печах»

Мета стартапу:розробка та впровадження інноваційних технологій для зменшення перепаду температури в процесі термообробки металу, що дозволить підвищити якість продукції, скоротити витрати палива та знизити зношення обладнання.

Ключові елементи стартапу:

1. Продукт:

– Інтелектуальна система управління температурним режимом: Автоматизована система, що контролює розподіл температури по ширині та висоті печі в реальному часі.

– Вдосконалені пальникові пристрої: Пальники з регульованою довжиною факела та покращеним змішуванням газоповітряної суміші.

– Модернізовані теплоізоляційні матеріали: Новітні матеріали для підвищення рівномірності температурного поля.

– Математична модель для прогнозування та корекції температурних зон: Інструмент для оптимізації процесу нагріву на основі динамічних змін.

2. Цільова аудиторія:

– металургійні підприємства;

– машинобудівні заводи;

– підприємства, що займаються термообробкою металевих деталей.

3. Унікальні переваги:

– Зниження енергетичних витрат:оптимізація процесів дозволить скоротити споживання палива до 15–20%;

– Підвищення якості металу:рівномірне прогрівання забезпечить мінімізацію дефектів;

– Екологічність:зменшення обсягів викидів CO_2 за рахунок ефективного використання палива.

– Швидка окупність:висока енергоефективність дозволить підприємствам швидко відшкодувати інвестиції у впровадження технологій.

4. Етапи реалізації:

– Дослідження та розробка:прототипування пальникових пристроїв та створення математичної моделі.

– Тестування:випробування на лабораторному та промисловому обладнанні.

– Комерціалізація:вихід на ринок із пропозицією модернізації печей та впровадження інтелектуальної системи управління.

5. Фінансування:

– Пошук інвестицій через грантові програми (наприклад, Horizon Europe);

– Співпраця з промисловими партнерами;

– Власні кошти від інноваційних рішень, які впроваджуються поступово.

6. Масштабування:

– Вихід на міжнародний ринок, орієнтація на підприємства ЄС, де енергоефективність є пріоритетом;

– Розширення продуктового ряду: технології для інших типів печей (ротаційних, тунельних тощо).

Очікувані результати:

– Підвищення ефективності термообробки металу.

– Зниження витрат на енергоресурси для клієнтів.

– Формування репутації як інноваційного лідера в галузі термічної обробки металів.

Таблиця 5.1 Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Система аналізу ефективності процесу пароперегрівання	1. Застосовується на виробництвах з новітнім обладнанням для ефективного керування процесом і випуску продукції гарної якості	Вигодою буде те, що при високій якості продукції, завдяки системі аналізу ефективності собівартість продукції буде менша
	2. Застосовується на виробництвах з застарілим обладнанням, але при використанні системи аналізу ефективності процесів можна збільшити енергоефективність	Збільшивши енергоефективність та зекономивши, придбати нове обладнання

Планується надавати наступні послуги з технічного консалтингу щодостворення системи аналізу ресурсо- та енергоефективності.

Основні види діяльності проекту:

– оцінювання підприємств з метою визначення їх екологічної та енергетичної ефективності. Розробка технічних рекомендацій, спрямованих на підвищення ефективнішого використання ресурсів з урахуванням екологічних, економічних та соціальних аспектів;

– технічна консультація та експертна підтримка у здійсненні заходів щодо зниження рівнів споживання енергії та ресурсів;

– незалежне технічне оцінювання роботи обладнання, виробничих технологій та виконання вимірювань;

– розробка рекомендацій щодо передачі технології; співпраця з національними та міжнародними фінансовими установами для отримання

фінансування;

– розбудова потенціалу національних експертів у питаннях навколишнього середовища та енергоефективності.

Визначення характеристик ідейпроекту наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	Проєкти (потенційні) товари/концентрації конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проєкт	Конкурент1	Конкурент2	Конкурент3			
Експерти	+	+	+	-			+
Навчання/ тренінги	+	+	-	+			+
Масштабність проектів	-	+	-	-	+		
Рівень сервісу	+	+	+				+
Досвід на ринку	+	+	-	-	+		
Вартість послуг	+	-	+	+			+
Просування своїх послуг	-	+	+	-		+	

Так як консалтинг – це перш за все люди, спеціалісти, експерти, то проект має всі необхідні ресурси для реалізації проекту.

Послуги надаються за існуючою практикою РЕЧВ. Що потрібно доробити? Це адаптувати методику аналізу ресурсо- та енергоефективності під реалії українського виробництва. Автори проекту повністю ознайомлені з методикою проекту.

Таблиця 5.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Створення системи аналізу ефективності процесів на виробництві	Технологія надання послуги: спочатку пропонувати свої послуги по собівартості для напрацювання контактів та досвід реалізації проекту	Необхідно доробити методику ресурсо- та енергоефективного виробництва, а саме адаптувати для умов українських виробництв.	Так, доступні

Таблиця 5.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ n/n	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн./ум.од	90 тис. грн.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Для надання послуг потрібно отримати довіру клієнта
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ні
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	87 %

За результатами аналізу таблиці 5.5 можна зробити висновок що ринок є привабливим.

На цьому етапі проводиться маркетингове дослідження для виявлення характеристик і потреб потенційних клієнтів. Інформація, отримана в результаті проведення дослідження, дозволяє визначити такі ознаки, за якими можна розділити ринок на сегменти.

Таблиця 5.5Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнів	Вимоги споживачів товару
Підвищення енерго та ресурсо ефективності підприємства при цьому не роблячи інвестицій в дороге новітнє обладнання	Українські виробництва	Фактори, що формують поведінку клієнта: Стандарти Вартість послуг Сроки реалізації Сроки рентабельності	До компанії постачальника конфеденційність по мінімуму переривати існуючий процес і відволікати працівників

Першим кроком розроблення ринкової стратегії та вибір стратегії конкурентної поведінкипередбачає визначення стратегії охоплення ринку завдяки опису та аналізу цільових груп потенційних споживачів (табл.5.6)

За результатами аналізу потенційних груп споживачів так як проект реалізується в одному сегменті – обирається стратегія концентрованого маркетингу.

Таблиця 5.6Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Цільова група – українські виробництва	Готові сприймати, адже е необхідно, що б бути конкурентно-спроможним	Великий попит	Інтенсивність конкуренції в сегменті залежить в масштабів наданих послуг	-
Які цільові групи обрано: українські виробництва				

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних та слабких сторін, загроз та можливостей.

Таблиця 5.7 SWOT- аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: – збільшення енергоефективності процесу, підприємства; – зниження затрат на ресурси; – вартість послуг; – врахування потреб споживачів.	Слабкі сторони: – термін реалізації
Можливості: – підвищення репутації; – стійкий дохід.	Загрози: – інфляційні процеси; – високий рівень безробіття.

*Висновки.*Підсумовуючи проведений аналіз проєкта можна сказати, що існує можливість ринкової комерціалізації, адже є високий попит і потреба в такій системі, а динаміка ринку стрімко зростає. І не дивлячись на стан конкуренції, конкурентоспрожність проекту висока, адже є доволі вагомі переваги такі як ціна/якість наданих послуг.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ

6.1. Загальні заходи з охорони праці при термічній обробці металу

Згідно «Правила охорони праці при термічній обробці металів Закону України «Про охорону праці», при термічній і хіміко-термічній обробці металів можливий вплив на працівників різних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, у тому числі:

– незахищені рухливі елементи виробничого устаткування;

– заготовки, готові вироби або деталі, що пересуваються;

– транспортні засоби, що рухаються;

– аерозолі фіброгенної дії (пилу);

– несприятливий мікроклімат робочої зони;

– підвищена температура поверхонь устаткування і матеріалів;

– знижена температура при обробці деталей холодом;

– підвищена або знижена температура повітря робочої зони;

– небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини;

– підвищений рівень електромагнітного випромінювання (ультрафіолетового, видимого, інфрачервоного, лазерного, мікрохвильового, радіочастотного);

– підвищена напруженість магнітного поля;

– підвищений рівень шуму на робочому місці;

– знижена освітленість робочого місця;

– пожежо- і вибухонебезпека;

– хімічні фактори загальнотоксичного, дратівного, канцерогенного впливу на організм працівника;

– важкість і напруженість праці.

При обслуговуванні електропечей мають бути дотримані наступні вимоги безпеки:

– усі струмопровідні частини електропечей, з якими можливе зіткнення обслуговуючого персоналу, мають бути ізольовані або захищені;

– обгороджування і прилади контролю, до яких підводиться електроживлення, мають бути заземлені;

– електричні печі повинні мати блокування для автоматичного відключення нагрівальних елементів при відкриванні дверець печі.

– при експлуатації електротермічного устаткування повинні використовуватися ізоляційні засоби індивідуального захисту : рукавиці, діелектричні галоші, килимки і тому подібне;

– при обслуговуванні електротермічного устаткування Правилами експлуатації електроустановок передбачені спеціальні заходи безпеки для захисту обслуговуючого персоналу від дії високих температур і теплового випромінювання. Усі механізми управління і обслуговування печей мають бути встановлені так, щоб робітник не піддавався дії високих температур і шкідливих газів. Різниця температур на поверхні печей і навколишнього повітря не повинна перевищувати 45-60°С.

Основні фактори електричного характеру включають протікання струму через тіло людини, напругу, яка діє на неї, опір її тіла, а також частоту струму. Проходження електричного струму через організм людини супроводжується термічним, електролітичним, біологічним та механічним ефектами. Ураження струмом призводить до електролізу органічних речовин в організмі, порушення біологічних процесів, скорочення м'язів та пошкодження тканин.

Основними факторами неелектричного характеру є шлях струму через тіло людини, індивідуальні особливості та стан організму, тривалість дії струму, а також раптовість і непередбачуваність його дії. Шлях струму через тіло людини має важливе значення для визначення важкості ураження. Особливо небезпечним є протікання струму через життєво

важливі органи, де вплив струму безпосередньо відбувається. Джерелами електронебезпеки в дільниці є термічні печі, дробеструменевий апарат, баки для гартування та промивальний бак. Все це обладнання працює від змінного електричного струму, та, у випадку несправності та/або неправильної експлуатації може призвести до ураження струмом. Для захисту працівників від ураження електричним струмом застосовують заземлення, захисні розділення електромереж, технічні огляди обладнання, перевірка несправностей лише у знеструмленому стані, електрозахисні засоби, підтримання сухого, незапиленого приміщення з вологістю не вище 75% та регулярні інструктажі з правил електробезпеки.

6.2 Охорона праці оператора АСУ ТП

На основі аналізу роботи існуючого обладнання і посадових обов'язків оператора АСУТП у приміщенні обладнаному ПК з ВДТ сформовані заходи по забезпеченню безпеки праці.

Приміщення, у якому здійснюються заходи пов'язані з виконанням посадових обов'язків та проведенням досліджень та розрахунків (розробкою, модернізацією, удосконаленням, тощо), є спеціалізованим, яке обладнане ПК з ВДТ.

Для запобігання ураження електричним струмом встановлено електроустаткування, яке відповідає вимогам ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні стандартні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин», «Правил улаштування електроустановок» (далі – «ПУЕ»), ДСТУ Б В.2.5-82:2016 «Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом», НПАОП 40.1-1.32-01 «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок», НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» та буде використовуватисязгідно вимогНПАОП 40.1-1.01-97 «Правила безпечної

експлуатації електроустановок» (далі – «ПБЕЕ»), НПАОП 40.1-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів» (далі – «ПБЕЕС»)та НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Згідно «ПУЕ», за ступенем небезпеки ураження електрострумом, робоче місце оператора АСУТП приміщення належить до 1-го класу, тобто є приміщенням без підвищеної небезпеки, у якому відсутні умови, що створюють підвищену та особливу небезпеку.

Згідно глави 1.7 – «Заземлення і захисні заходи від ураження електричним струмом» – «ПУЕ», обладнання має основну ізоляцію струмовідних частин, яка забезпечує захист від прямого дотику та подвійну, яка складається з основної та додаткової ізоляції, для забезпечення захисту від ураження електричним струмом у разі пошкодження основної ізоляції.

Відповідно до вимог п. 6.7.4. НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» усідоступні для доторкання металеві деталі електрообладнання у приміщенні з ПК, які можуть опинитись під напругою, у випадку пошкодження ізоляції, з'єднані з заземлюючим пристроєм.

Оскільки робоче місце оператора АСУТП за ступенем небезпеки ураження електрострумом належить до 1-го класу, тому відповідно до вимог п. 6.7.6 НПАОП 40.1-1.21-98 «ПБЕЕС» та додатку №1 до НПАОП 40.1-1.01-97 «ПБЕЕ» користувачі ПК пройшли інструктаж з електробезпеки з оформленням в журналі інструктажу та мають І групу з електробезпеки.

Ймовірність механічного травмування може виникнути внаслідок нераціонального розташування робочих місць, захаращення робочих місць або у зв'язку з недбалістю та неуважністю обслуговуючого персоналу. Для виключення травматизму згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» зроблено більш зручне та

раціональне розташування робочих місць, таким чином збільшена відстань між ними, яка відповідає нормованим значення (площа на одне робоче місце має становити не менше ніж 6,0 м^2, а об'єм не менше ніж 20,0 м^3). Поверхня підлоги є рівною, неслизькою, з антистатичними властивостями.

У зв’язку із стресовими ситуаціями та нервово-емоційними навантаженнями у працівників може виникнути ймовірність захворювань загально-невротичного характеру.

З метою зниження нервово-емоційного напруження, стомлення зорового аналізатора, поліпшення мозкового кровообігу, подолання несприятливих наслідків гіподинамії, запобігання втоми, згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» для робітників із застосування ЕОМ, передбачені регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години, а також обладнані побутові приміщення для відпочинку під час роботи, кімната психологічного розвантаження. В кімнаті психологічного розвантаження передбачені пристрої для приготування й роздачі тонізуючих напоїв, а також місця для занять фізичною культурою

Для оптимізації відносин у колективі проводяться тренінги з залучанням психологів на теми: «Адаптація у новому колективі», «Поведінка в суспільстві».

Для запобігання кістково-м’язових порушень робочі місця користувачів ПК оператора АСУТП відповідають ергономічним вимогам з урахуванням характеру і особливостей трудової діяльності згідно з ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин».

Висота робочої поверхні столу з ПК регулюється в межах 680-800 мм, а ширина і глибина – забезпечує можливість виконання операцій у зоні досяжності моторного поля (рекомендовані розміри: ширина – 600-

1400 мм, глибина – 800-1000 мм). Робочий стіл має простір для ніг висотою 600 мм, шириною – 500 мм, глибиною (на рівні колін) – 450 мм, на відстані витягнутої ноги – 650 мм.

Заходи з виробничої санітарії і гігієни праці для робочого місця оператора, обладнаного ПК з ВДТ розроблені відповідно до вимог Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» і НПАОП 0.00-7.15-18 «Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями».

Основними причинами недостатньої або надмірної освітленості робочих місць є несправність або хибний вибір освітлювальних приладів, неправильне розташування робочих місць по відношенню до джерел освітлення.

Незадовільна освітленість на робочому місці або на робочій зоні може бути причиною зниження продуктивності та якості праці, отримання травм. Недостатнє або надмірне освітлення викликає зоровий дискомфорт, що виражається у відчутті незручності або напруженості. Тривале перебування в умовах зорового дискомфорту призводить до розсіювання уваги, зменшення зосередженості, зоровій і загальній втомі.

Робоче місце оператора АСУТП обладнаному ПК з екранним пристроєм (далі – «ЕП»), згідно ДСанПіН 3.3.2.007-98 «Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин» та ДБН В.2.5-28-2018 «Природне і штучне освітлення» передбачене природне та штучне освітлення.

Природне освітлення здійснено через світлові прорізи, які орієнтовані на південь і забезпечують коефіцієнт природної освітленості (КПО) не нижче 1,5%. Для захисту від прямих сонячних променів, які

створюють прямі та відбиті відблиски на поверхні екранів і клавіатури, передбачено сонцезахисні пристрої, на вікнах встановлені жалюзі.

Метеорологічні умови для приміщенні з комп'ютеризованими робочими місцями – температура, відносна вологість та швидкість переміщення повітря цілком відповідають вимогам ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Роботи у приміщенні з ПК, належать до категорії Іб – легка робота, тому передбачені наступні оптимальні значення параметрів мікроклімату:

– у холодний період року: температура 21-23°С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,1 м/с;

– у теплий період року: температура 22-24°С; відносна вологість: 40-60%; швидкість переміщення повітря: 0,2 м/с.

6.3 Пожежна безпека

Пожежа – ситуація, що найбільш часто зустрічається на підприємстві. Цехи оснащуються всіма необхідними засобами пожежогасіння та протипожежною сигналізацією. Категорія приміщень за пожежною небезпекою (СП 12.13130-2009) – А. Цех теплової обробки матеріалів відноситься до II ступеня вогнестійкості. Систему протипожежного захисту становить комплекс організаційних і технічних засобів, спрямованих на запобігання впливу на людей небезпечних факторів пожежі та обмеження матеріальних збитків від неї.

Протипожежний захист забезпечується:

– максимально можливим застосуванням негорючих і важкогорючих речовин і матеріалів замість пожежонебезпечних;

– обмеженням кількості горючих речовин і їх розміщення;

– ізоляцією горючого середовища;

– запобіганням поширенню пожежі за межі вогнища;

– застосуванням засобів пожежогасіння;

– застосуванням конструкції об'єкта з регламентованими межами вогнестійкості та горючістю;

– евакуацією людей;

– системами протидимного захисту;

– застосуванням засобів пожежної сигналізації та засобів сповіщення про пожежу;

– організацією пожежної охорони промислових об'єктів.

Систему запобігання пожежі становить комплекс організаційних заходів і технічних засобів, спрямованих на виключення можливості виникнення пожежі.

Запобігання пожежі досягається:

– усуненням утворення горючого середовища;

– усуненням утворення горючого (або внесення до неї) запалювання;

– підтриманням температури горючого середовища нижче максимально допустимої і іншими заходами.

В цехах і підрозділах всі машини і механізми укомплектовані вогнегасниками і ящиками з піском, в приміщеннях, на робочих місцях укомплектовані пожежні щити, організовані в кожному підрозділі куточок по пожежній безпеці з інструкціями по пожежній безпеці.

Блискавко-захисні пристрої знаходяться в справному стані, електричні лінії та електричне обладнання заземлено. Вогнегасники термін використання яких скінчився своєчасно заправляються. Досліджуване підприємство повністю відповідає встановленим вимогам пожежної безпеки відповідно до визначеної категорії.

Висновки. В даному розділі подані рекомендації що до охорони праці і пожежної безпеки, що відповідають законодавству України.

7 ТЕХНІКО–ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОЕКТУ

7.1 Визначення капітальних вкладень

У зв'язку з розробкою стартапу з інноваційної методики теплової обробки металупроводиться техніко-економічне обґрунтування проекту.

До складу АСУТП управління процесом теплової обробки матеріалів з вуглецю входять 5 шаф управління (ШУ) вартістю

Сума капіталовкладень ($К_{ов}$) становить 6800000 гривень без урахування ПДВ включає вартість придбаного устаткування ($В_{уст}$) та витрати на транспортні ($В_{тр}$ = 6%) і заготівельно-складські ($В_{зс}$ = 5%) операції у визначених відсотках від $В_{уст}$.

$$К_{об} = В_{уст} + В_{тр} + В_{зс}, \quad (7.1)$$

де $В_{уст} = В_{ШУ}$

$$В_{ШУ} = 680000 \cdot 10 = 6800000, \text{ грн.}$$

$$К_{ов} = 6800000*(1+0,06+0,05) = 7548000, \text{ грн.}$$

Додаткові капіталовкладення К на модернізацію складаються з таких витрат:

$$К = К_{дм} + К_{об} + К_{м}, \quad (7.2)$$

де $К_{дм}$ – витрати на демонтаж існуючої апаратури ($К_{дм} = 0,05 \cdot К_{ов}$, грн);

$К_{м}$ – витрати на монтаж нового устаткування ($К_{м} = 0,4 \cdot К_{ов}$, грн).

$$К_{дм} = 0,05 \cdot 7548000 = 377400, \text{ грн.}$$

$$К_{м} = 0,4 \cdot 7548000 = 303200, \text{ грн.}$$

$$К = 377400 + 303200 + 7548000 = 8228600, \text{ грн.}$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.1 .

Таблиця 7.1 – Визначення капітальних вкладень.

Визначення капітальних вкладень	
Витрати на монтаж нового устаткування $К_м$	323200 грн.
Сума капіталовкладень $К_{ов}$	7548000 грн.
Витрати на демонтаж існуючої апаратури $К_{дм}$	377400 грн.
Вартість придбаного устаткування $В_{уст}$	6800000 грн.
Додаткові капіталовкладення модернізацію К	8228600 грн.

7.2 Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Експлуатаційні витрати (В) складаються з річних витрат на:

- зарплату персоналу ($В_{зп}$);
- амортизацію нового обладнання ($В_а$);
- поточний ремонт нового обладнання ($В_р$);
- електричну енергію для живлення нового обладнання ($В_{ел}$);
- інші експлуатаційні витрати ($В_і$).

$$В = В_{зп} + В_а + В_р + В_{ел} + В_{ін}. \quad (7.3)$$

7.3 Річні витрати на ЗП

Річні витрати на ЗП обслуговуючого персоналу визначається за формулою:

$$В_{зп} = n \cdot ФОП, \quad (7.4)$$

де n – чисельність обслуговуючого персоналу (n = 50 роб.);

ФОП – середньорічний фонд оплати праці одного робітника з обов’язковими нарахуваннями на соціальні збори.

Розрахуємо сердньорічний фонд оплати праці одного робітника з обов'язковими нарахуваннями на соціальні збори:

$$ФОП = Ф_{зп} \cdot К_{ін}, \quad (7.5)$$

де $К_{ін} = 1,1$

$Ф_{зп}$ – щорічна витрата на зарплату робітника з урахуванням нарахувань на ФОП, грн.

$$Ф_{зп} = 12 \cdot ЗП \cdot Н_{зп}, \quad (7.6)$$

де ЗП – середня місячна зарплата робітника (ЗП = 8500 грн.);

$Н_{зп}$ – нарахування на ФОП складають 20%.

Тоді:

$$Ф_{зп} = 12 \cdot 8500 \cdot (1+0,2) = 122400, грн.$$

$$ФОП = 122400 \cdot 1,1 = 134640, грн.$$

$$В_{зп} = 50 \cdot 134640 = 6732000, грн.$$

7.4 Розрахунок річних амортизаційних відрахувань

Амортизаційні відрахування ($В_а$) на реновацію придбаного устаткування на соціальні збори визначаються за виразом:

$$В_а = К \cdot Н_А /100, \quad (7.7)$$

де $Н_А$ – річна норма амортизації на реновацію ($Н_А = 24\%$);

$$В_а = 1332000 \cdot 24/100 = 319680, грн.$$

7.5 Річні витрати на ремонт

Ці витрати обчислюють через коефіцієнт $К_р$ = 3% від загальної суми капіталовкладень.

$$В_р = К_р \cdot К, грн. \quad (7.8)$$

$$В_р = 0,03 \cdot 1332000 = 39960, грн.$$

7.6 Витрати електроенергії на живлення

Річні витрати на живлення визначаються так:

$$В_{ел} = Р_{ел} \cdot Т_ф \cdot К_з \cdot СВ^{од}_{ел}, грн. \quad (7.9)$$

де $Р_{ел}$ – встановлена електрична потужність ($Р_{ел}$ = 3,5 кВт);

$Т_ф$ – фактичний термін роботи за рік ($Т_ф$ = 7800 год.);

$К_з$ – коефіцієнт для врахування реального споживання ($К_з$ = 0,8);

$СВ^{од}_{ел}$ – собівартість виробленого 1КВт · год ($СВ^{од}_{ел}$ = 90 коп.)

$$В_{ел} = 3,5 \cdot 7800 \cdot 0,8 \cdot 0,90 = 19656 грн.$$

7.7 Інші витрати

Інші витрати визначаються так:

$$В_{ін} = 0,25 \cdot (В_а + В_{зп} + В_р) \quad (7.10)$$

$$В_{ін} = 0,25 \cdot (319680 + 6732000 + 39960) = 1772910 грн.$$

Підставляючи отримані значення маємо загальну суму річних експлуатаційних витрат (В, грн.):

$$В = 6732000 + 319680 + 39960 + 19656 + 1772910 = 8884206 \text{ грн.}$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.2.

Таблиця 7.2 – Розрахунок річних експлуатаційних витрат

Розрахунок річних експлуатаційних витрат	
Зарплата персонала $В_{зп}$	6730000 грн.
Амортизація нового обладнання $В_а$	319680 грн.
Поточний ремонт нового обладнання $В_р$	39960 грн.
Електричну енергію для живлення нового обладнання $В_{ел}$	19656 грн.
Інші експлуатаційні витрати $В_{ін}$	1772910 грн.
Експлуатаційні витрати В	8884206 грн.

7.8 Річна економія експлуатаційних витрат

Економія (Е) від впровадження визначається за виразом:

$$Е = Е_п + Е_н + Е_{вп} – В$$

де $Е_п$ – економія від зменшення кількості пусків через зниження відмов конвертера, грн.;

$Е_н$ – економія у зв'язку з підвищенням надійності роботи, грн.;

$Е_{вп}$ – економія у зв'язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби через впровадження методики, грн.;

$В_{САР}$ – вартість річних експлуатаційних витрат.

Економія ($Е_п$)від зменшення кількості пусків через зниження відмов визначається за виразом:

$$Е_п = (1 – Квід) \cdot t_{від} \cdot c_п \cdot СВ_{ел}^{одд} /100, \qquad (7.11)$$

де $P_в$ – встановлена електрична потужність($P_в = 10^6$), кВт;

$t_{від}$ – відрізок часу виведення системи з мережі при його відключенні ($t_{від} = 9$ год);

$c_п$ – число скорочених пусків($c_п = 1$);

$СВ^{од}_{ел}$ – собівартість 1 кВт*год виробленої електроенергії ($СВ^{од}_{ел} = 5$ коп);

$К_{від}$ – коефіцієнт корисного навантаження за час $t_{від}$ ($К_{від}=0,7$).

Тоді

$$Е_п= (1 – 0,7) \cdot 10^6 \cdot 9 \cdot 1 \cdot 5/100 = 135000 \text{ грн.}$$

Економія ($Е_н$) у зв'язку з підвищенням надійності роботи ЕС і додатковим виробленням електроенергії (dEв) визначається за виразом:

$$Е_н = (СВ^{од}_{ел} – СВМ^{од}_{ел}) \cdot W_в , \qquad (7.12)$$

де $СВМ^{од}_{ел}$ – собівартість 1 кВт · год з урахуванням додаткової роботи апарату визначається за виразом:

$$СВМ^{од}_{ел} = СВ^{од}_{ел} (1 – А_п \cdot (1 – W_в /(W_в + dW_в))) \qquad (7.13)$$

де $А_п$ – доля умовно-постійних витрат в собівартості 1 кВт · год:

$$А_п = 1 – Вп / СВП, \qquad (7.14)$$

$$В_п = 183,45 \cdot 10^6 \text{ грн.},$$

$$СВП= 210,3 \cdot 10^6 \text{ грн.},$$

$$Ап = 1 –183,45 \cdot 10^6/210,3 \cdot 10^6 = 0,27$$

$$W_в=7 \cdot 10^9 \text{ кВт*год.}$$

$$СВМ^{од}_{ел} = 5 \cdot (1 – 0,128 \cdot (1 – 7 \cdot 10^9 /(7 \cdot 10^9 + 24 \cdot 10^6))) = 0,45 \text{ коп.}$$

Тоді:

$$Е_н = (5 – 0,45) \cdot (7 \cdot 10^9 + 24 \cdot 10^6)/100 = 31959200 \text{ грн.}$$

Економія ($Е_{вп}$) у зв'язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби через модернізацію визначається за виразом:

$$Е_{вп} = (СР^{од}_{ел} – СРМ^{од}_{ел})/100 \cdot WM_р, \text{ грн.} \quad (7.15)$$

де $WM_р$ – річний обсяг реалізованої ел.енергії зі скороченими витратами на власні потреби на 20%,

$$WM_р = W_в \cdot (1 – qм^{вп}/100), \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (7.16)$$

де
$$qм^{вп} = 0,8\ q^{вп}, \quad (7.17)$$

$$q^{вп}_С = 4,22\%.$$

$$WM_р = 7,8 \cdot 10^9 \cdot (1 – 3,38/100) = 7,54 \cdot 10^9, \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Собівартість продукції, з урахуванням зменшення витрат на власні потреби $СРМ^{од}_{ел}$ визначається за виразом:

$$СРМ^{од}_{ел} = СР^{од}_{ел} (1 – Ап*(1 – W_р/WM_р)) \quad (7.18)$$

$$СРМ^{од}_{ел} = 5 \cdot (1 – 0,27 *(1\text{-}6,76*10^9 /7,54 \cdot 10^9)) = 4,92 \text{ коп.}$$

$$Е_{вп} = (5 – 4,92)/100 \cdot 7,54 \cdot 10^9 = 603200, \text{ грн.}$$

Підставляючи числові значення, розрахуємоекономію (Е) від провадження методики:

$$Е = 31959200 + 603200 + 135000 – 3944277 = 2875312, \text{ грн.}$$

Приріст чистого прибутку визначається так:

$$dП = К_е \cdot Е, \text{ грн.} \quad (7.19)$$

де Ке – коефіцієнт економічної ефективності ($К_е = 0,7$):

$$dП = 0,7 \cdot 2,9 \cdot 10^6 = 7889000, \text{ грн.}$$

Термін окупності ($Т_о$) додаткових капіталовкладень ($dК = К$) визначається:

$$Т_о = К_{САУ} *(1+\alpha_а + \alpha_р + \alpha_{зсв}) / dП, \text{ років} \quad (7.20)$$

де $\alpha_а$ – додаткові нарахування на амортизацію ($\alpha_а = 0,14$);

$\alpha_р$ – додаткові нарахування на поточний ремонт ($\alpha_р = 0,01$);

$\alpha_{зсв}$ – доля загально станційних витрат, визначена додатковими капіталовкладеннями ($\alpha_{зсв} = 0,20$).

$$Т_о = 8884206 \cdot (1+0,14 + 0,01+0,20)/7889000 = 2 \text{ роки.}$$

Данні по розрахунку зведені в таблиці 7.3.

Таблиця 7.3 – Річна економія експлуатаційних витрат

Розрахунок економічного ефекту від впровадження методикипроцесу теплової обробки в термічних печах	
Економія від модернізації Е	2875312 грн.
Економія від зменшення кількості пусків через зниження відмовЕп	135000 грн.
Економія у зв'язку з підвищенням надійності ЕС $Е_н$	31959200 грн.
Економія у зв'язку зі скороченням витрат електроенергії на власні потреби $Е_{вп}$	603200 грн.
Вартість річних експлуатаційних витрат В	8884206 грн.
Приріст чистого прибутку dП	7889000 грн.
Термін окупності додаткових капіталовкладень $Т_о$	2 роки

Висновок. В результаті проведеного розрахунку економічних показників були визначені капітальні витрати на будівництво, щорічні

витрати, чистий приведений прибуток, внутрішня норма прибутку, індекс доходності, термін окупності проекту, рентабельність і так далі. Термін окупності проекту 2 року, що свідчить про його ліквідність, тобто можливості повернути витрачені спочатку засоби на реалізацію проекту за можливо менший термін.

ВИСНОВКИ

На основі математичного моделювання та експериментальних досліджень досліджено залежність розподілу температур по ширині печі в період витримки, а також сумарної витрати палива на нагрів металу від коефіцієнта витрати повітря.

На основі досліджень фізичної моделі пальника досліджено функціональну залежність довжини факела від сумарної площі отворів у газовому каналі та площі перерізу розсікачів газоповітряної суміші, що в перспективі дозволить забезпечити керований теплоперенос у робочому просторі печі.

Досліджено методику визначення тривалості імпульсів подачі палива та повітря у робочий простір печі в період витримки металу на основі динамічних характеристик температури у різних точках по ширині печі.

Запропоновано стартап-проєкт зі створенням системи що оцінює ефективність процесу.

Подані рекомендації що до охорони праці, що відповідають законодавству України.

Проведено техніко-економічні розрахунки.Термін окупності проекту 2 року, що свідчить про його ліквідність, тобто можливості повернути витрачені спочатку засоби на реалізацію проекту за можливо менший термін.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Конституція України : офіц. текст. Київ : КМ, 2013. 96 с.

2. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-XII*Голос України*. 2022. 19серпня. С. 10–22.

3. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підручник вид. 5-те, доп. К. : Знання, 2014. 373 с.

4. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. [Чинний від 1998-12-10]. Вид. офіц. Київ, 1998. 18 с. (Інформація та документація).

5. 90/270/ЄЕС. Про мінімальні вимоги безпеки та здоров'я при роботі з екранними пристроями. [Чинний від 1990-05-29]. Брюссель. : Рада Європейських співтовариств, 1990. 14 с. (Інформація та документація).

6. ПУЕ-2021. Правила улаштування електроустановок. [На заміну ПУЕ-86; чинний з 2021-01-01]. К. : Міненерговугілля України, 2021. 617 с. (Інформація та документація).

7. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисних заходів від ураження електричним струмом. [На заміну ДБН В.2.5-27-2006 ; чинний від 2017-04-01]. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 109 с.(Інформація та документація).

8. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок. [На заміну глав 5.4 5.5 7.1 7.2 7.3 7.4 7.6 Правил устройства электроустановок, затв. Міненерго СРСР 06.07.1984 р. ; чинний від 2002-01-01]. К. : Мінпраці України, 2001. (Інформація та документація).

9. НАПБ А.01.001-14. Правила пожежної безпеки в Україні. [На заміну НАПБ А.01.001-04 ; чинний від 2014-12-30]. К. : МВС України, 2014. 91 с.(Інформація та документація).

10. НПАОП 40.1-1.01-97. Правила безпечної експлуатації електроустановок. [На заміну НАОП 1.1.10-1.01-85 ; чинний з 1997-10-06]. К. : Держнаглядохоронпраці, 1997. 97 с. (Інформація та документація).

11. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. [На заміну ДНАОП 0.00.1.21-84 ; чинний з 1998-01-09]. К. : Мінпраці України, 1998. 89 с. (Інформація та документація).

12. НПАОП 0.00-7.15-18. Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроям. [На заміну НПАОП 0.00-1.28-10 ; чинний від 2018-05-18]. К. : Мінсоцполітики України, 2018. 6 с. (Інформація та документація).

13. ДБН В.2.5-28-2018. Природне і штучне освітлення. [На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний з 2019-03-01]. К. : Мінрегіон України, 2018. 133 с. (Інформація та документація).

14. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Чинний від 1999-12-01]. К. : МОЗ України, 1999. 106 с. (Інформація та документація).

15. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. [На заміну СНиП 2.04.05-91 ; крім розділу 5 та додатка 22. ; чинний від 2014-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2013. 149 с. (Інформація та документація).

16. ДСТУ EN 2:2014. Класифікація пожеж (EN 2:1992; EN 2:1992/A1:2004, IDT). [На заміну ГОСТ 27331-87; чинний з 01.01.2016]. К. : Мінекономрозвитку України, 2014. 7 с.(Інформація та документація).

17. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. [На заміну НАПБ Б.03.002-2007 ; чинний від 2017-01-01]. К. : Мінрегіонбуд України, 2016. 66 с. (Інформація та документація).

18. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги. [На заміну ДБН В.1.1.7-2002 ; чинний від 2017-06-01]. К. : Мінрегіон України, 2017. 47 с.(Інформація та документація).

19. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту. [На заміну ДБН В.2.5-56:2010 ; СНиП 2.04.05-91 (розділи 5 та 22) ; чинний від 2015-07-01]. К. : Мінрегіон України, 2014. 191 с. (Інформація та документація).

20. Правила експлуатації та типових норм належності вогнегасників. [На заміну НАПБ Б.03.001-2004 ; чинний від 2018-02-23]. К. : МВС України, 2018. 23 с.(Інформація та документація).

21. Авраменко В.С., Авраменко А.С. Проектування інформаційних систем: навч. посіб. Черкаси: Черкаський національний університет ім. Б. Хмельницького, 2017. 434 с.

22. Автоматизовані системи управління технологічнимипроцесами: довідник / за заг. ред. Б. Б. Тимофеева ; уклад.Н. Г. Скрипаненко. Київ : Техника, 2003. 351 с.

23. Ананьєв В.П. Синтез і налагодження квазіоптимальних систем підпорядкованого регулювання в металургії: навч. посіб. Київ : Просвіта, 2007. 344 с.

24. Анзимиров Л. В. SCADA TRACE MODE – нові технології для сучасних АСУТП : навч. посіб. Київ : *Автоматизація в промисловості*, 2007. 113 с.

25. Арбузов В. В., Лакиза А. М., Войцицкий В. В., Недельчев П. А., Литвиненко И. А. Створення інтегрованої розподіленої АСУТП енергопостачальної компанії із застосуванням системи TRACEMODE : стаття. Київ : *Промислові АСУ і контролери, № 7*, 2005. 45 с.

26. Вимоги до ергономіки та технічної естетики. URL: http://wikipage.com.ua/1x400f.html (дата звернення: 13.11.2023).

27. Вимоги до системи. URL: https://mydocx.ru/2-120435.html (дата звернення: 13.11.2022).

28. Барішенко О. М. Розробка і дослідження методів і пристроїв теплової обробки сталі в термічних печах з метою енергозбереження : автореф. дис... канд. техн. наук : 05.14.06 / О. М. Барішенко; Дніпродзержин. держ. техн. ун-т. – Дніпродзержинськ, 2008. – 19 с.

29. Кустов К.І., Шершевер М.А. Автоматичне регулювання і регулятори. Київ, Металургія, 2007. 180 с.

30. Манько О. О. Методичні вказівки та завдання до виконання контрольної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології» для студентів заочної форми навчання. Рівне, 2012. 40 с.

31. Манько О. О., Кутя В. М. Методичні вказівки до виконання розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Основи проектування систем автоматизації» для студентів, які навчаються за напрямом підготовки 6.050202 «Автоматизація та комп'ютерно – інтегровані технології». Рівне, 2010. 31 с.

32. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Метод.вказівки до вик. курс. проекту для студ. спец. 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництва» ден. та заоч. форм навчання : уклад.: К.С. Архангельська, О.Й.Рішан. Київ : НУХТ, 2005. 223 с.

33. Методичні вказівки до практичних занять з кредитного модуля «Електричні системи керування» навчальної дисципліни «Технічні засоби автоматизації – 2» для студентів напрямку підготовки «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» по спеціалізації «Автоматизація хімікотехнологічних процесів і виробництв» : укладач В. М. Ковалевський, Київ : НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. 60 с.

34. Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації: методичні вказівки до курсового проекту для студентів спеціальності 151

«Автоматизація так комп’ютерно-інтегровані технології» : уклад. А. М. Ніколаєнко. Запоріжжя: ЗДІА, 2016. 34 с.

35. Мочалін В.Н., Кочнев Н.В. Моделювання та дослідження систем автоматичного управління з використанням ПЕОМ: навч. посіб. Київ : КГІІ, 2005. 178 с.

36. Основи охорони праці: підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене. укладен. К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В. Зеркалов, Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров, В.С. Коз’яков, Л. О. Мітюк. за ред. К.Н. Ткачука і М. О. Халімовського. Київ : Основа, 2006. 448 с.

37. Основи проектування систем автоматизації з елементами САПР: метод. вказівки до практичних занять для студ. напряму 0925 «Автоматизація і комп’ютерно-інтегровані технології» ден. та заоч. форм навч. уклад.: В. Г. Трегуб. Київ :НУХТ, 2008. 67 с.

38. Проектування систем керування: конспект лекцій для студентів спеціальності «Автоматизоване управління технологічними процесами» :уклад. М. З. Кваско, Я. Ю. Жураковський, А. І. Жученко, В. В. Миленький. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 279 с.

39. Промислові мікропроцесорні мережі. URL: http://um.co.ua/8/8-11/8-110801.html (дата звернення: 15.11.2023).

40. Ревун М. П. Енергозберігаючі технології нагріву високолегованих та спеціальних сталей : монографія / М. П. Ревун, С. В. Башлій, О. І. Чепрасов, О. М. Барішенко, О. П. Лютий; Запоріз. держ. інж. акад. – Запоріжжя, 2011. 182 с.

41. Рішан О.Й. Метрологія, технологічні вимірювання та прилади: Курс лекцій для студентів спеціальностей: 7.092501 «Автоматизоване управління технологічними процесами» та 7.092502 «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» ден. та заочн. форм. навчан. Київ : НУХТ, 2007. 162 с.

42. Сідлецький В. М., Трегуб В. Г. Проектування систем автоматизації : методичні рекомендації до виконання курсового проекту

для студентів напряму 6.050202 «Автоматизація та комп’ютерно – інтегровані технології» денної та заочної форм навчання : Київ, 2013. 46 с.

43. Трегуб В. Г. Проектування, монтаж та експлуатація систем автоматизації: навч. посібник. Київ : НМК ВО, 2015. 80 с.

44. Пічне обладнання у хімічних та нафтопереробних процесах: навч. посіб. / А.Р. Степанюк. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. 172 с.

45. Голодний, О.С. Заєць. С.С. Термічна обробка вуглецевих сталей: *XI всеукраїнська науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування».* – Київ :КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 98 с.

46. Закономірності процесу високотемпературного оброблення сипучих вуглецевихматеріалів в електричних печах: монографія / Т. В. Лазарєв, А. Я. Карвацький,Є. М. Панов та ін. – Київ: *НТУУ «КПІ»*, 2016. 154 с.

47. Оптимізація систем теплопостачання із використанням економіко-математичного моделювання: монографія / за заг. ред. О. М. Гаврися. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. 209 с.

48. Комп'ютерне моделювання теплових і електричних процесів в електрокальцинаторі / В.І. Лакомський, А.М. Пальті, Д.Д. Юрченко // *Сучасна електрометалургія. № 2 (103).* 2011. 90 с.