МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА КІБЕРФІЗИЧНИХ СИСТЕМ

Кваліфікаційна робота (проект)

магістра

на тему Дослідження способів енергозбереження при тепловій обробці металу термічних печах

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1744
спеціальності Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

освітньої програми Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
В. С. Войцик
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, к.т.н. Барішенко О.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент директор ТОВ «Електротехмаш»
І.А. Курілець

Запоріжжя 2025

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)
Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно -інтегровані технології та робототехніка
Спеціалізація _____
Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____
«____» _____ 20____ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Войцика Владислава Сергійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Дослідження способів енергозбереження при тепловій обробці металу в термічних печах
керівник роботи Барішенко О.М., доцент, к.т.н.,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «19» вересня 2025 року № 1304-с.

2 Строк подання студентом роботи 10 грудня 2025 р.

3 Вихідні дані до роботи технічна документація, технологічні інструкції, дані, отримані під час проходження виробничої практики

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз енергозбереження способів, аналіз моделі нагріву, розробка системи управління.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) структурна схема, функціональна схема автоматизації, схеми технічного завдання, результати аналізу проєкту.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи проєкту	Доц.Барішенко О.М.		

7 Дата видачі завдання 24.01.2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз способів енергозбереження. Постановка задачі дослідження	**27.01-09.02.25**	
2	Математичний опис способів енергозбереження	**26.05-08.06.25**	
3	Аналіз запронованних алгоритмів вирішення недоліків	**09.06-22.06.25**	
4	Розробка системи управління розглянутих способів	**23.06-06.07, 24.11-07.12.2025**	
5	Оформлення презентації	**08.12-14.12.25**	

Студент _____ Владислав ВОЙЦИК
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ Олена БАРІШЕНКО
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Сергій БАШЛІЙ
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Войцик В. С. Дослідження способів енергозбереження при тепловій обробці металу в термічних печах.

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття вищої освіти за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», науковий керівник О. М. Барішенко, Запорізький національний університет, Інженерний науково-навчальний інститут ім. Ю.М. Потебні, кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем. Запоріжжя, 2025.

Нагрівальні печі промисловості є одними з найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів в Україні. Дослідження показують, що питомі витрати палива в печах вітчизняних промислових підприємств значно вище, ніж цей же показник в розвинених країнах. Кількість шкідливих викидів в атмосферу також залежить від ефективності роботи печей. Застосування сучасних теплотехнічних рішень, впровадження раціональних режимів нагріву та автоматизованих систем управління в значній мірі, зумовлюють конкурентоспроможність продукції, рівень виробництва і відповідність теплотехнічних агрегатів передовим вимогам.

Більше 18% споживаного палива в металургійному виробництві витрачається на нагрів металу. Використовувані в даний час режими управління нагрівом, орієнтовані на досягнення максимальної продуктивності печей, виявляються занадто дорогими в сучасних умовах. Застосування оптимальних режимів термічної обробки металу, що мінімізують витрати палива, вимагає перегляду існуючих методів і пристроїв для нагрівання металу в термічних печах.

Ключові слова: режими опалення, термічна камерна піч, витрати палива, імпульсний спосіб, тепловий баланс.

ABSTRACT

V. Vojzhik Investigation of Energy-Saving Methods for Metal Heat in Treatment Furnaces.

Master’s qualification thesis for a higher education degree in specialty 174 "Automation, Computer-Integrated Technologies, and Robotics", Academic Supervisor: O. M. Barishenko, Zaporizhzhia National University, Yuriy Potebnya Engineering Educational and Scientific Institute, Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems. Zaporizhzhia, 2025.

Industrial heating furnaces are among the largest consumers of fuel and energy resources in Ukraine. Studies show that specific fuel consumption in the furnaces of domestic industrial enterprises is significantly higher than the same indicator in developed nations. The volume of harmful atmospheric emissions also directly depends on furnace operating efficiency. The application of modern thermal engineering solutions, the implementation of rational heating regimes, and the deployment of automated control systems largely determine product competitiveness, production standards, and the compliance of thermal units with advanced global requirements.

More than 18% of the fuel consumed in metallurgical production is expended on heating metal. The heating control modes currently in use, which are oriented toward achieving maximum furnace productivity, prove to be overly expensive under modern economic conditions. Implementing optimal metal heat treatment modes that minimize fuel consumption requires a thorough revision of existing methods and devices utilized for heating metal in heat treatment furnaces.

Keywords: heating regimes, chamber heat treatment furnace, fuel consumption, pulse firing method, thermal balance.

ЗМІСТ

ВСТУП 8

1 АНАЛІЗ ІМПУЛЬСНОГО РЕЖИМУ ОПАЛЕННЯ 11

1.1 Оцінка імпульсного режиму опалення 11

1.2 Патентний аналіз 12

1.2.1 Актуальність історичного аспекту предмету 12

1.2.2 Аналіз існуючих патентів 14

1.3 Аналіз сучасного стану теплової обробки сталі у термічних печах 15

2 АНАЛІЗ ВТРАТ ТЕПЛА У РЕГЕНЕРАТИВНИХ НАГРІВАЛЬНИХ КОЛОДЯЗЯХ 28

2.1 Тепловий і температурний режими 28

2.2 Аналіз способів нагріву промислових злитків 32

2.3 Аналіз існуючих способів опалення регенеративного нагрівального колодязя 34

2.4 Призначення та функції які виконує програмно – технічний комплекс автоматичної системи управління нагрівання злитків 37

2.5 Структура програмно-технічного комплексу нагріву злитків 39

3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ПО ШИРИНІ ПЕЧІ 43

3.1. Короткий огляд теоретичних робіт по вирішенню завдань теплообміну в термічних печах 43

3.2. Постановка задачі моделювання теплової обробки металу в термічних печах 44

3.3. Математичне моделювання поля температур в робочому просторі печі 46

3.4. Результати теоретичного експерименту 54

3.5. Експериментальне обгрунтування залежності температури по ширині печі від коефіцієнта витрати повітря 60

4 ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ОПАЛЕННЯ І РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ІМПУЛЬСІВ ПОДАЧІ ПАЛИВА..... 64

4.1. Вибір раціональної системи управління тепловим режимом 64

4.2. Методика визначення тривалості імпульсів на діючих печах 69

4.3. Результати експериментальних досліджень..... 72

ВИСНОВКИ
…….76

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ……77

ВСТУП

Актуальність роботи. Нагрівальні печі промисловості є одними з найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів в Україні. Дослідження показують, що питомі витрати палива в печах вітчизняних промислових підприємств значно вище, ніж цей же показник в розвинених країнах. Кількість шкідливих викидів в атмосферу також залежить від ефективності роботи печей. Застосування сучасних теплотехнічних рішень, впровадження раціональних режимів нагріву та автоматизованих систем управління в значній мірі, зумовлюють конкурентоспроможність продукції, рівень виробництва і відповідність теплотехнічних агрегатів передовим вимогам.

Більше 18% споживаного палива в металургійному виробництві витрачається на нагрів металу. Використовувані в даний час режими управління нагрівом, орієнтовані на досягнення максимальної продуктивності печей, виявляються занадто дорогими в сучасних умовах. Застосування оптимальних режимів термічної обробки металу, що мінімізують витрати палива, вимагає перегляду існуючих методів і пристроїв для нагрівання металу в термічних печах.

Таким чином, комплексне вирішення проблеми підвищення якості нагріву металу в нагрівальних печах, зниження витрати палива за рахунок впровадження імпульсного режиму нагріву визначає актуальність розвитку наукових основ тепломасообмінних процесів при нагріванні металу в промислових печах.

Мета і задачі дослідження. Метою магістерської роботи є дослідження застосування імпульсного способу в системі опалення та розробка системи автоматизованого управління у нагрівальних печах. Як удосконалення пропонується впровадження імпульсного способу опалення, розробка автоматичної системи управління.

Об'єкт дослідження: режими опалення у нагрівальних печах.

Предмет дослідження: термічна камерна піч та регенеративний нагрівальний колодязь з опаленням із цента поду.

Методи дослідження: Для досягнення поставленої мети роботи необхідно вирішити наступні завдання:

– провести аналіз і узагальнити наукову інформацію про сучасні напрямки опалювання нагрівальних печей;

– теоретично обґрунтувати ефективність застосування імпульсного режиму опалення в промислових нагрівальних печах;

– визначити принципи імпульсного способу опалення в нагрівальних печах за рахунок конструктивних параметрів печі і її елементів;

– провести теоретичні дослідження на основі теплового балансу, при зміні витрати палива, маси посаду.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. На основі математичного моделювання та експериментальних досліджень

приведено відношення температур розподілу по ширині печі в період витримки та загальному витраті палива на нагрівання металу від коефіцієнта витрати повітря.

2. Вперше розроблена методика визначення тривалості імпульсів подачі палива та повітря в робочу поверхню печі в період витримки металу на основі динамічних характеристик температури в різних точках по ширині печі.

3. Створено графічний інтерфейс для розрахунку статей теплового балансу,

проведено теоретичні дослідження на їх основі та встановлено ефективність впровадження удосконаленого способу опалення.

Практичне значення. Практичне значення отриманих результатів роботи полягає в тому, що дослідження теплових втрат дозволять правильно удосконалити режими опалення.

Була розроблена мнемосхема термічної камерної печі, яка відображає процеси, що відбуваються в робочій камері печі під час термообробки металу та у ній впроваджено нову систему управління, яка дозволяє скоротити час нагріву злитків та витрату палива.

Також розроблено графічний інтерфейс для розрахунку теплового балансу.

Особистий внесок дослідника. Теоретичні дослідження виконані автором самостійно. У наукових працях автора, виконаних разом зі співавторами, його особистий внесок полягає: в розрахунку імпульсного способу опалення з постійним часом паузи та розробці системи управління.

1 АНАЛІЗ ІМПУЛЬСНОГО РЕЖИМУ ОПАЛЕННЯ

1.1 Оцінка імпульсного режиму опалення

Одне з безумовних досягнень пічної теплотехніки – сучасний перспективний імпульсний спосіб опалювання нагрівального устаткування. Він має безперечні переваги перед традиційним безперервним аналоговим регулюванням температурного і теплового режимів. За допомогою такого способу опалювання можна досягти і покращувати якість нагріву (рівномірність за всім обсягом садіння металу, відсутність критичних температурних перепадів, значне підвищення конвективної складової теплообміну за рахунок виключення «застійних» зон в аеродинаміці робочого простору, автоматична організація оптимального рециркуляційного потоку димових газів), і, як наслідок, скорочення тривалості термообробки зі всіма витікаючими позитивними наслідками (збільшення продуктивності, зниження витрати палива, раціональніше завантаження виробничих потужностей і т.д.).

Однак, разом з цими перевагами на шляху повсюдного впровадження імпульсного способу опалювання встають наступні бар’єри: 1) існуючий парк пальникових пристроїв агрегату, як правило, не пристосований для роботи в граничних режимах, необхідних для реалізації даного способу; 2) відсутня універсальна методика теоретичного розрахунку тривалості імпульсу подачі палива і тривалості його відсутності, що дозволяє ще на передпроектному етапі підібрати необхідні пальникові пристрої і систему автоматичного регулювання для будь-якого агрегату; 3) напрацьований позитивний досвід впровадження і позитивні результати неможливо тиражувати в широких масштабах через відсутність тієї ж методики. Цьому актуальному питанню, а саме розробці методики теоретичного розрахунку тимчасових параметрів імпульсного способу опалювання, і присвячено цю роботу [1].

Якщо нагрівальний агрегат розглянути з точки зору теорії автоматичного управління – як об’єкт регулювання, то в ньому вхідним сигналом є витрата палива, а вихідним сигналом –прийнята температура.

Розрахунок параметрів імпульсного опалювання здійснюємо шляхом дослідження динамічних характеристик об’єкту. При цьому основними параметрами є тривалість імпульсів і пауз між ними [2].

1.2 Патентний аналіз

1.2.1 Актуальність історичного аспекту предмету

Сучасні нагрівальні печі являють собою високомеханізовані агрегати, що задовольняють технологічним і екологічним вимогам, проте життя висуває нові завдання розвитку пічної техніки. Вимоги до роботи нагрівальних печей включають в себе:

- забезпечення заданої продуктивності;

- забезпечення якості нагріву, що задовольняє технологів по структурі і за механічними властивостями металу, по мірі утворення окалини і зневуглецювання;

- ефективне використання палива, характеристикою якого є питома витрата енергії на одиницю продукції умовного палива на 1 тонну продукції;

- відповідність екологічним нормам по гранично допустимому викиду в атмосферу пилу і шкідливих газів: CO, CO2, NOx, SO2, C20H12 та інших вуглеводнів;

- механізація праці при експлуатації і ремонті печі та автоматизація її теплового режиму. Інтегральним економічним показником технології нагріву та конструкції печі є собівартість нагріву і термін окупності капіталовкладень в будівництво або реконструкцію печі при гарантованій якості продукції і відповідно екологічним нормам. Актуальність вимог до роботи печей з плином часу зазнає трансформацію. Наприклад, в період індустріалізації найбільш актуальною була задача підвищення

продуктивності печей головним чином шляхом збільшення їх теплової потужності. Вирішальний вплив рівня теплової потужності на продуктивність печі в той час обгрунтував автор енергетичної теорії печей, професор Дніпропетровського металургійного інституту І.Д.Семікін [4]. В даний час продуктивність печі є варійованим фактором. Одну і ту ж продуктивність можна забезпечити при роботі однієї або декількох печей. Існує поняття оптимальної продуктивності печі, відповідної мінімуму витрати енергії на нагрів металу, або мінімуму собівартості нагріву. На передній план при конструюванні печей висувається вимога ефективного використання палива та інших ресурсів, тобто проблема енерго- та ресурсозбереження. У зв'язку з цим змінюється актуальність наукових проблем конструювання печей. Наприклад, втратила своє значення завдання інтенсифікації теплообміну в печах, як засіб підвищення швидкості нагріву, а, значить, і продуктивності нагрівальних печей. Швидкісний нагрів і висока продуктивність сьогодні не є самоціллю, оскільки промислової прак тику потрібні не рекорди, а економічна доцільність.

Таким чином, нагрівальні печі металургії і машинобудування сьогодні і в найближчому майбутньому повинні забезпечувати:

- високу рівномірність і стандартність нагріву виробів на основі управління процесами руху газів і спалювання палива;

- глибоку утилізацію теплоти відхідних газів на рівні 85 90%, зокрема із застосуванням малогабаритних регенераторів для нагріву повітря і, в разі необхідності, газоподібного палива з дотриманням еко- логічних вимог;

- мінімальні втрати теплоти на розігрів футеровки і через елементи конструкції печей в навколишнє середовище шляхом використання вогнетривких і теплоізоляційних волокнистих виробів;

- малоокислюванний режим нагріву зі зниженням втрат металу в окалину до 0,5% маси нагріваються виробів. Актуальним науковим напрямком розвитку нагрівальних печей є розробка нових пальників для об'ємного спалювання палива з високотемпературним повітрям, а також

систем опалення нагрівальних і термічних печей з малогабаритними регенераторами.

1.2.2 Аналіз існуючих патентів

Патент на корисну модель. Власник патенту Запорізька державна інженерна академія. Автори патенту: Ревун Михайло Павлович (UA); Яковлева Ірина Геннадіївна (UA); Мних Ірина Миколаївна (UA); Барішенко Олена Миколаївна (UA).

Формула патенту. Камерна термічна піч, в робочому просторі якої розташований нерухомий під, під яким знаходиться підподова топка з пальниками і каналами відводу продуктів згоряння, що через збірний колектор з'єднані з димарем. В підподовій топці на протилежній стіні від розміщення пальників знаходяться сопла повернення продуктів горіння, за соплами в кладці печі розміщені канали повернення продуктів згоряння, що з'єднані через розподільний колектор та димосос з каналами відводу продуктів згоряння.

Патент на корисну модель. Власник патенту Запорізька державна інженерна академія. Автори патенту: Ковлєва Ірина Геннадіївна (UA); Мних Ірина Миколаївна (UA); Баришенко Олена Миколаївна (UA).

Формула патенту. Камерна термічна піч, в робочому просторі якої розташований нерухомий під, під яким знаходиться підподова топка з пальниками і каналами відводу продуктів згоряння, що через збірний колектор з'єднані з димарем, в підподовій топці на протилежній стіні від розміщення пальників знаходяться сопла повернення продуктів згоряння, які з'єднані з каналами повернення продуктів згоряння, що розташовані в кладці печі. При цьому піч містить канали відводу повернення, які розташовані між каналами подачі повернення та з'єднані ежектором [5].

Проаналізувавши існуючі патенти, можна зробити висновок, що швидкісний нагрів і висока продуктивність сьогодні не є самоціллю, оскільки промислової практику потрібні не рекорди, а економічна доцільність. Економічного використання енергетичних ресурсів можна досягти шляхом

контролю та зменшення витрат. Впровадження нової конструкції або нових режимів опалення дозволить значно скоротити енергетичні витрати [6].

1.3 Аналіз сучасного стану теплової обробки сталі у термічних печах

Енергоспоживання термічних печей визначається за технологією опалення, яка представляє собою сукупність операцій і прийомів, пов'язаних з підготовкою, транспортуванням горючих газів і окислювачів, їх змішуванням і спалюванням, а також видаленням продуктів згорання. Існує кілька різновидів технологій опалення з практично однаковою технічною реалізацією, але відрізняються алгоритмами підготовки окислювачів і горючих газів, способами і місцем їх введення в робочі камери печей. Адекватність технології опалення технологічних процесів термообробки, температурних графіків, оцінити техніко-економічні показники, визначити рекомендації з вибору технології опалення та систем управління. Основна частина досліджень. Традиційна технологія опалення. До недавнього часу найбільшого поширення на нагрівальних і термічних печах отримала технологія опалення, яка використовує смолоскипна спалювання газу і реалізує першу або другу теплову схему. При цьому процеси горіння і теплообміну суміщені в просторі робочих камер печей і не вдається забезпечити технологічно необхідну точність і стандартність нагрівання садки. В останні роки здійснили перехід на рециркуляційні технології, де процеси горіння газу і теплообміну розділені в просторі. Горіння палива виносять з робочих камер і здійснюють в спеціальних вузлах підготовки горючого середовища з використанням охолоджених газів. Паливо змішують з повітрям і спалюють у винесених топках за першою схемою - з коефіцієнтом витрати повітря а = 1,05 ... 1,15 або за другою схемою - з перемінним коефіцієнтом витрати повітря. Можливе використання трьох способів введення: - введення його безпосередньо в робочу камеру печі; - підмішування в паливо-повітряну суміш до початку горіння; - підмішування

до повітря до підведення до пальникових пристроїв. При застосуванні третього способу введення, горіння палива відбувається стабільно тільки до певної міри розведення повітря продуктами горіння, яка залежить від типу і режимних параметрів пальників. При збільшенні вмісту продуктів горіння в підводиться повітрі більше деякого порогового значення факел стає нестабільним, відбувається його відривання і, як наслідок, згасання. У всіх випадках в робочій камері підтримують деяку температуру, близьку до заданої величини [7,8]. При зміні теплової потужності змінюється не тільки кількість газів, які вводяться, а й кількість газів, що беруть участь в теплообміні, що призводить до зміни умов теплопереходу по поверхні виробів і, як наслідок, порушення рівномірності нагріву. Другу теплову схему найчастіше забезпечують шляхом підтримки витрати повітря постійною на деякому максимально допустимому рівні протягом всього циклу термообробки.

На сьогодні склалася думка, що збільшення витрати повітря, що подається в піч для горіння, сприяє окисленню металу, і, як наслідок, зниження техніко-економічних показників. Однак, результати досліджень останніх років спростовують таку думку. Хоча дана робота виконана стосовно до високотемпературних печей, багато висновків є цікавими і для термічних печей. Так, при спалюванні палива з великим коефіцієнтом витрати повітря атмосфера в полум'яній печі за своїм хімічним складом близька до атмосфери електричних печей опору, де окислення значно менше. Існує граничне значення концентрації кисню в атмосфері печі, вище якого додатковий вільний кисень не впливає на угар сталі. При цьому виявляється можливим здійснити малоокислювальний нагрів. Експериментально встановлено, що найбільш інтенсивне окислення металу відбувається при коефіцієнті витрати повітря А = 1,1. У повітряному середовищі чад сталі 10 менше в 1,8 разів, сплаву ВТ1-0 - в 5 разів. Для стали 10 при збільшенні коефіцієнта витрати повітря з 1,1 до 4,5 угар металу зменшується в 1,5 ... 1,7 рази. Оскільки в продуктах горіння відсутній монооксид вуглецю, то не

потрібна додаткова герметизація печі, а також установка пристроїв для допалювання продуктів неповного згоряння газоподібного палива. Другу теплову схему застосовують при багатоступеневих температурних графіках [9].

Тепловіддача від гріючих газів до виробу в основному визначається температурою печі. Залежно від використовуваної теплової схеми і типу пальників змінюється і спосіб регулювання горіння. Так, при першій схемі витрата повітря повинна змінюватися відповідно до витрати палива, для чого в системі автоматичного регулювання застосовують регулятори співвідношення «паливо-повітря» або спарені газоповітряні дроселі. При роботі за другою схемою витрати повітря, що подається безпосередньо в пальники або в пічні інжектори для створення рециркуляції газів, повинен підтримуватися постійним, в системі обов'язкова наявність регулятора витрати повітря. Можливе застосування комбінованої теплової схеми, при якій в початкові періоди нагріву витрата повітря змінюється відповідно до витратою палива, а в кінці цього періоду і в період витримки підтримується постійним. Технологія стадійного спалювання палива.

Спочатку цю технологію використовували на енергетичних котельних установках з метою зниження викидів в атмосферу канцерогенних оксидів азоту. Надалі дана технологія набула поширення на нагрівальних і термічних печах. Сутність технології стадійного спалювання полягає в організації розподіленого горіння палива в просторі робочої камери за рахунок розподіленого введення повітря по довжині газового потоку і технічно вирішується шляхом розрегулювання за коефіцієнтом витрати повітря пальників і установкою повітряних сопел. При цьому створюються конструктивне або газодинамічне розділені зони, в яких горіння відбувається при нестачі або надлишку повітря, тобто так звані зони «нестехіометричного» спалювання.

Повітря для допалювання продуктів неповного згоряння газоподібного палива вводять за допомогою спеціальних сопел. Двостадійне спалювання

палива з метою зниження температури продуктів горіння застосовують і в виносних топках рециркуляційних термічних печей, де процеси горіння і сумішоутворення розділені. Основна перевага даної технології полягає в можливості вирівнювання температурного поля вздовж газового потоку, а при переході до об'ємного спалюванню - у всьому обсязі, а також можливості реалізації малоокислювального нагріву металевих виробів. При його практичному використанні доводиться вирішувати ряд проблем: - спалення продуктів неповного згоряння палива, що утворюються в зонах підстехіометричного горіння і надходять в зони надстехіометричного спалювання, тобто спалювання високотемпературного палива в потоці; - забезпечення ефективної тепловіддачі від продуктів горіння до виробів; - зменшення сажоутворення, що приводить до зашлакування димових каналів, пальників, а також забруднення поверхні виробів. У багатьох випадках в полум'яних камерних печах конструктивно і технічно не вдається організувати просторово-розподілені зони спалювання палива, підведення вторинного повітря, змішання його з газами. У печах з протяжної траєкторією руху продуктів горіння смолоскипна спалювання можливо перевести в об'ємне як різновид і розвиток стадійної технології. Перехід до об'ємного горіння можливо здійснити шляхом поступового підмішування вторинного повітря до продуктів які не були спалені після першої стадії спалювання в факелі. Так, відомий спосіб опалення термічних колодязів, згідно з яким спалювання здійснюють за рахунок регульованого підсмоктування атмосферного повітря, при цьому забезпечується технологічно достатня рівномірність розподілу температури по висоті колодязя. Існуючі системи управління не можуть забезпечити нормальний режим роботи печей, стримуючи тим самим широке поширення даної технології опалення.

Імпульсне опалення печей. Роботи по теоретичному обгрунтуванню і технічної реалізації технології імпульсного опалення металургійних, в тому числі термічних печах, розпочаті в 70-і роки минулого століття. Ідея

імпульсного опалення полягає в тому, що при управлінні тепловою потужністю печі витрата газу змінюється дискретно і може приймати тільки два граничних значення: максимальне, відповідне найбільш сприятливому розподілу газів в робочій камері і мінімально-допустимий за умовою роботи пальників і забезпечення робочого тиску в печі . При технічній реалізації виникає ряд проблем щодо забезпечення сталої роботи пальників при зміні продуктивності в широкому діапазоні і, зміні коефіцієнта витрати повітря. Велика частина з них на сьогодні вирішена. Так, розроблені нові пальники з широким діапазоном регулювання по продуктивності. Визначено найбільш раціональний варіант формування імпульсів за рахунок переходу від безперервного управління тепловим навантаженням, що застосовується при традиційних технологіях опалення, до релейного двохпозиційного управління. При зміні температури в печі змінюється тривалість імпульсів подачі палива, таким чином, здійснюється Широтноімпульсна модуляція газо-повітряного потоку [10]. Середня за часом теплове навантаження визначається співвідношенням тривалості імпульсу і паузи (скважностью), що встановлює регулятор температури в печі. Істотною перевагою даної технології опалення є те, що для її впровадження не потрібно вносити змін в конструкцію печі. Досить замінити пальники, виконавчі механізми на електро-пневмоклапани і внести зміни в схему управління. Опалення з роздільною подачею паливних газів. Сутність такої технології полягає в тому, що два або більше паливних газів підводять окремо до пальникових пристроїв, змішують в оптимальному співвідношенні і далі суміш спалюється з заданим коефіцієнтом витрати повітря.

Управління тепловою потужністю, що підводиться до печі, здійснюється одночасним впливом на витрати газів і повітря таким чином, щоб забезпечити задані температуру і об'ємний витрата продуктів горіння. Таким чином, виявляється можливим забезпечити необхідний температурний і газодинамический режими протягом усього циклу термообробки. Алгоритм управління представлений системою алгебраїчних рівнянь, рішення яких

виконується методом лінійного програмування з оптимізацією за вартістю палива. При апробації під час періодів нагріву і витримки використовували змішаний газ, частку природного газу по ходу витримки поступово зменшували і до кінця цього періоду спалювали тільки доменний газ, при переході до охолодження підключали додатковий повітря. Таким чином, досягали зменшення споживання природного газу, поліпшення зовнішнього теплообміну за рахунок стабілізації об'ємної витрати пічних газів протягом всього циклу термообробки. При цьому витрата природного газу за рахунок повної або часткової заміни його доменним газом знизився на 70 ... 80%. При технічній реалізації використовують типові системи регулювання витрат газу і повітря, типову систему регулювання тиску і мікропроцесорне обчислювальний пристрій.

На підставі наведеного аналізу літературних даних встановлено, що існує достатня кількість технологій опалення, здатних задовольнити різні вимоги технології нагріву в різних камерних печах. Можливості всіх технологій опалення визначаються ступенем відповідності систем управління вимогам технології і умов роботи. З позиції зменшення споживання природного газу доцільно використання об'ємнорегенеративного способу спалювання палива і опалення з роздільним підведенням паливних газів і комбінуванням їх в процесі спалювання, а з позиції підвищення якості теплової обробки для протяжних печей можна рекомендувати стадійне або об'ємне спалювання, а також імпульсна опалення. Через наявність взаємозв'язку регульованих величин в печі узгодження роботи локальних систем регулювання теплотехнічних параметрів шляхом ручного регулювання завдань не забезпечує постійно зростаючих вимог по оптимізації теплової роботи печей. У зв'язку з цим актуальним є перехід до комплексних автоматизованих систем управління. А також для зменшення теплових витрат актуальним є застосування імпульсного режиму опалення. Відеокадр програми візуалізації роботи нагрівального колодязя зображено на рисунку 1.1.

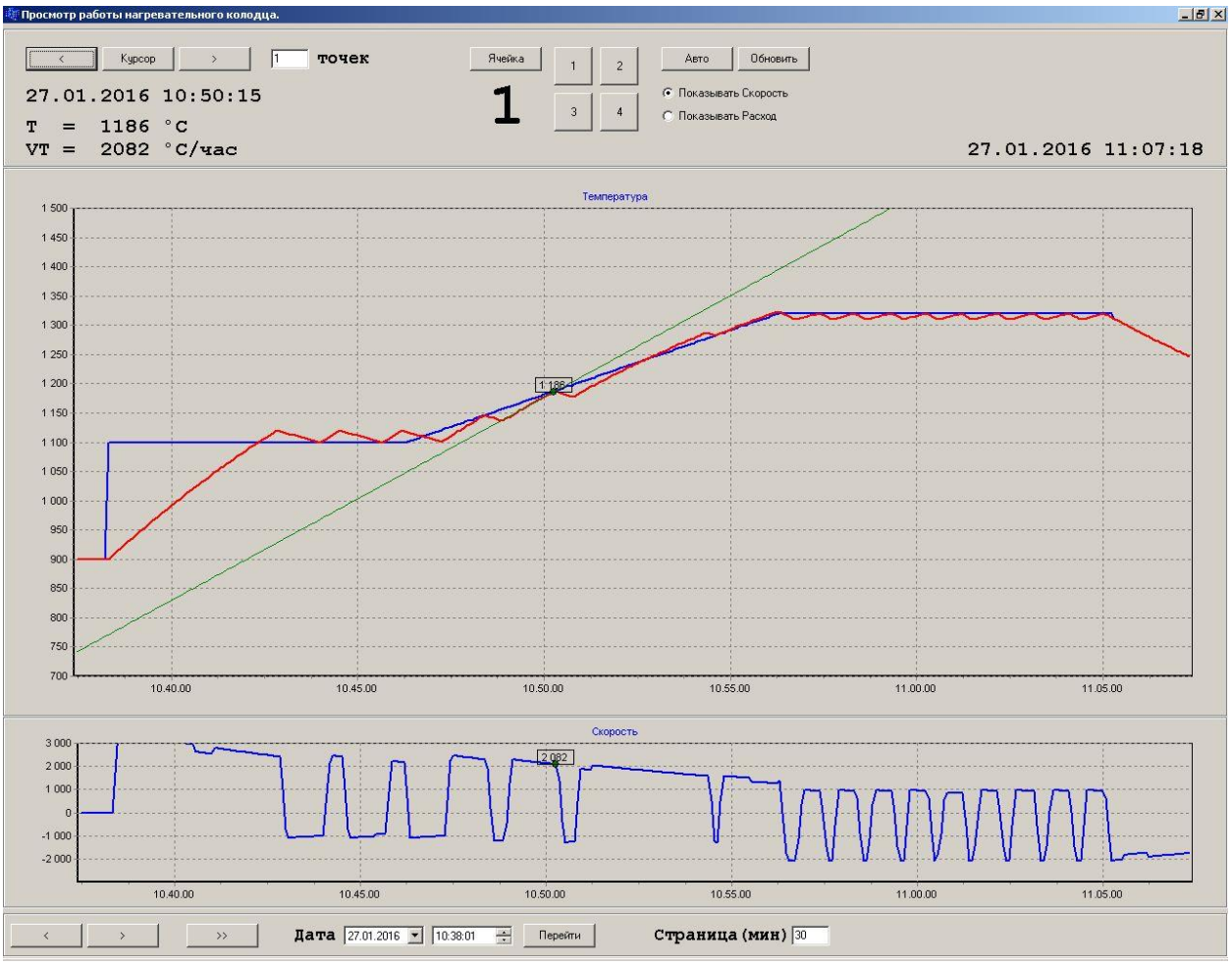


Рисунок 1.1 - Відеокадр програми візуалізації роботи нагрівального колодязя

1. Програма записи трендів високого дозволу «SpeedTermoTrend»

Призначення:

Працює спільно з «SpeedTermoView». Забезпечує запис трендів.

Особливості:

• Для роботи програми на ПК необхідний встановлений і налаштований клієнт БД.

• Програма взаємодіє безпосередньо з контролером за допомогою протоколу ModBus TCP через MBX драйвер, на використовуваному для її запуску комп'ютері, цей драйвер повинен бути встановлений і налаштований.

Функціональні можливості (Рисунок 1.2):

Програма може бути запущена на будь-якому підготовленому для цього ПК, передбачається можливість підключення до будь-якого з діючих PLC ПТК

НС ОНК ОЦ (в даний момент діють тільки PLC на групі 4 і полігон), архівувати всі осередки разом або будь-яку кількість будь-яких осередків цього колодязя за вибором користувача.

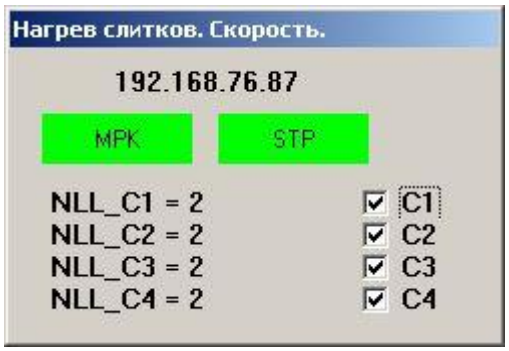


Рисунок 1.2 - Програма записи трендів з високою роздільною здатністю

1. Програма-осцилограф («NS_HL_Actuator»)

Призначення:

Призначення програми-осцилографа - настройка регуляторів, керуючих заслінками газу, повітря і шибера, обраної нагрівальної осередки. Після настройки програма може застосуватися для перегляду реакції виконавчого механізму на керуючий вплив.

Особливості:

• Це автономна програма (все, необхідні для роботи, дані зберігаються в пам'яті самої програми), яка не потребує, будь-яких даних, що зберігаються в таблицях БД і буде запускатися на комп'ютерах без установки будь-яких клієнтів до БД.

• Програма взаємодіє безпосередньо з контролером за допомогою протоколу ModBus TCP через MBX драйвер, на використовуваному для її запуску комп'ютері, цей драйвер повинен бути встановлений і налаштований.

Функціональні можливості (Рисунок 1.3):

• На відеокадрі програми відображаються в реальному часі фактичне і заданий значення миттєвої витрати газу або повітря, або розрідження перед шибером у вигляді безперервно зрушуваної тренда і миттєвих значень.

• Так само на відеокадрі відображається керуючий вплив, що формується PLC і стану кінцевих вимикачів на засувках.

• Всі значення на відеокадрі відображаються для однієї обраної в даний момент заслінки і для вибраної комірки. За допомогою спеціальних кнопок можна перемикати зображення на іншу клітинку або іншу заслінку. Незалежно від того які дані відображаються на відеокадрі в даний момент, накопичення даних в пам'яті програми проводиться для всіх осередків і заслінок одночасно.

• Частота опитування контролера обрана, а ПО ПЛК розроблено таким чином, що будь-який навіть самий незначний управлінський вплив PLC на керовані механізми буде зафіксовано на відеокадрі програми.

• Відеокадр має максимально лаконічний дизайн для забезпечення низького порогу входження користувача без спеціальної підготовки і миттєвого осмислення користувачем суті того, що відбувається на об'єкті.

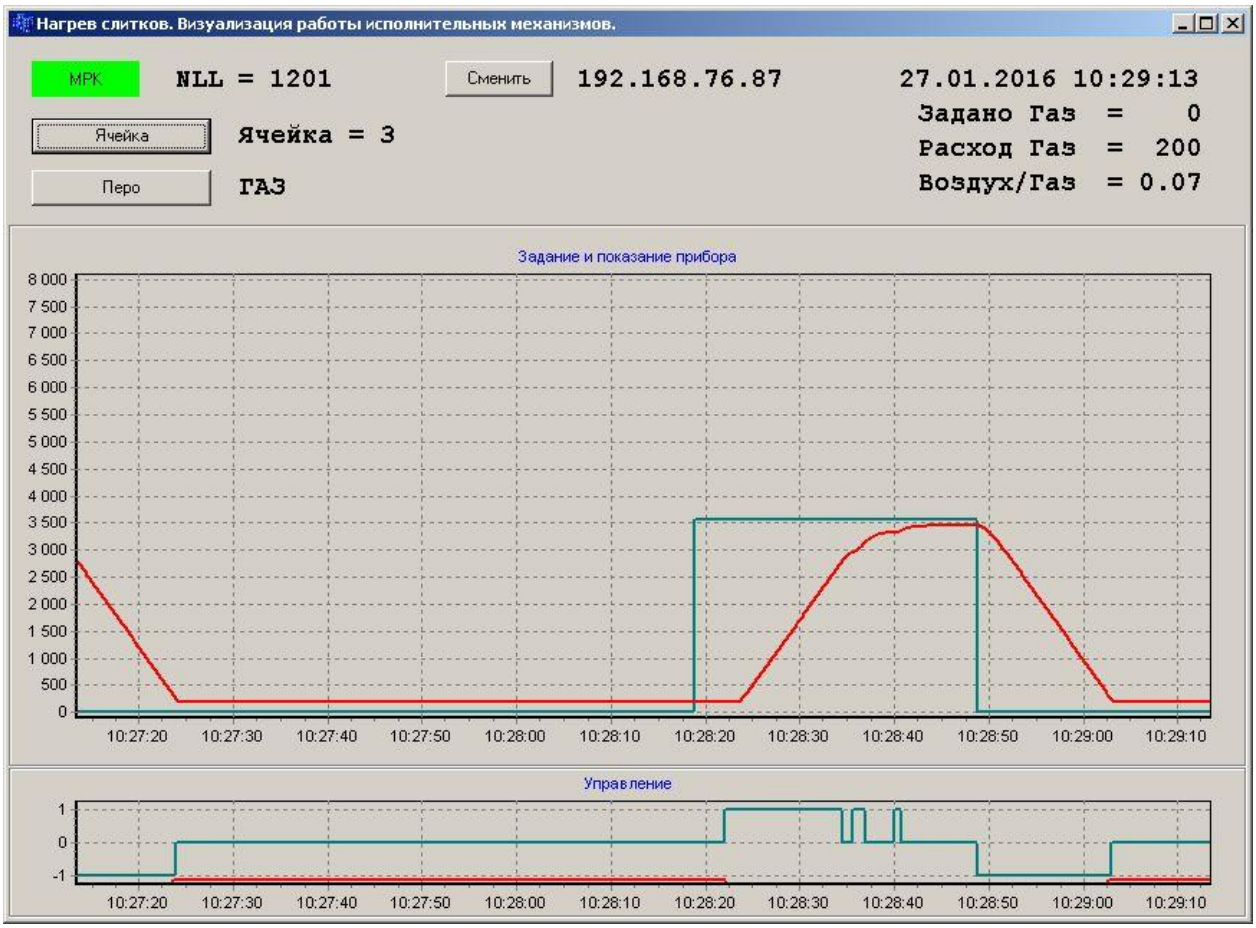


Рисунок 1.3 - Відеокадр програми-осцилографа

1. Налагоджувальні програма, що забезпечує можливість роботи ПО ПЛК НУ ПТК НС ОНК ОЦ без ВУ («NUNS Manager»)

Призначення:

Програма використовується розробниками під час написання, налагодження, випробування, дослідної експлуатації, ремонту або зміни ПО PLC НУ ПТК НС ОНК ОЦ наприклад в порядку безперервного вдосконалення, розширення функціональності системи і подібних випадках в яких розробники визнають доречним її використання.

Особливості:

• Програма використовує дані попередньо накопичені в таблиці БД. Для роботи програми на ПК необхідний встановлений і налаштований клієнт БД.

• Програма взаємодіє безпосередньо з контролером за допомогою протоколу ModBus TCP через MBX драйвер, на використовуваному для її запуску комп'ютері, цей драйвер повинен бути встановлений і налаштований.

• Крім прямої взаємодії з ПЛК програма працює з раніше накопиченими даними іншого, спеціально для цього розробленої програми накопичення даних («NS_HL_Trend» читати абзац 0). Видимість роботи з такими даними в реальному часі забезпечується одночасним запуском цієї програми і програми накопичення даних («NS_HL_Trend») як на цьому, так і на будь-якому іншому зручному розробнику в даний момент часу ПК.

Функціональні можливості (Рисунок 1.4):

• На відеокадрі програми відображаються в реальному часі ряд ключових параметрів процесу нагріву злитків, наприклад: фактичні значення миттєвої витрати газу, повітря і розрідження перед шибером

• Також у вигляді трендів відображаються раніше накопичені значення миттєвих значень витрат газу і повітря, миттєве значення розрідження перед

шибером. Передбачено управління переглядом раніше накопичених даних у вигляді простого навігатора.

• Всі значення на відеокадрі відображаються для однієї обраної в даний момент осередку. За допомогою спеціальних кнопок можна перемикати зображення на іншу клітинку.

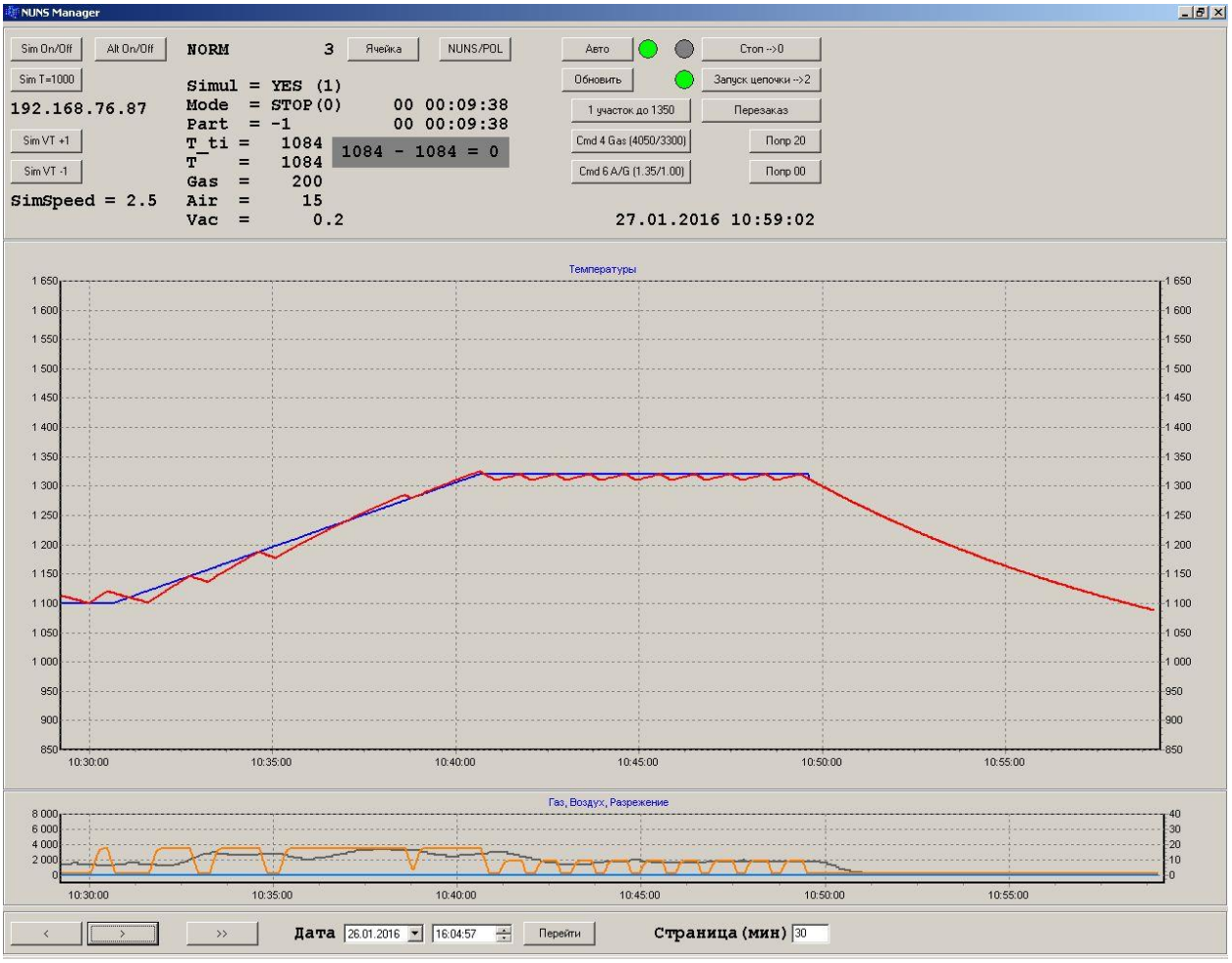


Рисунок 1.4 - Налагоджувальні програма, що забезпечує можливість роботи ПО PLC

1. Програма записи трендів високого дозволу «NS_HL_Trend» (налагоджувальна)

Призначення:

Працює спільно з «NUNS Manager». Забезпечує запис трендів.

Особливості:

• Для роботи програми на ПК необхідний встановлений і налаштований клієнт БД.

• Програма взаємодіє безпосередньо з контролером за допомогою протоколу ModBus TCP через MBX драйвер, на використовуваному для її запуску комп'ютері, цей драйвер повинен бути встановлений і налаштований.

Функціональні можливості (Рисунок 1.5):

Програма може бути запущена на будь-якому підготовленому для цього ПК, передбачається можливість підключення до будь-якого з діючих ПЛК ПТК НС ОНК ОЦ (в даний момент діють тільки ПЛК на групі 4 і полігон), архівувати всі осередки разом або будь-яку кількість будь-яких осередків цього колодязя за вибором розробника.

Функціональні можливості (Рисунок 1.5):

• На відеокадрі програми відображаються в реальному часі ряд ключових параметрів процесу нагріву злитків, наприклад: фактичні значення миттєвої витрати газу, повітря і розрідження перед шибером

• Також у вигляді трендів відображаються раніше накопичені значення миттєвих значень витрат газу і повітря, миттєве значення розрідження перед шибером. Передбачено управління переглядом раніше накопичених даних у вигляді простого навігатора.

• Всі значення на відеокадрі відображаються для однієї обраної в даний момент осередку. За допомогою спеціальних кнопок можна перемикати зображення на іншу клітинку.

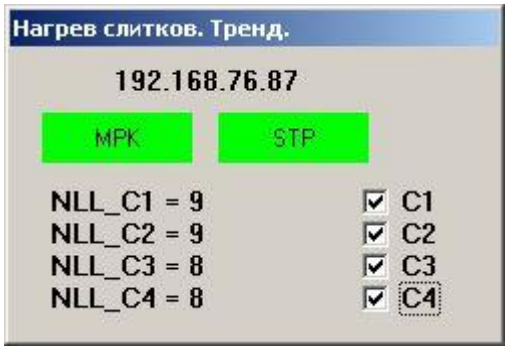


Рисунок 1.5 - Програма записи трендів з високою роздільною здатністю (налагоджувальна)

У першому розділі виконаний аналіз сучасного стану питання, проведений літературний пошук в галузі вибраної тематики, зокрема: особливості, недоліки і переваги роботи термічних печей, пристрої і режими теплової обробки сталі в термічних печах [12]. Результати аналізу показали, що одними з головних питань є економія газоподібного палива і поліпшення якості теплової обробки металу в печах.

Основними недоліками термічних печей є: нерівномірність нагріву за об'ємом садки, особливо при низькотемпературних режимах обробки і технологічної витримки, де нерівномірність нагріву не повинна перевищувати 0С; відсутність надійного автоматичного управління в широкому діапазоні зміни температурних режимів (300…1000) 0С; низька ефективність використання палива та підвищені його питомі витрати; низький коефіцієнт корисної дії.

У цій ситуації виникає необхідність пошуку оптимальних режимів роботи на основі математичних моделей за допомогою сучасних методів моделювання, які можна застосовувати для всієї різноманітності термічних печей.

Підвищення якості теплової обробки і зменшення витрати газоподібного палива можна досягти за допомогою удосконалення пальникових пристроїв і застосування перспективного імпульсного способу опалювання.

При використанні імпульсного способу опалювання не вирішене питання тривалої експлуатації системи за умови застосування електричних виконавчих механізмів.

Розглянуті раніше застосовувані розробки не враховували динаміку об'єкта, що знижувало ефективність систем імпульсного опалювання [13].

2 АНАЛІЗ ВТРАТ ТЕПЛА У РЕГЕНЕРАТИВНИХ НАГРІВАЛЬНИХ КОЛОДЯЗЯХ

Прокатний переділ займає друге місце, після доменного виробництва за витратами енергії на виготовлення готової продукції, причому 95% припадає на частку газу і електроенергії. На нагрів заготовок під прокатку в печах доводиться 60%, а безпосередньо на прокатку - 40% енерговитрат. В якості палива для нагрівальних печей використовується природний газ - 40%, коксовий газ - 30%, доменний газ - 25%, і 5% мазут.

Нагрівальні печі відносяться до основного обладнання прокатних цехів. У більшості випадків помилки, що виникають при нагріванні металу, вже не можуть бути виправлені. Від їх роботи значною мірою залежать обсяг, якість і економічність виробництва прокату продуктів які виробляються у цих печах.

У зв'язку з переходом на використання безперервнолитої заготовки зливковий переділ поступово прибирають з заводів і кількість нагрівальних колодязів перебувають в експлуатації скорочується. Однак нагрівальні колодязі все одно будуть використовуватися при виробництві прокату зі спеціальних марок сталей і плит на товстолистових станах.

Зростаючі вимоги до якості продукції та її конкурентоспроможності на світовому ринку сприяють перегляду підходу до конструювання нагрівальних паливних печей, організації процесів горіння газоподібного палива і його раціонального використання, розробки сучасних алгоритмів управління металургійними агрегатами і методів оптимізації виробничих процесів.

2.1 Тепловий і температурний режими

Сучасні нагрівальні колодязі є камерними печами періодичної дії зі змінним у часі тепловим і температурним режимом. У більшості

нагрівальних колодязів нагрівання металу здійснюється садками, тобто після видачі всіх нагрітих злитків осередку колодязів знову завантажують злитками. При видачі та посадці злитків в результаті частого відкривання кришки кладка робочого простору нагрівальних колодязів охолоджується. Тому при роботі колодязів на гарячому посаді в перший момент нагріву температура злитків вище температури поверхні кладки і основний споживач тепла в цей період - кладка колодязя. На рис. 1.1 показаний температурний режим і приведений тепловий баланс колодязя при нагріванні злитків гарячого посаду для різних періодів нагріву.

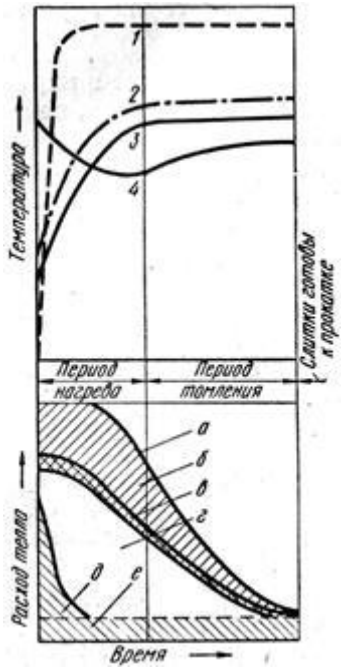


Рисунок 2.1 - Температурний режим і тепловий баланс нагрівального

1 - температура кришки; 2 - температура відхідних газів; 3 - температура поверхні злитка; 4 - температура середини злитка; а - загальна витрата тепла; б - втрати тепла з продуктами згоряння; в - втрати тепла внаслідок неповноти горіння палива; г - витрата тепла на нагрів металу; д - тепло, поглинене кладкою, охолодженої при відкриванні колодязя; е - втрати тепла через кладку

колодязя при нагріванні зливків гарячого посаду:

З рисунку 2.1 видно, що в початковий період нагрівання подають максимальну кількість тепла, відповідно теплової потужності колодязів. Після того, як кладка досягне своєї робочої температури, починається інтенсивний нагрів металу. Витрата тепла підтримують максимальною до тих пір, поки температура тієї частини злитка, яка нагрівається швидше, не досягне граничного значення. Цей період називається періодом нагріву. Слідом за ним наступає період витримки, протягом якого відбувається поступове зменшення витрат тепла, так як протягом цього часу температура поверхні злитків залишається постійною і тепло витрачається тільки на прогрів злитку по перерізу. У цей період температура відхідних продуктів згоряння залишається приблизно постійною.

Теплову потужність нагрівальних колодязів вибирають так, щоб забезпечити швидкий підйом температури кладки і поверхні злитків на початку нагріву. При заниженій теплової потужності період нагрівання затягнеться, а період витримки скоротиться, і повний цикл нагріву буде нераціонально великим. При завищеній максимальній витраті палива період нагрівання скоротиться, але збільшиться нерівномірність температури по перетину злитка і період витримки затягнеться. Це також викликатиме надмірне збільшення тривалості повного циклу нагрівання.

На роботу нагрівальних колодязів дуже великий вплив робить початкова температура злитків. Зазвичай нагрівальні колодязі працюють великою мірою на гарячому посаді, тобто в комірку для нагрівання до температури прокатки (близько 1200 ºС) поміщають ще не повністю остиглі після розливання злитки, температура яких 700 - 850 ºС. Чим вище відсоток гарячого посаду і початкова температура злитків, тим більше продуктивність нагрівальних колодязів і тим нижча питома витрата тепла на нагрівання металу. Відсоток гарячого посаду і початкова температура злитків залежать від рівня організації виробництва на даному підприємстві. На тих заводах, де культура виробництва досить висока, гарячий посад досягає 95%, а початкова температура злитків перед нагріванням 800 - 850 ºС.

На рисунку 2.2 наведені дані, що показують залежність повної тривалості нагріву від температури посаду 7-т зливків і величини теплової потужності.

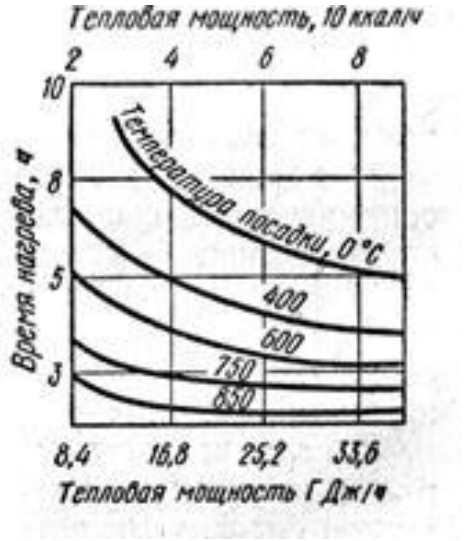


Рисунок 2.2 - Залежність тривалості нагріву від температури поверхні злитків і теплової потужності колодязя

З рисунка 2.2 видно, що вплив теплової потужності тим більше, чим нижче температура посада злитків, так як чим вище температура посада, тим коротший період нагріву і нижче максимальна витрата палива.

Оптимальне значення теплової потужності (за хімічним теплом палива) лежить в межах 200 - 300 МДж/т садки. Робоча температура в нагрівальних колодязях становить 1350 - 1400 ºС. Для забезпечення такої робочої температури потрібно спалювати паливо так, щоб калориметрична температура горіння досягала 2100 - 2200 º С.

У нагрівальних колодязях регенеративного типу вкрай недосконала система спалювання палива, що тягне за собою істотні недоліки. Горіння палива практично починається над газовими регенеративними насадками, через які подається паливо, протікає в робочому просторі і закінчується в протилежних насадках. Це призводить до нерівномірності нагрівання садки металу, так як злитки, розташовані ближче до регенератора, нагріваються значно швидше, ніж злитки в середній частині робочого простору. Другий

істотний недолік викликаний тим, що для автоматизації теплового процесу печі завжди необхідно правильно вибрати в робочому просторі таку точку, по зміні температури якій можна будувати процес автоматизації. В регенеративних колодязях надійно вибрати таку точку неможливо, оскільки в результаті перекидання клапанів і поганого змішування газу і повітря температура може весь час змінюватися по всій довжині робочого об'єму колодязя, причому можливі і випадкові коливання температур.

2.2 Аналіз способів нагріву промислових злитків

Найбільш ефективним шляхом створення енергозберігаючих теплотехнологій є розробка і реалізація режимів гарячого посаду великотоннажних (блюмінговий і слябінгових) злитків в нагрівальні пристрої, в тому числі з незатверділої серцевиною. За даними роботи, при підвищенні середньої температури посада злитків в нагрівальні пристрої (рекуперативні і регенеративні колодязі) на 100 °С середня величина зниження питомих витрат умовного палива складає 4,8 кг у.п./т, а чаду металу - 3-4% в результаті скорочення тривалості перебування злитків в камері колодязя. Впровадження таких режимів нагріву може бути здійснено з мінімальними витратами, пов'язаними в основному з організацією транспортування злитків до відділення нагрівальних колодязів з максимальним вмістом рідкої фази.

Виконані комплексні дослідження по вивченню закономірностей нагріву великотоннажних злитків гарячого посаду показали, що основними факторами, що визначають теплотехнічні показники роботи осередків нагрівальних колодязів (питома витрата умовного палива, продуктивність колодязів), є кількість рідкої серцевини в зливку в момент посада і вибір відповідного раціонального температурного режиму.

Існуючі способи нагріву злитків з підвищеним теплосовмістом і в першу чергу з незатверділої серцевиною можна розділити на дві групи:

– нагрів з витримкою без подачі палива;

– нагрів з регламентованої швидкістю підйому температури в робочому просторі в першому періоді нагріву.

Нагрівання злитків з витримкою без подачі палива

Технологія нагріву злитків з витримкою без подачі палива зводиться до того, що після посада злитків в нагрівальний колодязь і закриття кришки паливо або не подають, або подають так звану «чергову витрату» газу, яка необхідна для безпечного запалювання факела пальника при включенні колодязя в роботу. Далі процес, як правило, ведеться за стандартною традиційною технологією, що включає в себе двухперіодний нагрів (в першому періоді підтримку максимальної теплової потужності колодязя $M_{общ}$ = const до виходу на контрольну температуру, в другому - нагрівання при постійній температурі печі $t_п$ = const).

У Дніпропетровському металургійному інституті (нині Національна металургійна академія України) розроблений спосіб нагріву злитків з об'ємом незатверділої серцевини на рівні 20%. При цьому злитки завантажують в колодязь, розігрітий до температури на 50-100 °С нижче середньої температури поверхні злитків, а витримку без подачі палива продовжують до тих пір, поки в зливку не залишиться 5-7% м'якого металу, після чого подається максимальна витрата газу і далі нагрів ведеться за традиційною технологією.

Запропонований спосіб нагріву злитків з рідкою серцевиною, згідно з яким злитки перед посадом в колодязь охолоджуються зі швидкістю 250-350 °С/год до досягнення перепаду температур між центром і поверхнею 500-600 °С. Нагрівання в колодязях здійснюють таким чином, щоб температура поверхні підвищувалася зі швидкістю 160-220 °С/год до заданої температури прокатки, забезпечуючи при видачі перепад температур між центром і поверхнею злитка 150-200 °С. Впровадження такої технології дозволяє домогтися збільшення продуктивності колодязів на 10-30% і скоротити

питому витрату умовного палива на 5-10% і знизити окалиноутворення на 3-5%.

На підставі виконаного огляду способів нагріву злитків з підвищеним тепловмістом і в першу чергу з незатверділої серцевиною виходить, що розробка і реалізація режимів гарячого посаду блюмінговий і слябінгових злитків представляють важливу наукову і технічну задачу як з точки зору дослідження закономірностей процесів підготовки злитків до прокатці, так і з точки зору створення енергозберігаючого технологічного процесу, що передбачає поряд зі значною економією палива збільшення продуктивності металургійних агрегатів.

2.3 Аналіз існуючих способів опалення регенеративного нагрівального колодязя

Основним показником теплової роботи печей є їх економічність за умови дотримання вимог щодо якості оброблюваного матеріалу. Споживання енергії в більшості нагрівальних пристроїв вітчизняних підприємств перевищує рівень, досягнутий в промислово розвинених країнах в кілька, а іноді і в десятки разів. Це пояснюється незадовільною роботою паливосплювальних пристроїв, недосконалістю системи утилізації теплоти димових газів, високими втратами теплоти через огорожу печі і іншими причинами. Технологія також впливає на паливоспоживання печей - нерівномірність і нестандартність нагріву садки змушує штучно затягувати процес обробки матеріалів, що також збільшує споживання палива.

Основною причиною перевитрати енергії, на думку багатьох авторів, є незадовільна утилізація теплоти димових газів. Ряд печей експлуатується і зовсім без теплоутилізаторів. Частка втрат тепла з димовими газами в тепловому балансі нагрівальних печей може досягати 50 і більше відсотків. Тому основним резервом економії палива є повернення теплового потенціалу

димових газів в робочий простір печі з реагентами горіння і, рідше, з матеріалом, що нагрівається.

Як показує досвід експлуатації сучасних нагрівальних печей максимальну економію палива можна отримати, застосовуючи сучасні пальниково-утилізаційні пристрої - в першу чергу - регенеративні пальники. Економія палива при їх застосуванні може досягати 50%. Ефективність роботи регенеративних пальників і теплообмінників з високорозвиненою поверхнею теплообміну пояснюється тим, що в цих пристроях утилізується до 90% теплоти димових газів. З 80-х років минулого століття, коли регенеративні пальники стали активно впроваджуватися у виробництво, по теперішній час реконструйовано практично всі типи нагрівальних печей.

Однак застосування високотемпературного підігріву повітря має і ряд недоліків, які не дозволяють говорити про вирішення проблеми теплотехніки пічних агрегатів і удосконаленню їх теплової роботи.

По-перше, відомо, що утворення оксидів азоту, які є основними забруднювачами при спалюванні палива, прямо пов'язане з температурою факела. Згідно з механізмом утворення оксидів азоту «швидкі» і «паливні» оксиди азоту утворюються в області порівняно низьких температур (1000 - 1900 К) - в кореневій частині факела. Швидкості утворення «швидких» і «паливних» оксидів азоту слабо залежать від температури, але і їх кількість не є визначальним. «Термічні» оксиди азоту утворюються при температурах понад 1300 К. На утримання «термічних» NO_x в продуктах згоряння найбільший вплив роблять: температура факела і продуктів горіння, умови сумішоутворення і температури підігріву компонентів горіння . Зміст оксидів азоту в димових газах залежить, в основному, від кількості «термічних» NO_x, що утворилися при горінні. Таким чином, високотемпературний підігрів повітря в регенераторах регенеративних пальниках призводить до різкого зростання кількості викидів оксидів азоту, не компенсує навіть зниженням витрати палива.

По-друге, високотемпературний факел, що утворюється при використанні регенеративних пальників підсилює ефект нерівномірного нагріву садки як по довжині робочого простору (нестандартність нагріву), так і по перетину нагріваємого металу - за рахунок зростання теплового потоку на поверхні металу, зверненої до факела. До недоліку факельного спалювання в регенеративних печах можна віднести місцевий перегрів і оплавлення металу високотемпературним факелом.

По-третє, з цієї ж причини, інтенсифікується процес окалиноутворення, швидкість якого також залежить від температури середовища і пічної атмосфери.

В даний час є ряд рішень, спрямованих на усунення перерахованих недоліків в паливних промислових печах.

Всі відомі в даний час способи нейтралізації шкідливих викидів промислових печей можна поділити на дві основні групи:

- технологічні методи зниження концентрації шкідливих викидів;

- методи, пов'язані із застосуванням спеціального обладнання для хімічної очистки димових газів. Слід зазначити, що хімічні, сорбційні, окислювально-сорбційні і відновні методи зниження шкідливих викидів дуже дорогі і пов'язані з введенням в технологічні лінії додаткових очисних систем і агрегатів, вартість яких часто перевищує вартість основного обладнання.

До технологічних методів належать:

- підготовка палива (додавання присадок, води і (або) пара, знесірчення палива і ін.);

- впорскування води та (або) пара в повітря горіння;

- впорскування води і додавання пара в осередок горіння;

- штучна і природна рециркуляція;

- поетапне і багатоступінчате спалювання палива;

- спалювання з малим надлишком повітря;

- поліпшення умов теплообміну (підвищення світності факела) і т.д.

Практично, всі перераховані методи спрямовані на зниження температури вогнища горіння або розтягування факела за обсягом печі.

Основним способом досягнення рівномірності нагрівання садки в печах є раціональне управління рухом газів, що забезпечує рівномірний перенесення теплоти до локальних ділянок металу і футерування.

В існуючих печах рівномірності і стандартності нагрівання домагаються шляхом застосування внутрішньої і зовнішньої рециркуляції, реверсу пічних газів, імпульсного нагріву, гойдання пальників, зміни напрямку факела струменем компресорного повітря і іншими способами управління температурним полем. Ці методи також пов'язані, в основному, з усуненням локальних високотемпературних зон факела і створенням для металу стандартних умов нагріву.

2.4 Призначення та функції які виконує програмно – технічний комплекс автоматичної системи управління нагрівання злитків

Ключові особливості розроблюваної АСУ НЗ і її відмінність від працюючої системи АСУ НЗ: нагрів зливків XV, 1Б (Д), 2Б (Д) і 4А типів з обмеженням швидкості підйому температури протягом всього періоду нагріву з урахуванням можливого часу замовлення на видачу зливків в прокат (замовлення від ЦГПТЛ), часу транспортування, калорійності палива та ін. параметрів.

Основні функції системи:

• візуалізація ведення технологічного процесу;

• введення і зміна вихідних даних;

• протоколювання роботи системи;

• автоматичне регулювання в процесі управління нагрівом злитків;

• управління гідравлічним режимом осередку шляхом підтримки заданого розрядження на димовому шибері;

• завдання витрати газу в залежності від часу транспортування злитків.

• інформаційний обмін;

• реверсування факела в осередку відповідно до обраного інтервалу часу перемикання з можливістю його ручного коректування;

• візуалізацію на дисплеї системи ключових моментів процесу подачі палива (через яку форсунку подається паливо, скільки залишилося часу до перемикання і т.п.);

• реверсування факела на ділянці томління злитків (в окремому часовому інтервалі);

• управління подачею газу і повітря в момент реверсу факела

• висновок на дисплей системи відповідних попереджувальних та / або аварійних повідомлень

• подачу аварійного звукового сигналу при несправності виконавчих механізмів;

• введення в автоматичному режимі інформації про калорійність палива, що подається;

• управління витратою повітря в осередку при зміні калорійності газового палива;

• використання даних про калорійність палива, що подається для визначення швидкості підйому температури в осередку;

• ведення технологічного процесу в режимі імпульсної подачі газової суміші і повітря для нагріву злитків першої групи марок сталей;

• ведення технологічного процесу з закінченням нагрівання злитків під час замовлення металу ЦГПТЛ;

• адаптацію працездатності системи без внесення змін до початкового коду програмного забезпечення (обмежена, функціонал в процесі розробки);

• забезпечення високої відмовостійкості і ремонтопридатності системи;

• Забезпечення вимог стандартизації та однаковості ПО, в тому числі ПО АСУ ТП на підприємстві;

• відповідність чинним на підприємстві стандартам, зокрема «Стандарт з архітектури і інтеграції мереж АСУ ТП».

2.5 Структура програмно-технічного комплексу нагріву злитків

Збільшена структура програмно-технічного комплексу нагріву злитків, без вказівки сервісного і допоміжного програмного забезпечення і систем планування нагріву і видачі нагрітих злитків:

1. Збереження в БД всьому технологічному інформації, помилок в роботі ПЛК.
2. Обмін даними з ПО верхнього рівня, протоколювання дій нагревальщікамі, помилок в роботі програмного забезпечення, отримання поточного стану контролера, завантаження завдань з БД та ін ..
3. Доставка зображення з примірника програмного забезпечення з сервера CITRIX на ПК на групі нагр. колодязів.
4. Завантаження завдань на нагрів і керуючих команд, визначення працездатності ПЛК та ін.
5. Передача всієї технологічної інформації сервісу на сервері АСУТП

Функції елементів ПТК АСУ Н3 наступні:

• PLC (ПЛК) - здійснює безпосереднє управління виконавчими механізмами, зберігати в пам'яті весь останній графік нагріву, здійснює контроль ведення нагріву, відповідно до графіків, здійснює автоматичне регулювання нагріву, відповідно до графіка, забезпечує обмін інформацією з верхнім рівнем ПТК НС

• Планшетний ПК - за допомогою Citrix забезпечує можливість взаємодії користувача (нагревальщікамі) і ПО верхнього рівня.

• ПО оператора-нагревальщікамі - виконується на сервері додатків ОАСУТП, трансляція екрану програми виконує Citrix, забезпечує взаємодію технологічного персоналу і ПТК НС, ведення нагріву: відображення необхідної технологічної інформації, по групах, прийом і обробку інформації

від інших систем АСУ комбінату та інформації введеної операторами вручну в БД.

• Служба збору даних -Здійснює функції прийому миттєвих значень параметрів від ПЛК та збереження їх в БД.

• БД - здійснює зберігання і організацію доступу до всієї інформації пов'язаної з роботою ПТК АСУ НС.

Як програмне забезпечення використовується:

• Unity Pro Extra Large (XL) - для контролерів M340.

• DELPHI 2007 - в якості середовища розробки для ПО верхнього рівня ПТК.

• ORACLE - для сервера бази даних.

• SQL / PLSQL - для написання запитів до СУБД.

• -ОС Windows 7 (російська версія) /

• ПО розробки відділу АСУТП, для забезпечення процесу нагріву.

• Citrix - для забезпечення трансляції робочих екранів від сервера додатків до планшетних ПК на групах нагрівальних колодязів.

В якості технічних засобів нижнього рівня вибрати програмований логічний контролер платформи автоматизації Modicon M340 фірми Schneider Electric.

У ПО верхнього рівня входять наступні програми розробки відділу АСУТП:

• АСУ нагріву злитків (NC.exe).

• Служба збору даних (OCNStrendService).

• ПО управління електронними версіями таблиць нагріву (GrafInputProj).

• Програма тестування введення в БД окремих ділянок графіка нагрівання (inputGrafik).

• ПЗ керування перемиканням систем АСУ нагріву (ДОНІКС-ПТК НС - SwitchDONIKS).

• Сервісне ПО по налаштуванню роботи регуляторів на ПЛК (комплекс програм).

• Сервісне ПО тестування зв'язку с PLC по ModBas TCP (TestModbas).

• Сервісне ПО тестування запису / читання трендів нагріву (resident / OCNStrendWriter).

Його користувачі не обслуговують ПТК використовують АСУ нагріву злитків і ПО управління електронними версіями таблиць нагріву, інші програми і служби призначені для використання обслуговуючим персоналом відділу АСУТП, для забезпечення безперервної роботи ПТК НС і мінімізації часу на пошук і усунення несправності в разі появи порушень в роботі ПТК НС .

2.6 Опис інструментального програмного забезпечення програмно – технічного комплексу нагрівання злитків

2.6.1 Програма візуалізації роботи нагрівального колодязя («SpeedTermoView») призначення:

Аналіз роботи ПТК НЗ ОНК ОЦ по історичним трендам миттєвої температури в осередку, миттєвого значення витрати газу і повітря, миттєвого значення розрідження перед шибером і миттєвого значення швидкості зміни температури в осередку. Перегляд поточного процесу нагріву в псевдо реальному часі з високою роздільною здатністю (по треднам, а не по екрану) з відображенням розрахункової лінії миттєвого завдання на нагрів.

Особливості:

• Програма використовує дані попередньо накопичені в таблиці БД. Безпосередньої взаємодії між програмою і ПЛК не відбувається, як наслідок на ПК для запуску цієї програми не потрібно ніяких спеціальних драйверів і налаштувань для безпосередньої взаємодії з ПЛК.

• Для роботи програми на ПК необхідний встановлений і налаштований клієнт БД.

• Програма працює тільки з раніше накопиченими даними іншого, спеціально для цього розробленої програми накопичення даних («SpeedTermoTrend» читати абзац 1).

• Видимість роботи з даними в реальному часі забезпечується одночасним запуском цієї програми і програми накопичення даних («SpeedTermoTrend») як на цьому, так і на будь-якому іншому зручному користувачеві в даний момент часу ПК.

Проаналізувавши тепловий і температурний режими регенеративного колодязя прийшли до висновку, що у печі вкрай недосконала система спалювання палива, що тягне за собою істотні недоліки. Із аналізу способів нагріву злитків визначено що необхідно створити енергозберігаючий технологічний процес, що передбачає економію палива і збільшення продуктивності печі.

Постановкою задачі даної магістерської дипломної роботи є впровадження запропонованого імпульсного способу спалювання палива у нагрівальних печах, при якому створюються умови для стандартного нагріву садки металу, та створення системи управління для рівномірного розподілу продуктів горіння за обсягом робочого простору печі.

3 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ПО ШИРИНІ ПЕЧІ

3.1. Короткий огляд теоретичних робіт по вирішенню завдань теплообміну в термічних печах

Процеси теплообміну у матеріалі, що нагрівається, широко поширені на всіх етапах металургійного і машинобудівного виробництва і, зокрема, при термічній обробці металу в термічних печах.

Рішення задачі теплообміну багатьма авторами розглядалося як модель теплообміну у просторі до високотемпературних агрегатів, в яких передача тепла від носія здійснюється за допомогою променевої або конвективно-променевої тепловіддачі [8].

Більшість відомих задач теплообміну відрізняються великою складністю, особливо при вирішенні нестаціонарних дво- і тривимірних задач [8]. Для вирішення застосовувалися різні припущення або спрощення поставлених завдань: нагрів тонких або масивних тіл; класифікації джерел тепла, як джерельної доданка, при лінеаризації рівняння теплопровідності; розгляд температури в шарі у часі при відомому розподілі по перетину; нагрів тіл правильної форми (пластина, циліндр, куля); прості крайові умови [8].

У роботах, присвячених використанню, при вирішенні задачі тепло-провідності різницевих схем, застосовується чисельний метод кінцевих різниць [8]. Характерною особливістю цього методу є його неоднозначність, яка веде до свободи вибору параметрів різницевої схеми, що визначають задану за умовою точність вирішення поставленого завдання. Такими параметрами є кроки по координаті за часом і ступінь неявності системи різницевих рівнянь. Такий метод дозволяє максимально використовувати можливості ЕОМ при мінімальному обсязі пам'яті.

Алгоритми звичайно-різницевих схем розрахунку теплообміну засновані на наближеному розрахунку температурних полів, в яких диференціальні рівняння в приватних похідних приводяться до лінійного вигляду. Тут величезну роль грає тип теплового джерела: точковий, лінійний або плоский. Даний метод застосовувався багатьма авторами при вирішенні задач теплопровідності для різних високотемпературних нагрівальних агрегатів.

Метод дискретного аналога передбачає використання кінцево-різницевих схем з урахуванням завдання функції джерела тепла, а також визначення неявності різницевої схеми.

Результати рішення, отримані в деяких роботах, складні при практичному використанні. При вирішенні нестаціонарних багатовимірних задач теплопровідності раціональним є застосування наближених аналітичних методів і чисельних методів, які дозволили б поєднувати досвід попередніх авторів і нові наближені рішення в поставленому завданню.

3.2. Постановка задачі моделювання теплової обробки металу в термічних печах

При математичному моделюванні теплового режиму нагріву металу в термічних печах основними блоками моделі є тепловий баланс, рівняння теплопровідності, рівняння теплопередачі. У більшості математичних моделей, присвячених знаходженню температури металу, що нагрівається, і оптимізації витрати палива, для вирішення застосовуються чисельно-аналітичні методи, які дозволяють вирішувати поставлену задачу з мінімально можливими похибками результатів [8].

У багатьох дослідженнях рішення задачі розподілу температури по перетину садки, що нагрівається в камерних печах з нерухомим подом температура гріючого середовища приймається постійною по ширині печі і розраховується тільки її зміна в часі. Однією з найпоширеніших проблем

теплового технологічного режиму є мінімізація перепаду температури по перетину металу. У разі, коли нагрівається метал покладений в кілька шарів - багаторядна садка - до вищенаведеної проблеми додається проблема рівномірного розподілу температури не тільки по перетину металу, але і по окремих елементах садки. Тому є актуальним розглянути питання визначення перепаду температури гріючого середовища по ширині печі.

На рисунку 3.1 схематично показано, як продукти горіння надходять до садки, яка нагрівається

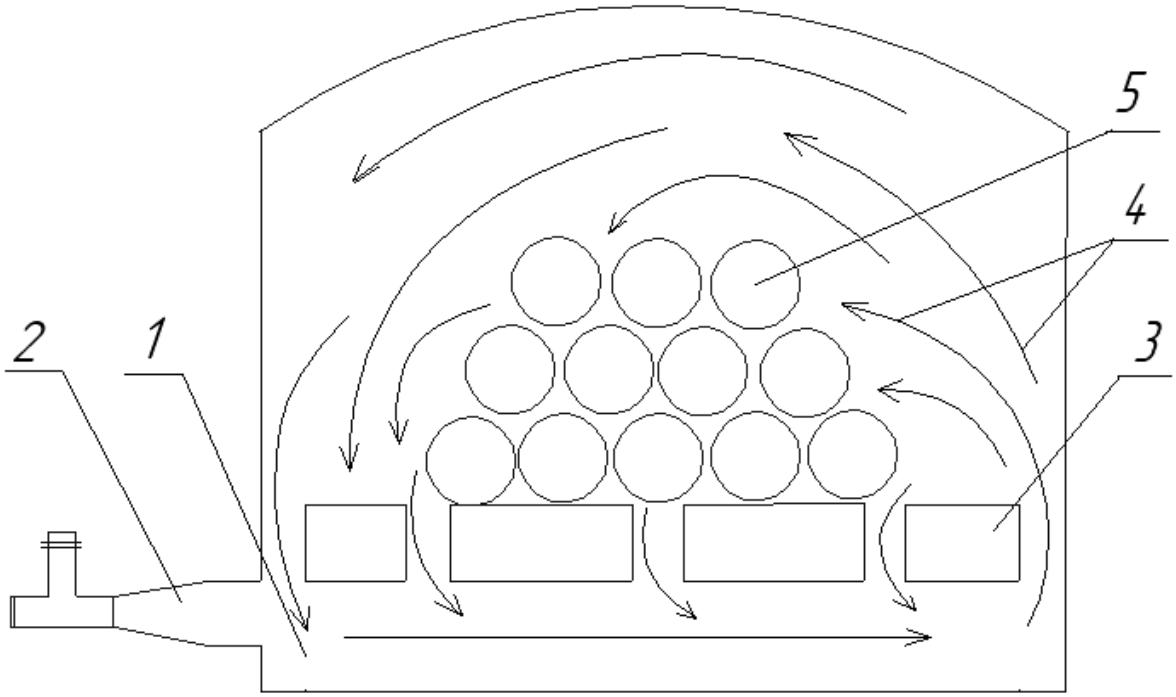


Рисунок 3.1 - Схема камерної печі з нерухомим подом

1 - підподова топка;

2 - пальниковий пристрій;

3 - під печі;

4 - напрямок руху продуктів горіння;

5 - багатошарова садка металу.

Так як камерна піч - піч з нерухомим подом, і продукти горіння від пальника надходять не безпосередньо на метал, який нагрівається, а спочатку знаходяться в підподову топку, то за рахунок рециркуляції продуктів горіння

в робочому просторі печі в підподовій топці здійснюється змішання продуктів горіння в печі і надходять від пальника. Це означає, що температурне поле гріючого середовища важливо розглядати в перетині печі за двома просторовими координатами (ширина і висота печі), так як по третій координаті - довжині печі - температура буде на одному рівні в будь-який момент часу в будь-якій точці по всій довжині печі. Важливо розрахувати температурне поле по ширині печі, яке буде відображати зміна температури по перетину. Так як садка металу багаторядна, виникає задача рівномірного розподілу температури в робочому просторі печі.

Наведене у роботі завдання технологічно за допомогою розроблюваних пальників, при експлуатації яких можливо змінювати коефіцієнт витрати повітря в широких межах, тим самим, зменшуючи перепад температури по ширині печі і сумарну витрату газоподібного палива на піч.

3.3. Математичне моделювання поля температур в робочому просторі печі

Теоретичні дослідження, наведені в роботі, засновані на визначенні температурного поля гріючого середовища. В якості керуючого впливу використовується коефіцієнт витрати повітря. При цих умовах необхідно визначити розподіл температури по ширині печі, що безпосередньо впливає на розподіл температури по перетину заготовок, які нагріваються, час періоду нагріву до заданої температури витримки і періоду витримки і сумарний витрата палива на піч [3 ... 7].

В основі вирішення поставленого завдання використовувалося наступне: розрахунок горіння палива, рівняння теплового балансу, рівняння теплопровідності при зовнішньому теплообміні при граничних умовах III роду. Для вирішення завдання застосовувалися кінцево-різницевий метод при визначенні поля температур в робочому просторі печі, вплив коефіцієнта

витрати повітря на граничні умови поставленого завдання, тепловий баланс для визначення витрати палива як функції часу.

Відповідно до принципів модульного програмування і поетапної розробки алгоритму теоретичні дослідження представлені у вигляді сукупності модулів з подальшою деталізацією взаємозв'язків. Такий підхід дозволив розглянути окремі частини задачі моделювання, не втрачаючи цілісного уявлення про всю математичну модель. При цьому вхідні і вихідні параметри описувалися блоками: «характеристика садки металу», «параметри газоподібного палива», «характеристики термічної печі», «режим термообробки», «розрахунок горіння палива», «розподіл температури по ширині печі», «час термообробки» , «температурний режим нагріву металу», «витрата палива як функція часу для двухстадийного режиму».

Етапи теоретичного експерименту:

- розрахунок обсягу продуктів горіння палива в залежності від коефіцієнта витрати повітря;

- тепловий баланс камерної печі;

- визначення температури гріючого середовища;

- визначення температурного поля гріючого середовища в 2-х мірній системі координат;

- розрахунок нагріву металу в період підйому температури і в період витримки;

- визначення сумарної об'ємної витрати палива як функції часу в залежності від температури гріючого середовища.

Розрахунок обсягу продуктів горіння. Так як в камерних печах в основному використовуються суміші палива, то в моделі використовувався розрахунок суміші, що складається з двох газів (природно-доменна або коксодоменна суміш). За відомим складом газоподібного палива, вологості палива, кількості повітря для горіння L_0 і коефіцієнту витрати повітря $\alpha_в$ визначався обсяг продуктів горіння.

Частка першого газу в змішаному паливі становить X, частка другого газу - (1-X). За знайденою теплотою згоряння суміші, визначалася частка першого і другого газу в суміші.

$$X = \frac{Q_{н1}^{p} - Q_{нсм}^{p}}{Q_{н1}^{p} - Q_{н2}^{p}} \tag{3.1}$$

де $Q_{н1}^{p}, Q_{н2}^{p}, Q_{нсм}^{p}$ – теплота згоряння 1, 2 та змішаного газу відповідно, МДж/м^3.

$$Q_{н}^{p} = 127{,}7 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 234 \cdot H_2S + 358 \cdot CH_4 + 590 \cdot C_2H_4 + \\ + 555 \cdot C_2H_6 + 913 \cdot C_3H_8 + 1185 \cdot C_4H_{10} + 1465 \cdot C_5H_{12}; \tag{3.2}$$

Склад змішаного газу встановлюється зі співвідношення (на прикладі CO, для інших складових газу аналогічно):

$$CO^{(см)} = X \cdot CO^{(1)} + (1 - X) \cdot CO^{(2)} \tag{3.3}$$

Кількість повітря для горіння:

$$L_0 = \frac{0{,}01}{0{,}21}\left[0{,}5 \cdot CO + \sum\left(n + \frac{m}{4} \right) \cdot C_n H_m + 0{,}5 \cdot H_2 + 1{,}5 H_2S - O_2 \right], \text{м}^3/\text{м}^3. \tag{3.4}$$

Хімічний склад диму, м^3/м^3:

$$\begin{cases} V_{CO_2} = 0{,}01\left(CO + \sum n C_n H_m + CO_2\right); \\ V_{H_2O} = 0{,}01\left(\sum \frac{m}{2} C_n H_m + H_2 + H_2S + H_2O \right); \\ V_{SO_2} = 0{,}01\left(H_2S + SO_2\right); \\ V_{N_2} = 0{,}01\left(N_2 + 79 \cdot L_0 \cdot \alpha_в\right); \\ V_{O_2} = 0{,}01\left(O_2 + 21 \cdot L_0 \cdot \left(\alpha_в - 1\right)\right); \end{cases} \tag{3.5}$$

де $\alpha_в$ – коефіцієнт витрати повітря.

Об’єм продуктів горіння, м^3/м^3:

$$V_д = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{SO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}. \tag{3.6}$$

Підставивши (3.4) и (3.5) в (3.6), була отримана залежність об’єму продуктів горіння від коефіцієнта витрати:

$$V_д = A^* + L_0 \cdot \alpha_в, \qquad (3.7)$$

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

$$A^* = 0{,}01(CO + CO_2 + \sum nC_nH_m + \sum \frac{m}{2} C_nH_m + H_2 + 2 \cdot H_2S + \\ + H_2O + SO_2 + N_2 + O_2 - 21 \cdot L_0). \qquad (3.8)$$

З рівняння (3.7) можна зробити висновок, що залежність об'єму продуктів горіння від коефіцієнта витрати повітря – лінійна.

Тепловий баланс термічної камерної печі. Рівняння теплового балансу [46], з урахуванням основних статей приходу та витрати тепла:

$$B\left(Q_н^р + c_г t_г + L_0 \alpha_в i_в\right)\tau = c_м G(t_к - t_н) + \sum G_{кл}(c_0^к t_к - c_0^н t_н) + Bc_д t_д \tau + Q_п \qquad (3.9)$$

де B – об'ємна витрата палива в одиницю часу, м^3/с;

$Q_н^р$ – теплота згоряння палива, кДж/м^3;

$c_г$ – середня об'ємна теплоємкість газу, кДж/м^{3}К;

$t_г$ – температура газу, ^{0}С;

$i_в$ – ентальпия 1 м^3 повітря при температурі повітря $t_в$, кДж/м^3;

τ – проміжок часу, с;

G – маса садки металу, кг;

$c_м$ – масова теплоємність металу, кДж/кгК;

$c_д$ – об'ємна теплоємкість димових газів, кДж/м^{3}К;

$t_д$ – температура димових газів, ^{0}С;

$G_{кл}$ – маса кладки, кг;

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

$t_к$, $t_н$ – середні температури кладки в кінці та на початку нагріву,^{0}С;

$Q_п$ – невраховані 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.

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

З рівняння (3.9) отримана залежність витрати палива від коефіцієнта витрати повітря:

$$B = \frac{c_м G(t_к - t_н) + \sum G_{кл}(c_0^к t_к - c_0^н t_н)}{\left(Q_н^р + c_г t_г + L_0 \cdot \alpha_в \cdot i_в\right)\tau - c_д t_д \tau}. \qquad (3.10)$$

Згідно з отриманою залежності припущено, що при одних і тих же статтях балансу збільшення коефіцієнта витрати повітря приведе до зменшення сумарного об'ємної витрати палива на піч.

З формули (3.10), з огляду на мінливу температуру $t_д$ в часі, отримана залежність сумарної витрати палива від температури гріючого середовища в часі, що використовувалося далі в розрахунку для отримання результатів і динаміці зміни витрати палива.

Температура продуктів горіння. Температура продуктів горіння залежить від палива, що подається до пальників, від коефіцієнта витрати повітря і обсягу продуктів горіння.

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

Теоретична температура горіння зазвичай на 20-25% перевищує максимальну справжню температуру газів в металургійних печах. Отже, розрахувавши,

можна орієнтовно визначити, чи забезпечує отримання необхідної дійсної температури газів дане паливо за даних умов його спалювання.

$$t_д = \frac{Q_н^p + q_T + q_B}{c_д V_д} . \qquad (3.11)$$

Підставивши значення тепла палива і повітря, а також обсягу продуктів горіння, температура продуктів горіння отримана наступною:

$$t_д = \frac{Q_н^p + c_г t_г + L_0 \cdot \alpha_в \cdot i_в}{c_д (A^* + L_0 \cdot \alpha_в)} . \qquad (3.12)$$

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

Розрахунок нагріву металу в період підйому температури і в період витримки. Рішення задачі теплопровідності має на увазі її постановку з приведенням крайових умов, а також використання для її вирішення чисельно-аналітичних методів. У роботі наводиться 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 скінченних різниць та широких можливостей ЕОМ.

На рис.2.1 представлена схема досліджуваної печі із зазначенням контурів напрямки руху продуктів горіння і розташування багаторядної садки.

Для визначення поля температур в робочому просторі печі наводиться рівняння теплопровідності. У приватних похідних воно має вигляд за законом Фур'є:

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -div(\lambda \cdot grad t) \qquad (3.13)$$

де $c-$ теплоємність, кДж/кгК; $\rho-$густина, кг/м^3; $t-$температура, ^{0}С; $\tau-$час нагріву, с; $\lambda-$ коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К.

Як було доведено вище, завдання теплопровідності для термічної камерної печі розглядається в 2-х координатах, y і z. Рівняння тепло-провідності в такому випадку приймається:

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

(3.14)

На рисунку 3.2 представлена схема до математичної постановці завдання. На малюнку показано осі, в напрямку яких досліджується температурне поле. Так як піч симетрична по розташуванню багаторядної садки металу і, початок координат розташовано в середині по ширині печі. Згідно з методом кінцевих різниць, на схемі схематично показано вибір кроку сітки дослідження і.

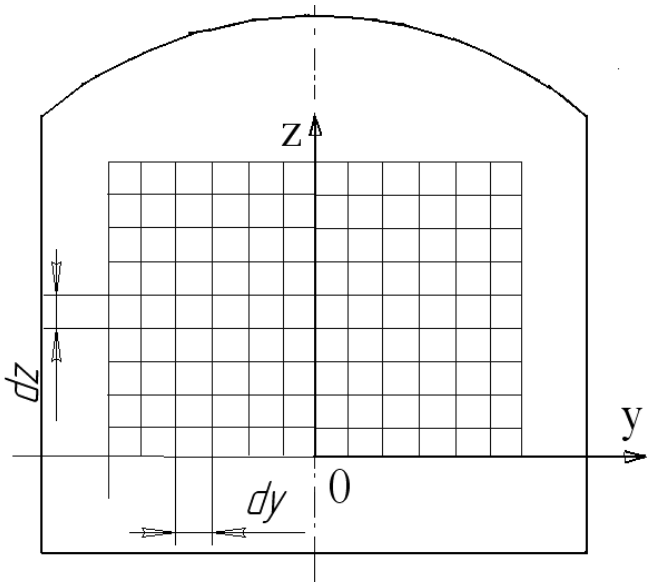


Рисунок 3.2 - До постановки рішення задачі теплопровідності

Для даного завдання потрібно записати:

Початкові умов

$$t(y,z,0)=f(y,z). \qquad (3.15)$$

Граничні умови III роду

$$-\lambda\frac{\partial t}{\partial n}=\alpha[t_{\partial}(\alpha_{в})-t(\tau)], \qquad (3.16)$$

де α – сумарний каефіцієнт тепловідачі, Вт/(м^2*К); n – нормаль, яка характеризує розподіл температури на площині y, z.

Граничні умови (2.16) для розподілу температури по двовимірній задачі прийняті наступними, згідно рисунку 3.2:

На верхній і бічний поверхнях:

$$-\lambda_y \frac{\partial t_n}{\partial y}\bigg|_{y=B} = \alpha_{\Sigma y}[t_{\partial.y} - t_{n.y}(\tau)], \tag{3.17}$$

$$-\lambda_z \frac{\partial t_n}{\partial z}\bigg|_{z=H} = \alpha_{\Sigma z}[t_{\partial.z.} - t_{n.z}(\tau)], \tag{3.18}$$

На лівій та нижній поверхнях:

$$\frac{\partial t_n}{\partial y}\bigg|_{y=0} = 0, \tag{3.19}$$

$$\frac{\partial t_n}{\partial z}\bigg|_{z=0} = 0, \tag{3.20}$$

Де $\alpha_{\Sigma y}, \alpha_{\Sigma z}$ – сумарний коефіцієнт тепловіддачі по осях y і z, відповідно, Вт/м^{2}К; $t_{\partial.y}, t_{\partial.z.}$ – температура продуктів горіння по осях y і z, відповідно, ^{0}С; λ_y, λ_z – коефіцієнт тепловіддачі по осях y і z, відповідно, Вт/мК; $t_{n.y}, t_{n.z}$ – температура поверхні металу по осях y і z, ^{0}С.

Сумарний коефіцієнт тепловіддачі з рівняння Стефана-Больцмана:

$$\alpha_{\Sigma y} = \frac{q_y}{t_{\partial.y} - t_{n.y}}. \tag{3.21}$$

Тепловий потік визначається з умовою передачі тепла випромінюванням і 10 % на тепловіддачу конвекцією:

$$q_y = 1{,}1 \cdot \varepsilon_г \cdot C_0 \left[\left(\frac{T_{\partial.y}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{n.y}}{100} \right)^4 \right], \tag{3.22}$$

де 1,1 – коефіцієнт, який враховує 10 % на тепловіддачу конвекцією; $\varepsilon_г$ – ступінь чорноти газу; C_0 – коефіцієнт випромінення абсолютно чорного тіла, Вт/м^{2}К^4.

Для осі z аналогічно.

За наведеним розрахунку було визначено розподіл температури по поверхні металу і температури продуктів горіння.

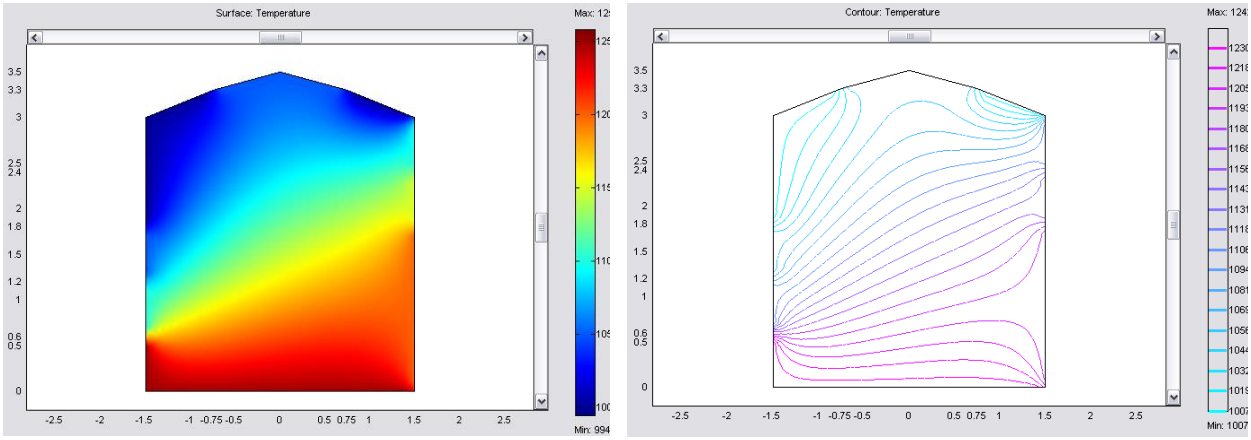
3.4. Результати теоретичного експерименту

Рішення поставленого завдання за допомогою математичного моделювання температурного поля по ширині і висоті вирішується за допомогою чисельно-аналітичного методу скінченних різниць, пакету програм Matlab і проекту Femlab. На рис. 3.3 - 3.8 представлені результати розрахунку математичної моделі температурного поля в залежності від коефіцієнта витрати повітря в наступні моменти часу: початок режиму нагріву (рис.3.3 при $\alpha_в = 1$ і рис. 3.4 – при), кінець режиму нагріву – початок технологічної витримки (рис.3.5 в при $\alpha_в = 1$ і рис. 3.6 – при $\alpha_в = 2$), кінець технологічної витримки (рис.3.7 при $\alpha_в = 1$ і рис. 3.8 – при $\alpha_в = 2$).

За результатами розрахунку на рисунку 3.3 можна простежити вплив коефі-цієнту витрати повітря на температурне поле: на початку нагріву відмінності не суттєві, проте на початку і в кінці технологічної витримки при $\alpha_в = 2$ спостерігається більш рівномірний розподіл температури, ніж при $\alpha_в = 1$.

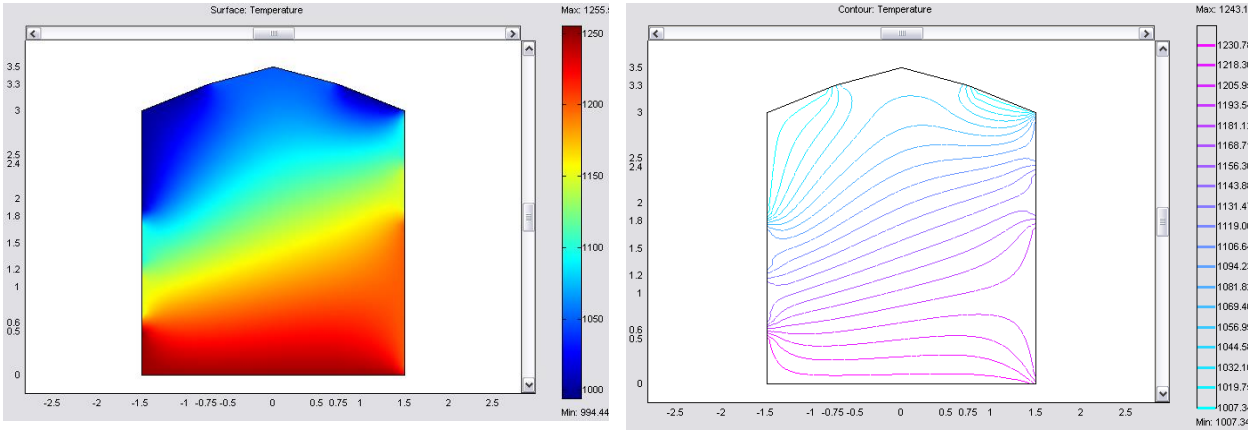
Для порівняння результати представлені на одному малюнку для різних моментів часу (рис. 3.9) по осі y - ширина печі.

Перепад температури по ширині печі при збільшенні коефіцієнту витрати повітря від 1 до 2 зменшується від 150 ... 200 ^{0}C до 20 ... 50 ^{0}C в різний час.



а) б)

Рисунок 3.3 - Початок режиму нагріву при $\alpha_в = 1$: а) – поле температур, б) – контури розподілу температури



а) б)

Рисунок 3.4 - Початок режиму нагріву при $\alpha_в = 2$: а) – поле температур, б) – контури розподілу температури

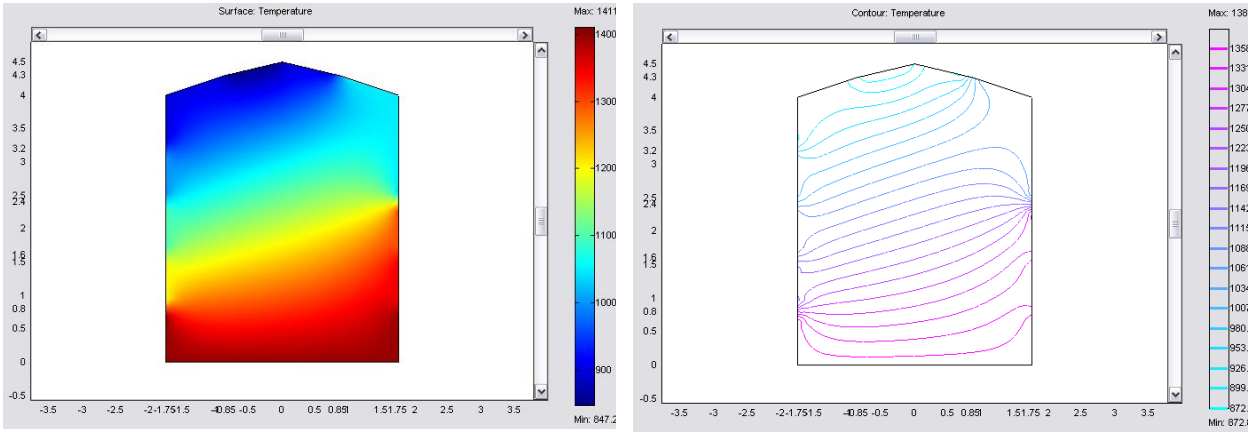
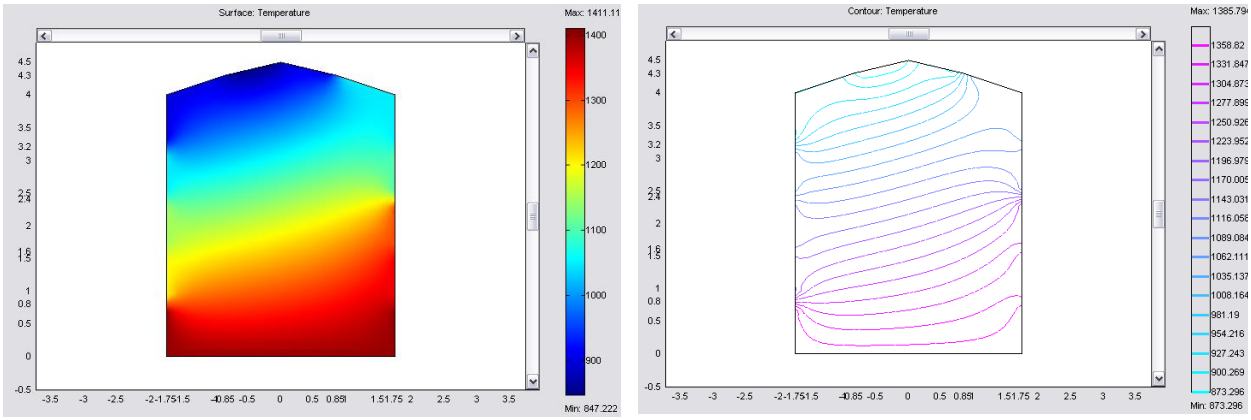
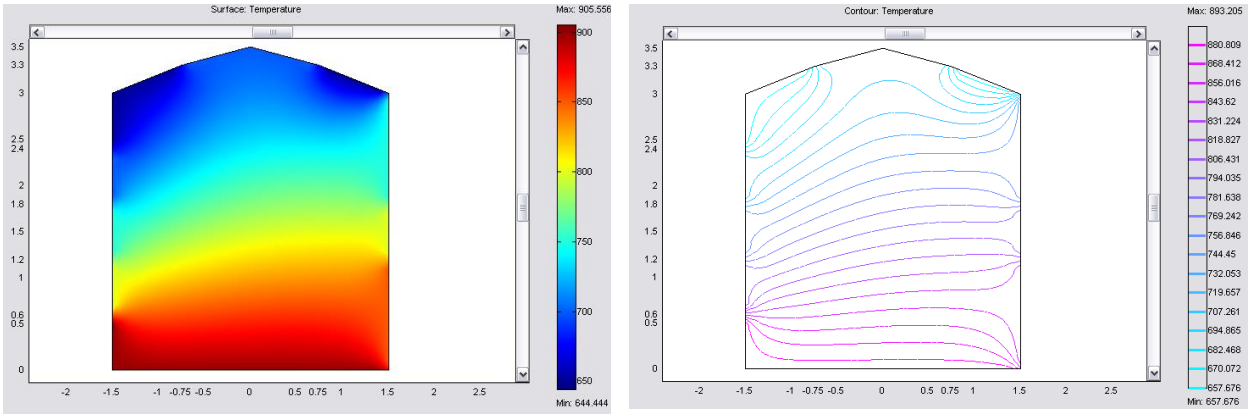


Рисунок 3.5 - Початок технологічної витримки при $\alpha_в = 1$: а) – поле температур, б) – контури розподілу температури



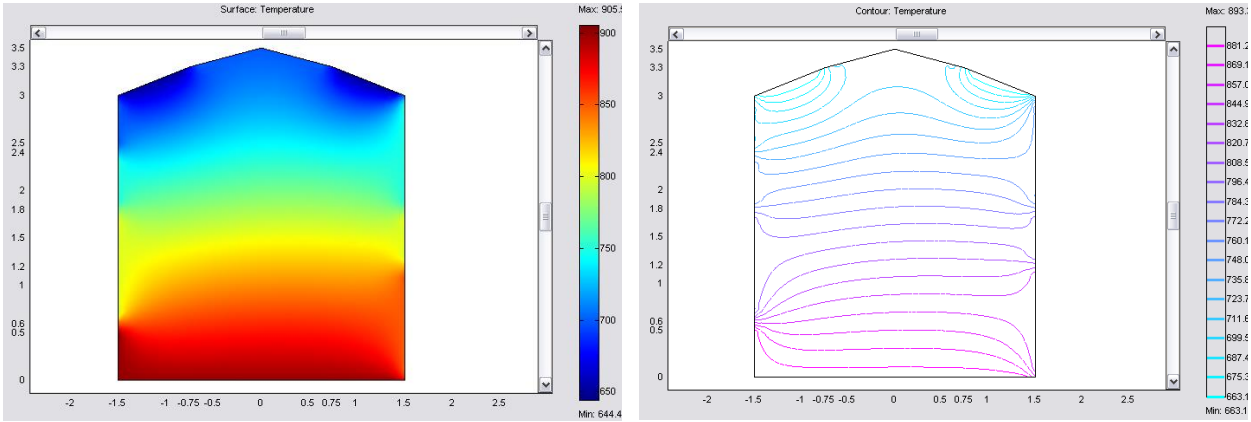
а) б)

Рисунок 3.6 - Початок технологічної витримки при $\alpha_в = 2$: а) – поле температур, б) – контури розподілу температури



а) б)

Рисунок 3.7 - Кінець технологічної витримки при $\alpha_в = 1$: а) – поле температур, б) – контури розподілу температури



а) б)

Рисунок 3.8 - Кінець технологічної витримки при $\alpha_в = 2$: а) – поле температур, б) – контури розподілу температури

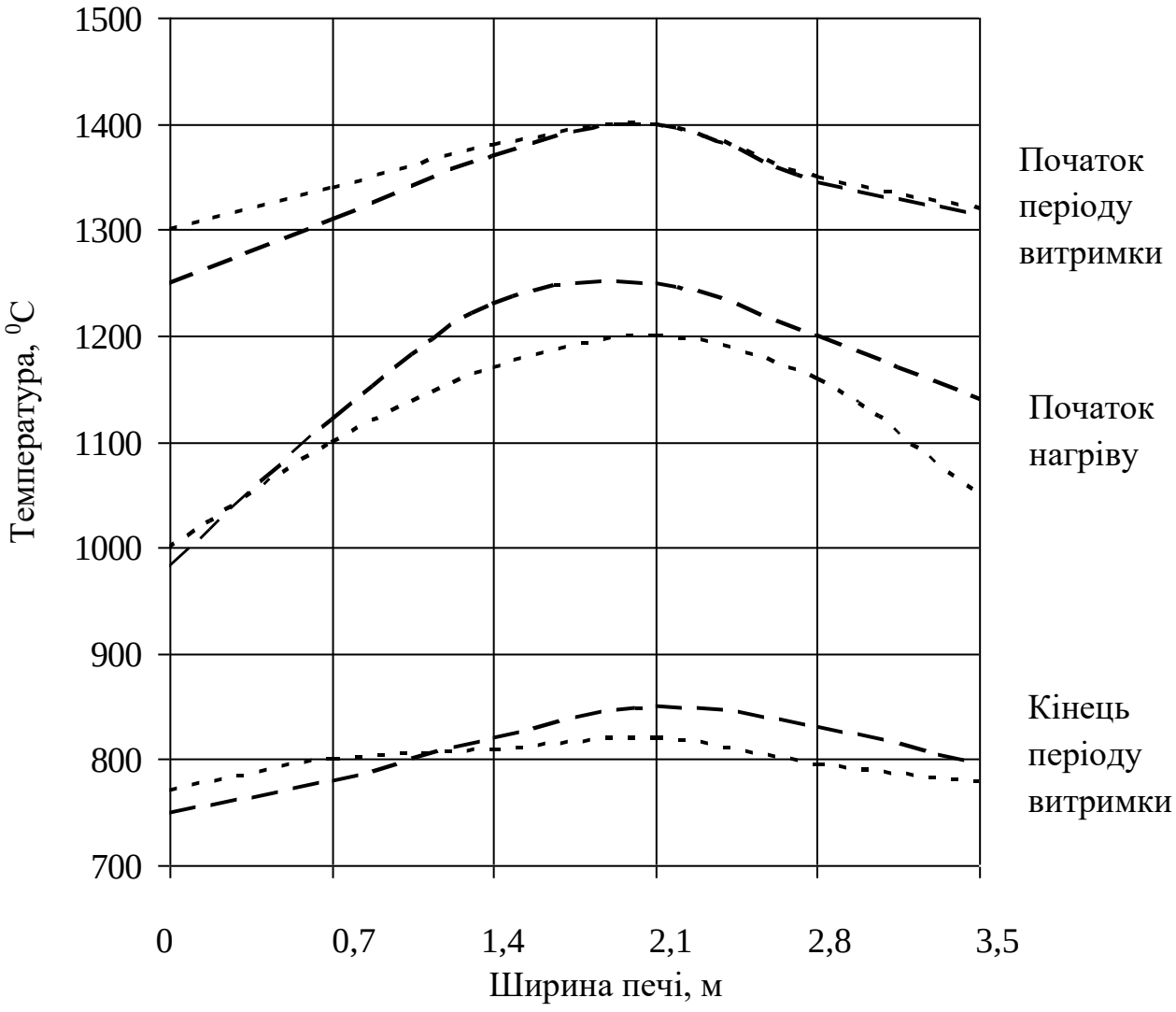
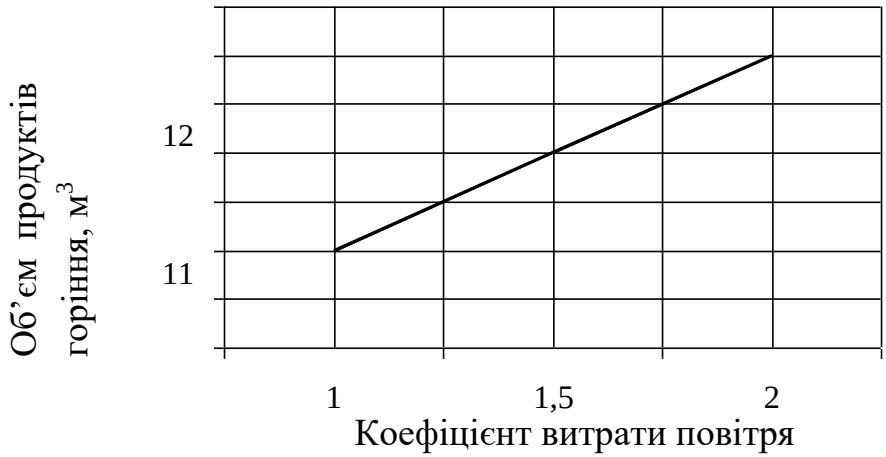


Рисунок 3.9 - Розподіл темпервтури по ширині печі при різних коефіцієнтах витрати повітря

- - - - - $\alpha_в = 1$ ..... $\alpha_в = 2$

Для визначення впливу коефіцієнта витрати повітря на обсяг продуктів горіння і витрати палива - побудовані залежності перерахованих характеристик, в яких коефіцієнт витрати повітря змінювався в тих же значеннях: 1 і 2 м3 / м3.

На рисунку 3.10 приведена залежність обсягу продуктів горіння при збільшенні коефіцієнта витрати повітря від 1 до 2. Згідно з формулою (3.7), дана залежність лінійна і прямо пропорційна при зміні коефіцієнта витрати повітря.

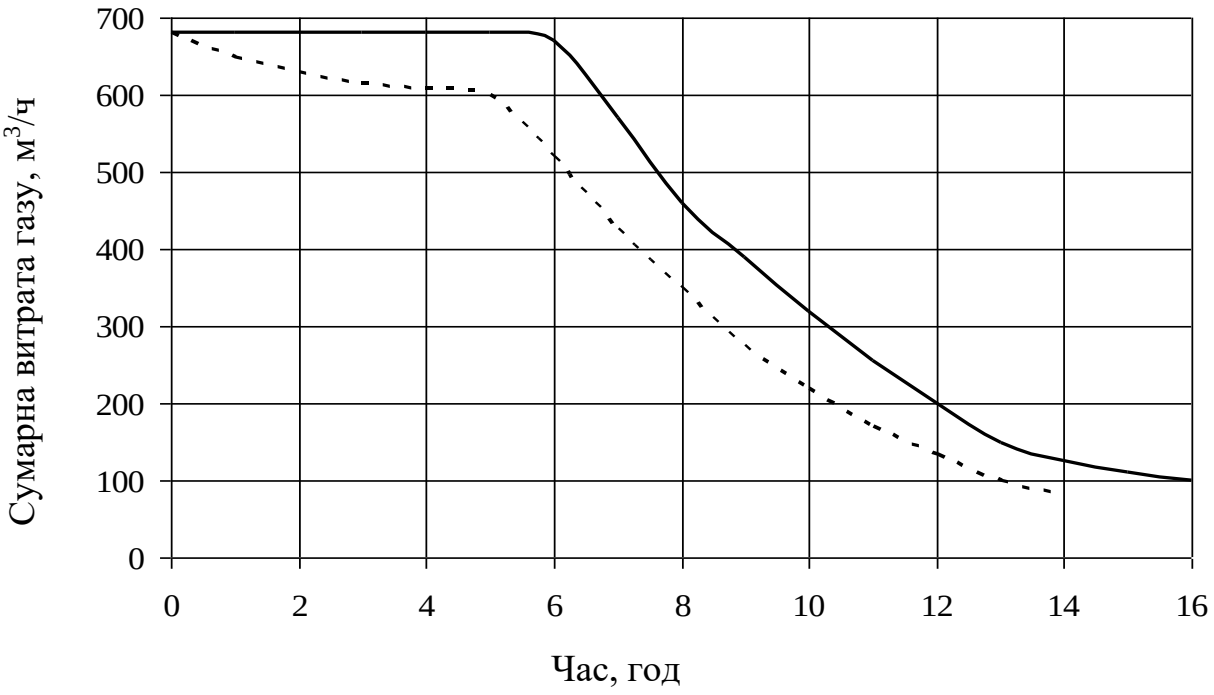


Рисунку 3.10 - Залежність об'єму продуктів горіння від коефіцієнту витрати повітря

На рисунку 3.11. наведені результати розрахунку. Тут наведені значення сумарної витрати повітря при $\alpha_в = 1$ и $\alpha_в = 2$ при максимальній початковій витраті палива 680 м3 / год. У першому випадку при $\alpha_в = 1$ розглядався практичний випадок, в якому перший період нагріву - підйом температури - триває 6 годин, період витримки - 10 годин, мінімальне

значення витрати палива в кінці теплового режиму 100 м3 / год. У другому випадку при $\alpha_в = 2$ витрата палива розраховувався за запропонованою методикою (3.36) при тих же вихідних даних, як і для першого випадку. Перший період склав 5 годин, другий - 9 годин, мінімальна витрата - 80 м3 / год. Виходячи з рис. можна зробити висновок, що економія палива при коефіцієнті витрати палива може скласти від 100 м3 / ч сумарної витрати палива на піч.

Розрахунок проводився для режиму термообробки відпалу при 860 0С. Маса садки металу становила 18 тонн. Температура гріючого середовища досягала максимального значення 1400 ^{0}С під час початку періоду витримки. Результати теоретичного експерименту були підтверджені експериментальним обґрунтуванням залежності температури по ширині печі від коефіцієнта витрати повітря, наведеними в наступному пункті.



Рисунку 3.11 - Витрата палива при відпалі 760 ^{0}С та різних коефіцієнтів витрати повітря

$\alpha_в = 1$ $\alpha_в = 2$

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 0С);
- маса садки (10 - 15 тонн);
- час технологічного режиму (14 - 18 годин).

В результаті факторного експерименту після визначення значущих коефіцієнтів в рівнянні регресії за критерієм Стьюдента, було отримано розрахункове значення критерію Фішера, яке дозволило зробити висновок, що математична модель по вибраними чинниками варіювання адекватна реальному технологічному процесу.

Для забезпечення наведеного режиму роботи, пов'язаного зі збільшенням коефіцієнта витрати повітря, в роботі запропоновано практичне вирішення даного питання за допомогою використання модернізованого горілчаного пристрою, який забезпечить роботу системи автоматизації печі в широкому діапазоні регулювання коефіцієнта витрати повітря.

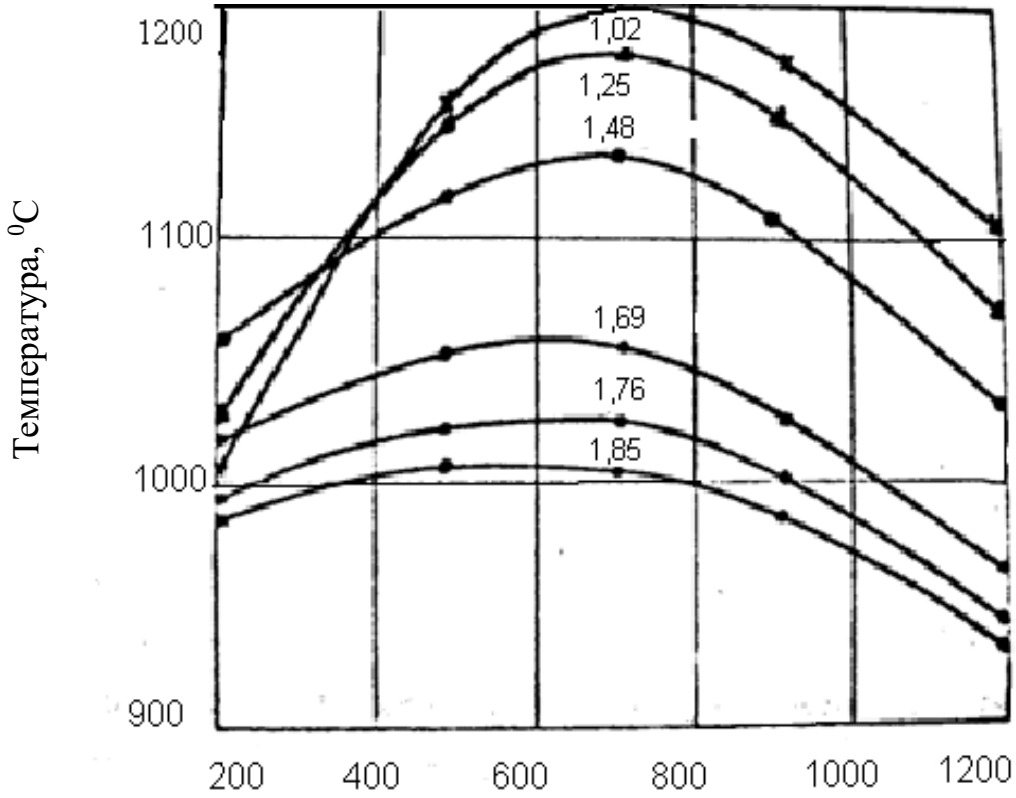
3.5. Експериментальне обгрунтування залежності температури по ширині печі від коефіцієнта витрати повітря

Для експериментального обгрунтування залежності температури по ширині печі була проведена робота, метою якої було експериментальне визначення факторів, що впливають на можливість зменшення перепаду температури гріючого середовища в робочому просторі печі.

Експерименти 1) проводилися на вогневому стенді, виконаному у вигляді робочої камери без теплообмінників, що наближений до умов роботи термічних печей. Вимірювали температуру гріючого середовища в декількох 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 істотний вплив на зменшення перепаду температури гріючого середовища надає коефіцієнт витрати повітря, так як при його збільшенні підвищується обсяг продуктів горіння і поліпшується змішання гріючого середовища, що забезпечує більш рівномірний розподіл температури.

Як видно на рис. 3.6, зміни коефіцієнта витрати повітря в межах 1,02 - 1,25 призводить до незначної зміни температурних режимів в робочій камері (20 - 25 ^{0}C). З огляду на збільшення обсягу продуктів згоряння в робочій камері, перепад температур по ширині печі знижується при збільшенні коефіцієнта витрати повітря.



Рисунку 3.6 - Розподіл температур по довжині робочої камери печі для різних значень коефіцієнта витрати повітря

При подальшій зміні коефіцієнта витрати повітря до 1,85 знижується перепад температури по довжині факела від 200 0С до 70 0С. При збільшенні коефіцієнта витрати повітря до 2 цей перепад буде ще менше.

Збільшення коефіцієнта витрати повітря знижує температуру продуктів згоряння і одночасно збільшує їх обсяг. Це призводить до збільшення швидкості руху продуктів згоряння, що забезпечує прискорений варіант передачі тепла нагрівається металу по ширині печі.

Однак, істотне 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 до розділу

1. Розроблено математичну модель температурного поля в термічній камерній печі з підподовими топками і нерухомим подом, яка дозволила б вибирати економічний режим їх опалення, що знижує витрату палива, за допомогою збільшення коефіцієнта витрати повітря.

2. Результати теоретичного експерименту показали, що збільшення коефіцієнта витрати повітря від 1 до 2 дозволить збільшити обсяг продуктів горіння в робочому просторі печі, зменшити перепад температури по ширині печі протягом всього технологічного режиму від 150 ... 200 0С до 20 ... 50 0С в різний час , незначно скоротити час теплової обробки металу в період підйому температури і в період технологічної витримки, скоротити сумарну витрату палива на піч до 100 м3 / год.

3. Представлена математична модель адекватна реальному тих-технологічного процесу нагріву металу в термічних камерних печах з нерухомим подом і підподовими топками.

4. Результати роботи були підтверджені експериментальними дослідженнями, за результатами яких було отримано, що збільшення

коефіцієнта витрати повітря зменшує перепад температури гріючого середовища по ширині печі.

4 ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ІМПУЛЬСНОГО ОПАЛЕННЯ І РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ТРИВАЛОСТІ ІМПУЛЬСІВ ПОДАЧІ ПАЛИВА

Як показано в цій роботі методи імпульсного опалення впроваджувалися на різних конструкціях печей [37 ... 40]. Результати експериментів і тривалої експлуатації на рекуперативних нагрівальних колодязях і методичних печах показали, що імпульсна опалення забезпечує скорочення витрати палива, тривалості нагрівання і браку по нагріванню металу. Наприклад, на заводі «Дніпроспецсталь» після впровадження такої системи на всіх нагрівальних колодязях протягом 10 років не було випадків появи браку по нагріванню.

4.1. Вибір раціональної системи управління тепловим режимом

Розробка і впровадження імпульсного опалення проведена на термічних печах з підподовими топками на заводі «ДСС». Печі опалювалися коксодоменною або природнодоменною сумішшю з теплотою згоряння 6,7 МДж/м^3. Вага садки в печах становив 20 ... 30 тонн.

Піч з підподовими топками умовно розбита на 5 зон. У першому варіанті в системах імпульсного опалення пальники встановлювалися в шаховому порядку - зустрічно по одній в сусідніх зонах, а у вікна видачі два 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 рециркуляционного теплообміну. Тому в подальшому почали встановлювати пальники з одного боку печі, в тому числі і в зоні біля вікна видачі.

Система автоматичного управління температурним режимом показана на рис. 4.1. Як видно зі схеми, в кожній зоні для вимірювання температури на боковій стінці встановлені термопари 1, а для управління подачею палива і

повітря на зону застосували пневматичні виконавчі механізми 4 і спарені регулюють дроселя 5.

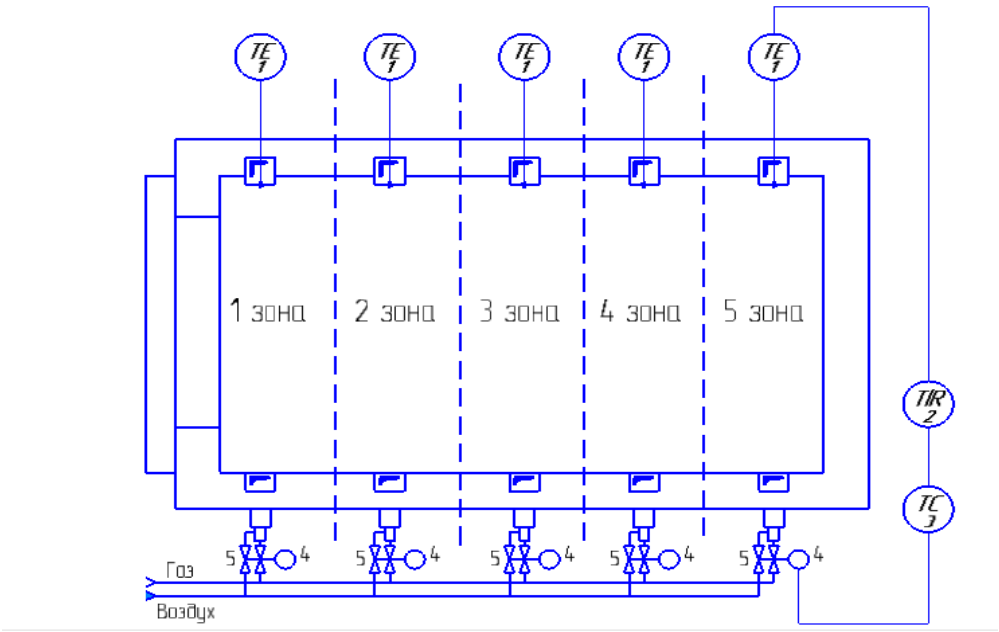


Рисунок 4.1 - Система автоматичного управління температурним режимом печі

Сигнал від термопар подається на один електронний потенціометр через оббігаючий пристрій 2. У системі управління застосований один задатчик, один регулятор температури 3, п'ять виконавчих механізмів та регулюючих органів у вигляді спарених дроселів на повітряному і 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.

В період підйому температури на пальники подавали паливо і повітря в співвідношеннях, близьких до стехиометричних. Після виходу на задану для витримки температуру в зоні регулятор зменшував витрату палива на 94% (до 8 м^3 / год на пальник) і повітря - на 28% (до 150 м^3 / год на пальник), тобто залишав пальника практично на контрольному факелі. При зменшенні температури в зоні нижче заданої, регулятор подавав максимальну витрату палива і повітря на відповідний пальник. Цикл оббігаючого пристрою

порівняно невеликий і температура кожної зони контролювалася через кожні 1,5 хвилини.

На печі № 12 було проведено промислово-експериментальне випробування 1) імпульсного опалення, реалізованого описаною вище системою автоматичного регулювання та комплектом модернізованих пальників. Провели серію відпалів з контролем температури садки гнучкими термопарами, в тому числі п'яти відпалів підшипникової сталі, що поставляється з контролем мікроструктури, і один відпал хромистої нержавіючої сталі, що поставляється тільки з контролем твердості.

У піч завантажувалася садка, пакетована відповідно до технологічної інструкції. Розподіл температур за обсягом садки визначався за допомогою гнучких хромель-алюмелевих термопар, які закладалися в садку між пакетами і, в деяких випадках, в середину пакета. Термопари встановлювалися в характерних точках. Температура по зонам контролювалася за допомогою стаціонарних термопар, встановлених в бічній стіні печі. Витрата газу і повітря вимірювали щитовими приладами КВП і А. Тиск в робочому просторі на рівні поду підтримувався близько 10 Па.

Розглядалися результати експериментального відпалу №5279 при нагріванні садки сталі ШХ15 масою 21 т. Режим відпалу включав підйом температури до 800 ^{0}С, витримку при цій температурі протягом 14 годин, охолодження із заданою швидкістю в печі і подальше охолодження на повітрі.

Підйом температури від 600 до 800 ^{0}С відбувався при максимальних витратах газу (800 м^3 / ч) і повітря (1300 м^3 / ч). Гнучка термопара № 5 була встановлена не передньому торці садки, у верхній її частині. Її показання майже збігалися з показаннями стаціонарної термопари, встановленої в цій же зоні.

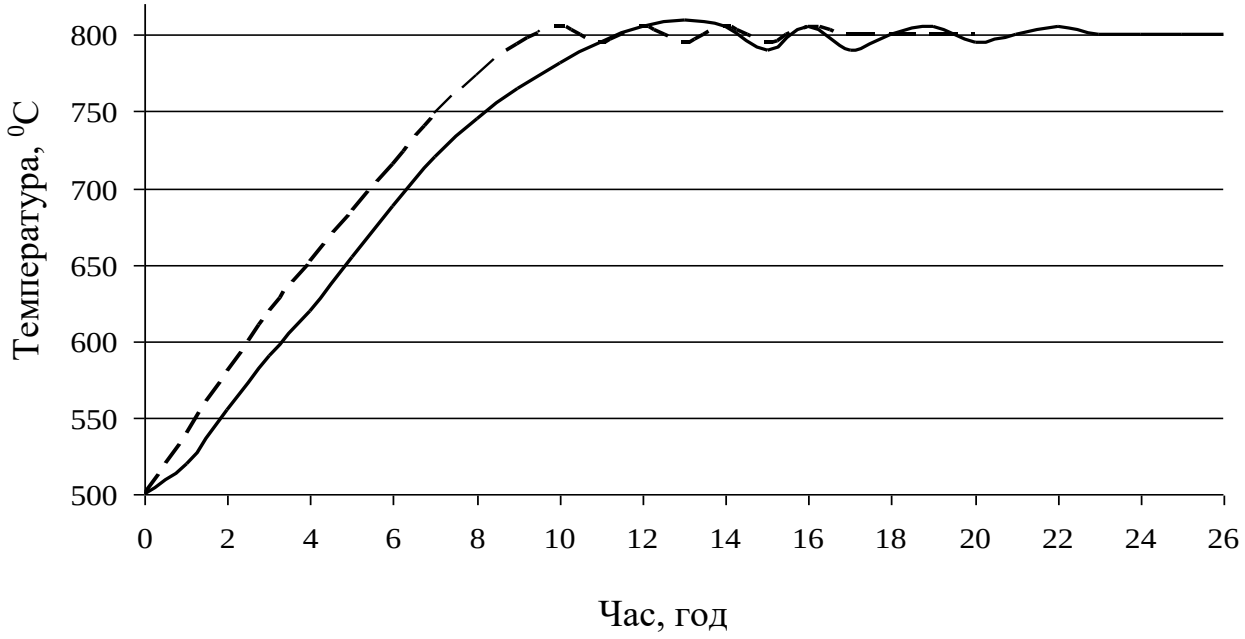
Найбільше відставання в період підйому спостерігалося в місці установки термопари № 4 (середня частина пакетів в задній половині печі).

Таким чином, в момент початку витримки максимальний перепад температур по садці склав 90 ^{0}C.

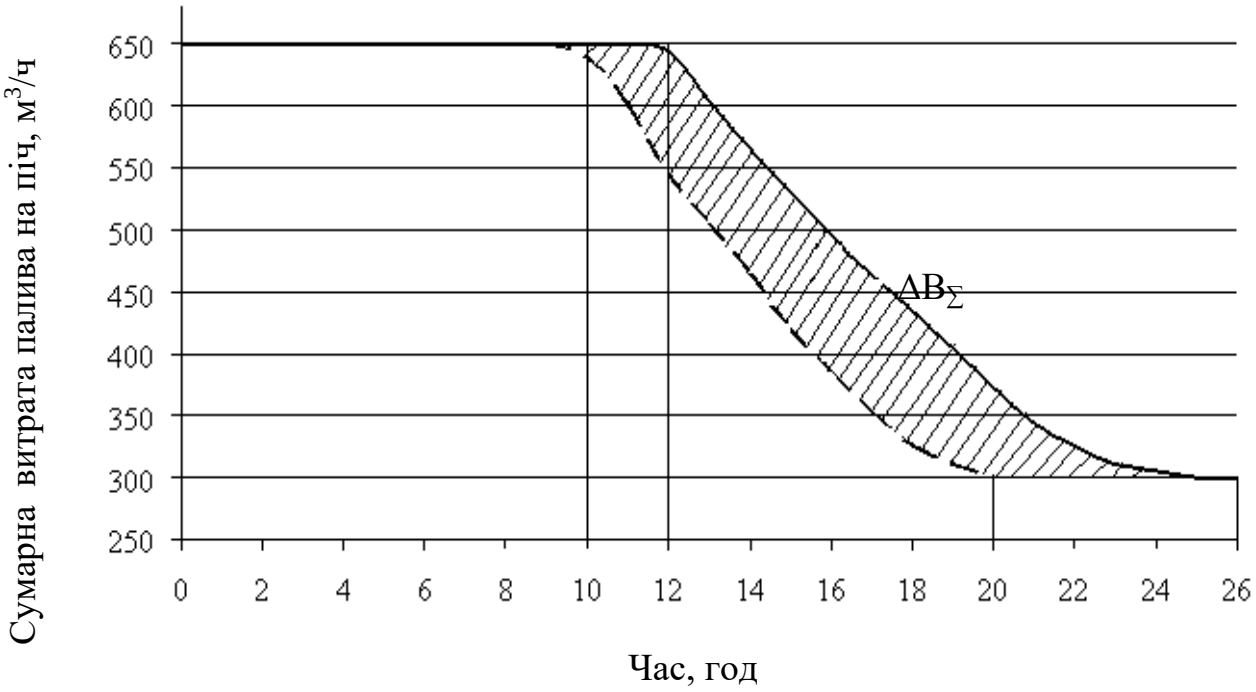
Витримка здійснювалася при роботі системи автоматичного регулювання, яка реалізує імпульсний спосіб опалення. При цьому витрата газу і повітря на кожну зону змінювалася від мінімального до максимального значення, а температура в зонах змінювалася періодично в інтервалі 790 ... 805 ^{0}C.

Періодична подача максимального газу і повітря призводить до підвищення інтенсивності рециркуляції в робочому просторі печі і вирівнюванню температур. Через 9-10 годин витримки максимальний перепад по садці склав 8 ^{0}C, що свідчить про високу рівномірність нагріву. Тривалість витримки була скорочена на 4 години, відповідно скоротився і час відпалу. Відпрацьовані зразки пройшли в ЦЗЛ контроль на мікроструктуру без зауважень до якості металу. Всі відпрацьовані контрольні зразки відповідали вимогам ДСТУ. Решта експериментальні відпали дали подібні результати.

На рисунку 4.2 наведені графіки середньої температури по перетину металу і сумарна витрата палива на піч. Відпали підтвердили надійну роботу модернізованих пальників і працездатність системи автоматичного регулювання, що реалізує імпульсний спосіб опалення термічної печі в період витримки металу. В результаті контрольних відпалів отримані дані, що свідчать про ефективність імпульсного опалення в період витримки. Узагальнені результати по вимірах температури металу, а також мікроконтролю, показують, що рівномірність нагрівання садки в кінці нагріву дозволяє скоротити тривалість витримки на 3-4 години в порівнянні з діючою інструкцією. З результатів на рис. 4.2 видно, що при безперервній подачі газу час витримки становив 14 годин, при імпульсній подачі газу - 10 годин.



а)



б)

Рисунку 4.2 - Графіки температури металу а) та сумарної витрати газу б):

——— при непреривній подачі газу;

– – – – – – при импульсній подачі газу.

На рисунку 4.2,б заштрихована область ΔB_Σ представляет собой економію палива при импульсному способі опалення, яка для данного режиму нагріву склала близько 1050 м^3/ч.

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

Однак, при тривалій експлуатації печі, оснащеної електричними і пневматичними виконавчими механізмами з постійною швидкістю переміщення штоку, з'ясувалося, що дроселі та виконавчі механізми зношуються і виходять з ладу. Шиберний принцип дії дроселя на трубопроводах діаметрами від 40 до 100 мм виявився несумісним з практично миттєвим спрацьовуванням пневматичного виконавчого механізму. Через різкий поворот заслінки майже на 90^0 у високошвидкісному газовому або повітряному потоці виникали істотні перепади гідродинамічного напору, що призводило до руйнування кріплення заслінки до поворотного штоку дроселя і кінцевих вимикачів. Цей недолік має місце і при використанні електричних виконавчих механізмах з постійною швидкістю. Для виключення зазначеного недоліку було видано рекомендації використовувати пневматичні виконавчі механізми фірми «CAMOZZI» з циліндрами. На поршні циліндрів встановлені постійні магніти. Положення поршня визначаються магнітними датчиками, закріпленими на циліндрі. Циліндри повинні бути оснащені пристроями демпфірування в кінці ходу, з регулюванням інтенсивності гальмування. Швидкість руху циліндра може регулюватися вбудованим регулятором на всьому ходу поршня.

4.2. Методика визначення тривалості імпульсів на діючих печах

Розрахунок параметрів імпульсного опалення здійснюється шляхом дослідження динамічних характеристик об'єкта. При цьому основними параметрами є тривалість імпульсів і пауз між ними. Для цього необхідно отримати криві розгону, а потім виконати розрахунки, наведені нижче.

Так як, метал, який нагрівається, являє собою об'єкт, в якому може накопичуватися енергія, то диференціальне рівняння динаміки нагріву в різних точках по ширині печі являє собою інерційну ланку 2-го порядку.

$$T_2^2 \frac{d^2 X_{вых}}{d\tau^2} + T_1 \frac{dX_{вых}}{d\tau} + X_{вых} = k \cdot X_{вх} \qquad (4.1)$$

де $X_{вых}$ – температура в конкретній точці по ширині печі (рис. 4.3, т.1 – т.5), ^{0}C;

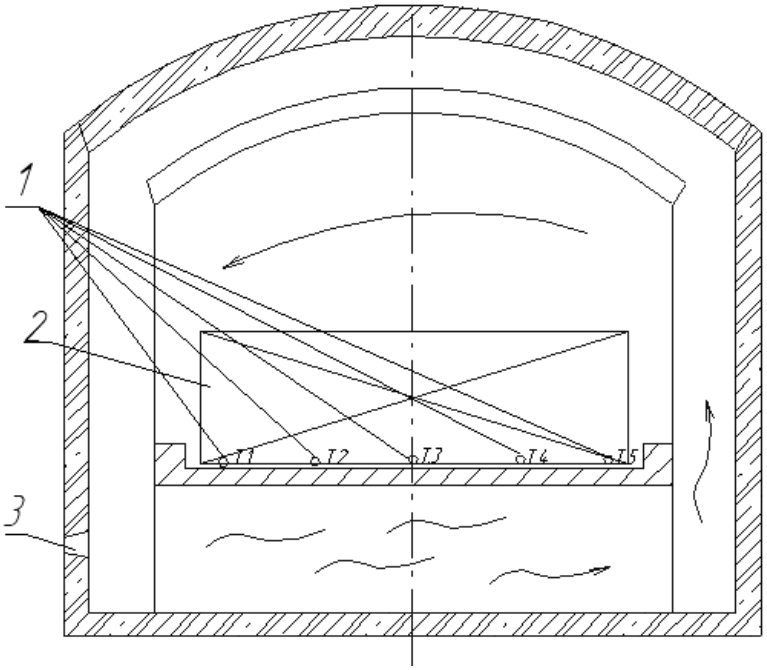


Рисунок 4.3 - Поперечний розріз печі з підподовими топками

1 - розташування точок вимірювання температури по ширині печі на рівні поду; 2 - садка; 3 - пальниковий пристрій

$X_{вх}$ – зміна на вході (витрата палива при встановленому співвідношенні «газ-повітря»), м^3/ч;

T_1, T_2 – постійні часу, с;

k – коефіцієнт передачі об’єкта регулювання, ^{0}C;

τ – час, с.

Передавальна функція ланки 2-го порядку має вигляд:

$$W(p) = \frac{k}{T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1}$$

Тимчасова характеристика цієї ланки залежить від того, чи має знаменник передавальної функції речові або пов'язані-комплексні корені. Виходячи з постановки задачі, приймається, що знаменник передавальної функції має два рівних речових негативних кореня для кожної точки вимірювання, так як в об'єкті може накопичуватися енергія. Звідки, відповідно до теорії управління, отримуємо вираз:

$$T_2^2 \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1 = 0;$$

З якого знаходимо корені

$$p_{1,2} = \frac{-T_1 \pm \sqrt{T_1^2 - 4 \cdot T_2^2}}{2 \cdot T_2^2} = -\frac{T_1}{2 \cdot T_2^2} \pm \sqrt{\frac{T_1^2}{4 \cdot T_2^4} - \frac{1}{T_2^2}}.$$

Так як для характеристики теплових процесів застосовується параболічний тип диференційних рівняннь, в яких корені однакові, то $\frac{T_1^2}{4 \cdot T_2^4} - \frac{1}{T_2^2} = 0$ [97, 98], то приймаємо, що $T_1 = 2 \cdot T_2$.

Звідси передавальна функція ланки 2-го порядку з двома рівними речовими коренями має вигляд для кожної точки по ширині печі:

$$W(p) = \frac{k}{(T_2 \cdot p + 1)^2} \qquad (4.3)$$

З передавальної функції, переходячи від оператора Лапласа до частотних характеристик $p = i\omega$, отримаємо амплітудно-фазові частотні характеристики

$$W(i\omega) = \frac{k}{(Ti \cdot \omega + 1)^2} \qquad (4.4)$$

Для розрахунку тривалості подачі палива з амплітудно-фазової характеристики знаходимо амплітудно-частотну характеристику:

$$A(\omega) = \frac{k}{T^2 \cdot \omega^2 + 1} \qquad (4.5)$$

За умовами імпульсного нагріву бажано отримати мінімальне відхилення температури в кожній точці вимірювання. Тому порівнюємо праву частину виразів (4.5) з мінімальним значенням перепаду температур $t_{\min}$, після чого з цих виразів знаходимо час інтервалу частоти реверсування.

$$\Delta t_{\min} = \frac{k}{T^2 \cdot \omega^2 + 1}, \qquad (4.6)$$

$$\omega = \frac{\sqrt{k / \Delta t_{\min} - 1}}{T} \qquad (4.7)$$

Звідки тривалість імпульсу знаходиться з наступного

$$t_u = \frac{1}{\omega} = \frac{T}{\sqrt{k / \Delta t_{\min} - 1}}. \qquad (4.8)$$

4.3. Результати експериментальних досліджень

При виконанні експерименту в робочому просторі печі встановили 5 хромель-алюмелевих термопар, на рівній відстані один від одної по ширині печі в одній із зон. Робочі спаї термопар розміщували на поверхні поду (рис. 4.3). Експериментальний відпал при 680 ^{0}C проводили на печі № 19 термічного цеху заводу «Дніпроспецсталь» 1). Значення температури відображалися на діаграмній стрічці вторинного показуючого і реєструючого приладу КСП-4.

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

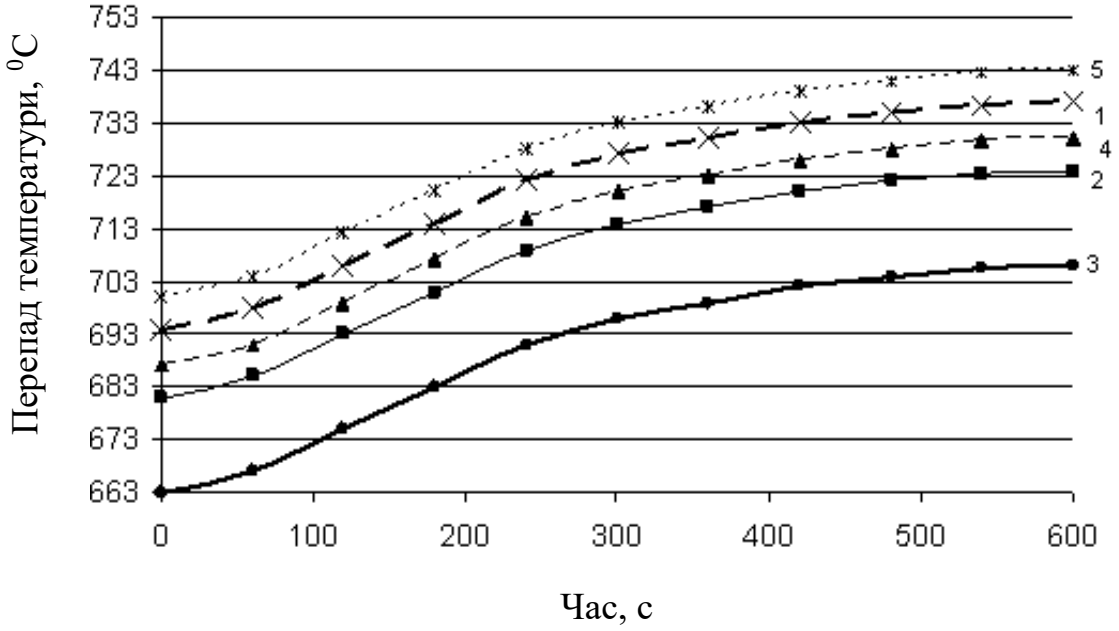
$$\Delta t_{\min} = \frac{k}{T^2 \cdot \omega^2 + 1} \qquad (4.9)$$

де k - коефіцієнт передачі об'єкта, 0С;

Т - час об'єкта, за який досягається стале значення температури при подачі ступеневого обурення, сек.

Проведені експериментальні дослідження були засновані на періодичному відключенні подачі палива до пальникових пристроїв при різній теплової потужності.

Виконання експерименту здійснювалося шляхом ступінчастої подачі палива і повітря. У цьому випадку на вторинному приладі отримуємо криві розгону в 5 точках по ширині печі, які показані на рис. 4.4.



Рисунку 4.4 - Експериментальні криві розгону по 5 точкам по ширині однієї зони печі

Значення коефіцієнта передачі і постійної часу об'єкта визначається шляхом графічного диференціювання. Проводиться дотична до кривої розгону. Там, де дотична перетинає вісь часу і лінію сталого значення, є часом об'єкту. Коефіцієнт передачі дорівнює ступінчатій зміні сигналу від попереднього до наступного.

Для експерименту ці коефіцієнти дорівнюють: $K = 40$ ^{0}C та $T = 9{,}8$ хв = 588 с (рис.4.5).

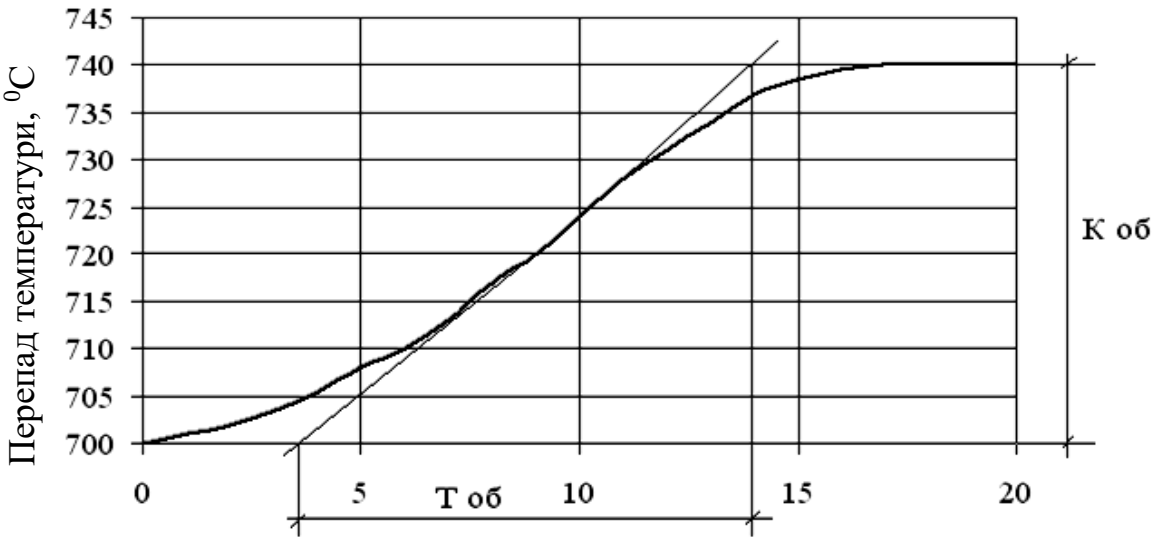


Рисунок 4.5 - Графік кривої розгону температури

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

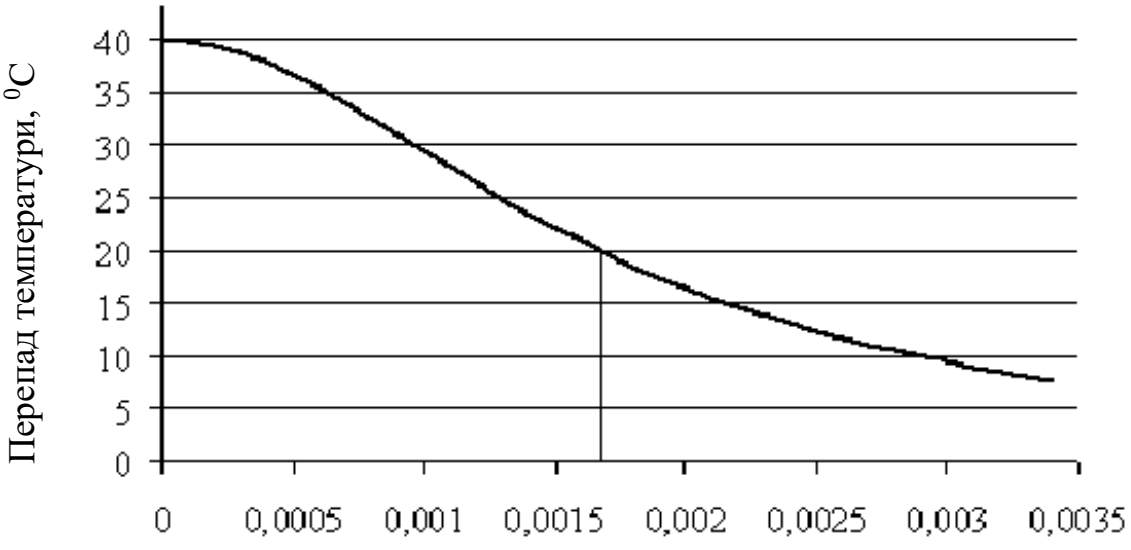


Рисунок 4.6 - Амплітудно-частотна характеристики

Необхідне значення перепаду температур $\Delta t_{\min} = 20^0 C$.

За вище наведеною методикою отримуємо амплітудно-частотну характеристику.

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

При перепаді температури $\Delta t_{\min} = 20^0 C$ час тривалості імпульсу становить 600 сек. Для середньої точки по ширині зони печі експериментально було отримано 588 сек (див. Рис. 4.5). Похибка розрахунку

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

Наведена методика дозволяє визначити час тривалості імпульсу подачі палива і повітря до пальників, за яке стабілізується температура по ширині печі з мінімальним перепадом температури в різних точках.

Висновки до розділу

1. На основі аналізу виробничих випробувань встановлено, що найбільш ефективним в системах імпульсного опалення є використання пневматичного виконавчого механізму з циліндрами і змінною швидкістю переміщення штоку.
2. Розроблено методику графоаналітичного методу визначення тривалості імпульсів подачі палива і повітря в період витримки металу для будь-якого технологічного об'єкта.
3. За допомогою динамічної ідентифікації експериментальних даних (перехідних процесів) і частотних характеристик на підставі розробленої методики, можливо змінювати тривалість подачі палива і повітря в робочий простір печі у ході технологічного режиму.
4. За допомогою розробленої методики був проведений розрахунок тривалості імпульсу, і результати оцінювалися за допомогою експериментальних даних. Похибка розрахунку склала 2%.

ВИСНОВКИ

На основі теоретичних та експериментальних досліджень теплових процесів у термічних печах вирішено важливу науково-технічну задачу щодо зниження витрати палива та підвищення їх продуктивності

Аналіз науково-технічної літератури показав, що найбільш перспективними напрямками підвищення ефективності роботи вищевказаних пічних агрегатів є нові методи та пристрої, спрямовані на організацію керованої масопереносу в робочому просторі печей.

Розроблена математична модель, що дозволяє визначити розподіл температур по ширині печі та витраті палива як функції коефіцієнта витрати повітря. Результати розрахунків дозволили встановити час скорочення термообробки і сумарну витрату палива на піч.

Розроблено методику визначення тривалості імпульсів подачі палива та повітря при імпульсному нагріванні печей в період витримки металу. Розроблено методику графоаналітичного методу визначення тривалості імпульсів подачі палива і повітря в період витримки металу для будь-якого технологічного об'єкта.

За допомогою динамічної ідентифікації експериментальних даних і частотних характеристик на підставі розробленої методики, можливо змінювати тривалість подачі палива і повітря в робочий простір печі у ході технологічного режиму.

Було розраховано та порівняно значення теплових втрат при імпульсному та безперервному способі опалення. Проведений експеримент показав, що теплові втрати печі значно зменшились. При безперервному режимі опалення цей показник дорівнював 42,5 %, а при імпульсному – 27,5%. Як наслідок показник втрати тепла на нагрів металу збільшився з 43,9 % до 62,5 %. Завдяки цьому можна зробити висновок, що нагрівання металу буде більш рівномірне.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Енергозберігаючі технології нагріву металу в колодязях, методичних і термічних печах. Гарячий посад і пряма прокатка. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://metallurgy.zp.ua/energosberegayushhie-tehnologii-nagreva-metalla-v-kolodtsah-metodicheskih-i-termicheskih-pechah/
2. Печі для нагріву злитків. [Електронний ресурс] Режим доступу: https://studopedia.su/3_35384_teplovoy-balans-i-rashod-topliva.html
3. Котляревський Е.М., Кузовніков АЛ. Економія палива і зниження чаду металу при нагріванні злитків і заготовок // Бюл. НТІ. Чорна металургія. 1985. N ° 9. С. 16-21.
4. Тимошпольский В. И. Аналіз способів нагріву великотоннажних промислових злитків з незатверділою серцевиною/ В. М. Ольшанский, С М. Каеишов - Національна металургійна академія України, 2004. – 29с.
5. Дубина О.В. Розробка режимів нагріву великотоннажних злитків з підвищеним теплосодержанием / О.В. Дубина, В.І. Тімошпольскій, В.І. Губинський і ін. / / Зб. науч. тр .: Металургійна теплотехніка. Дніпропетровськ. 2002. №7. С.116-123.
6. Губинський В.І. Нагрівальні печі металургії - сьогодні і завтра // Теорія і практика металургії. Дніпро. - 2004. - № 6. - С. 56 - 60.
7. Сорока Б.С. Інтенсифікація теплових процесів в паливних печах. - К .: Наук. Думка, 1992. - 416 с.
8. Губинський В.І. Актуальні завдання реконструкції нагрівальних печей // Металургійна теплотехніка: Зб. наук. тр. НМетАУ. У двох книгах. - Книга перша. - Дніпропетровськ: Пороги, 2005. -С. 149 - 156.
9. Губинський В.Й., Єрьомін А.О., Сибір А.В., та ін. Робота нагрівального колодязя з кульковими регенераторами // Металургійна та гірничорудна промисловість. - 2005. № 1. - С.103-105.

10. Патент України на корисну модель № 26272. Об'ємно-регенеративний спосіб спалювання палива при нагріванні металу / Єрьомін О.О., Губинський В.Й, Сибір А.В. – Опубл. Бюл. № 14, 2007.

11. Єрьомін А. О. Організація регламентованого спалювання палива в нагрівальних печах з метою створення рівномірного температурного поля // Металургійна теплотехніка: зб. науч. тр. НМетАУ. Дніпро: Нова ідеологія. 2012. Вип. 4 (19). С. 78-83.

12. Закон України "Про охорону праці". Верховна Рада України; Закон від 14.10.1992 № 2694-X1I - К.: Основа, 1993.

13. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - К.: Держстандарт, 1999.

14. ДСН 3.3.6.037-99.Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. -К.: Держстандарт, 1999.

15. ГН 3.3.5-8.6.6.1-2002. Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу. Наказ Міністерства охорони здоров'я України № 528 від 27.12.2001.

16. НПАОП 40.1-1.32-01. «Правила будови електроустановок. Електрообладнання спеціальних установок». - К.: Держгірпромнагляд України, 2001.