

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

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота

другий магістерський

(рівень вищої освіти)

на тему: «Дослідження шляхів підвищення енергетичної ефективності
методичних печей промислових підприємств»

Виконав: студент II курсу,

групи 8.1441

спеціальності 144 теплоенергетика

освітньої програми теплоенергетика

Гулак Євгеній Ігорович

Керівник доц., к.т.н., Осаул О. І.

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент к.т.н. Карпенко Г.В.

(вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2022

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

ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра Теплоенергетики та гідроенергетики

Рівень вищої освіти другий магістерський

Спеціальність 144 Теплоенергетика

Освітня програма Теплоенергетика

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« 5 » 12 20 22 року

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Гулаку Євгенію Ігоровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) «Дослідження шляхів підвищення енергетичної ефективності методичних печей промислових підприємств»

керівник роботи Осаул Олександр Іванович, канд. техн. наук, доцент.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затвержені наказом ЗНУ від « 25 » жовтня 2022 року № 1454-с

2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2022 року.

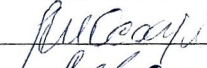

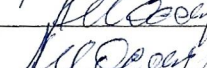

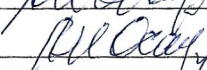
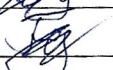


3 Вихідні дані до роботи: характеристика методичної печі, схема розташування пічних пальників та температурних датчиків печі, потужність пальників, час нагрівання заготівлі в печі та необхідна температура при її видачі із печі.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): 1. Аналіз стану питань з управління процесом нагрівання металу в методичних печах 2. Розробка динамічної моделі процесу нагрівання металу за методом планованого експерименту. 4. Розробка алгоритму оптимізації процесу нагрівання металу у методичних печах. 4. Техніко-економічна оцінка реалізації запропонованого заходу.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Загальний вигляд методичної печі. 2. Креслення методичної печі з крокуючими балками. 3. Фрагмент блок-схеми алгоритму складання

теплого балансу печі. 4.Графік відхилення розрахункових параметрів моделі від дійсних. 5.Математичне планування експериментів. 6.Динамічна поліноміальна модель нагріву металу.7. Алгоритм процесу нагрівання металу у методичній печі.8.Техніко-економічний ефект запропонованого заходу.

6 Консультанти розділів роботи

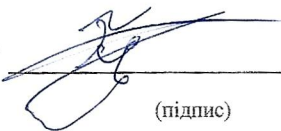
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Осаул О.І., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 2	Осаул О.І., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 3	Осаул О.І., доц. каф. ТГЕ		
Розділ 4	Осаул О.І., доц. каф. ТГЕ		

7 Дата видачі завдання 01.09.2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Прим.
1	Аналіз стану питань управління процесом нагріву металу у методичних печах	31.10.2022	
2	Розробка математичної моделі процесу нагріву металу	05.11.2022	
3	Розробка системи управління процесом нагріву металу у методичній печі	14.11.2022	
4	Техніко-економічна оцінка реалізації запропонованого заходу	01.12.2022	

Студент


(підпис)

Є.І. Гулак

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)


(підпис)

О.І. Осаул

(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер


(підпис)

С.Є. ЧИЖОВ

(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Гулак Є.І. «Дослідження шляхів підвищення енергетичної ефективності методичних печей промислових підприємств».

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 - Теплоенергетика. Науковий керівник – канд. техн. наук, доцент Осаул О.І. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету. Кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2022 р.

Проведено аналіз відомих систем автоматичного керування процесом нагрівання металу. Розроблена та перевірена на адекватність математична модель методичної печі. Розроблена динамічна модель процесу нагрівання металу за методом планованого експерименту. Розроблено алгоритм оптимізації процесу нагрівання металу у методичних печах. Надана техніко-економічна оцінка запропонованих заходів.

Ключові слова: методична піч, система управління, алгоритм, оптимізація, математична модель, енергоефективність, паливник, термін окупності

ABSTRACT

Gulak E.I. «Research on ways to increase the energy efficiency of methodical furnaces of industrial enterprises».

Qualifying final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Heat Power Engineering, Supervisor Ph.D., Associate Professor Osaul O.I. Zaporizhzhya National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Yu.M. Potebny, Department of Thermal Power Engineering and Hydro Power Engineering, 2022.

An analysis of known systems of automatic control of the metal heating process was carried out. A mathematical model of the methodical furnace was developed and checked for adequacy. A dynamic model of the metal heating process was developed using the method of the planned experiment. An algorithm for optimizing the metal heating process in methodical furnaces has been developed. A technical and economic assessment of the proposed measures is provided.

Keywords: methodical furnace, control system, algorithm, optimization, mathematical model, energy efficiency, burner, payback period

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Аналіз стану питань управління процесом нагріву металу у методичних печах.....	10
1.1 Класифікація та конструктивні особливості методичних печей.....	10
1.2 Характеристика процесу нагрівання металу з позиції керування.....	18
1.3 Аналіз відомих систем автоматичного керування процесом нагріву металу.....	22
1.4 Аналіз використання методів динамічної оптимізації для управління процесом нагрівання металу.....	25
2 Розробка математичної моделі процесу нагріву металу	29
2.1 Вимоги до складання математичної моделі методичної печі для завдань управління.....	29
2.2 Аналіз відомих моделей методичних печей.....	31
2.3 Структура моделі нагрівання металу у методичній печі.....	34
2.3.1 Алгоритм розрахунку процесу горіння палива у методичній печі	35
2.3.2 Алгоритм розрахунку зовнішнього теплообміну у робочому просторі печі.....	41
2.3.3 Алгоритм розрахунку нагріву металу.....	43
2.3.4 Алгоритм складання теплового балансу методичної печі.....	47
2.4 Аналіз адекватності математичної моделі методичної печі.....	55
3 Розробка системи управління процесом нагріву металу у методичній печі.....	58

3.1 Аналіз послідовності функціонування системи динамічної оптимізації.....	58
3.2 Синтез динамічної моделі методичної печі.....	59
3.3 Алгоритм динамічної оптимізації процесу нагрівання металу методичної печі та його програмна реалізація.....	66
3.4 Обчислювальні дослідження ефективності алгоритму динамічної оптимізації процесу нагрівання металу в методичній печі.....	69
4. Техніко-економічна оцінка реалізації запропонованого заходу.....	72
4.1 Порівняльний аналіз використання динамічних алгоритмів та розпізнаючої оптимізації.....	72
4.2 Обґрунтування параметрів технічних засобів системи керування.....	75
4.3 Техніко-економічне обґрунтування доцільності використання алгоритму розпізнавальної оптимізації.....	77
4.4 Дослідження можливості підвищення керованості методичної печі.....	79
Висновки.....	86
Перелік посилань.....	87

ВСТУП

Актуальність роботи. Використання енергозберігаючих технологій - це найбільш перспективний напрямок для металургійних підприємств України. Отже, питання розробки і впровадження енергозберігаючої системи управління методичними печами з метою зниження витрати природного газу є актуальним.

У процесі проектування системи управління процесом нагрівання металу найбільш складним є розробка алгоритму керування. Синтез алгоритмічних і програмних засобів розроблюваних систем ґрунтується на сучасних методах оптимізації і математичного моделювання, а ефективність їх застосування визначається відповідністю методу оптимізації математичної моделі процесу.

Отже, розробка алгоритму управління, який би найбільш повно відповідав вимогам, які висуваються до сучасних САУ методичними печами, є важливим науковим завданням.

Мета роботи - розробка енергозберігаючої автоматичної системи управління нагрівом металу у методичних печах.

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

1. Провести аналіз відомих систем автоматичного керування процесом нагріву металу.
2. Розробити та перевірити на адекватність технологічну модель методичної печі.
3. Розробити динамічну модель процесу нагрівання металу за методом планованого експерименту.
4. Розробити алгоритм оптимізації процесу нагрівання металу у методичних печах.
5. Дати техніко-економічну оцінку запропонованих заходів.

Об'єкт дослідження- процес нагрівання металу у методичних печах.

Предмет дослідження - керування процесом нагрівання металу у методичних печах.

Методи та засоби дослідження. Поставлені задачі вирішувались за допомогою розрахунково-теоретичного методу, що базується на використанні класичних законів тепломасообміну, методу планованого експерименту, спільного застосування розрахункових і інженерних методик дослідження. Використано програмний продукт MathCAD.

Практична цінність роботи. Підтверджена можливість використання додаткового керуючого впливу у вигляді зміни витрати палива у рекуперативній зоні для зниження сумарної витрати газу.

Апробація роботи. Результати роботи представлені на II Всеукраїнській науково-практичній конференції за участю молодих науковців «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України» 18-20 жовтня 2022 р.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел посилання з 30 позицій. Загальний обсяг складає 90 сторінок, у тому числі 21 ілюстрацій та 11 таблиць.

1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАНЬ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ НАГРІВУ МЕТАЛУ У МЕТОДИЧНИХ ПЕЧАХ

1.1 Класифікація та конструктивні особливості методичних печей

Класифікацію промислових печей за основними ознаками представлено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація промислових печей

Загальний вигляд камерної печі, яка має викатний під представлено на рисунку 1.2.

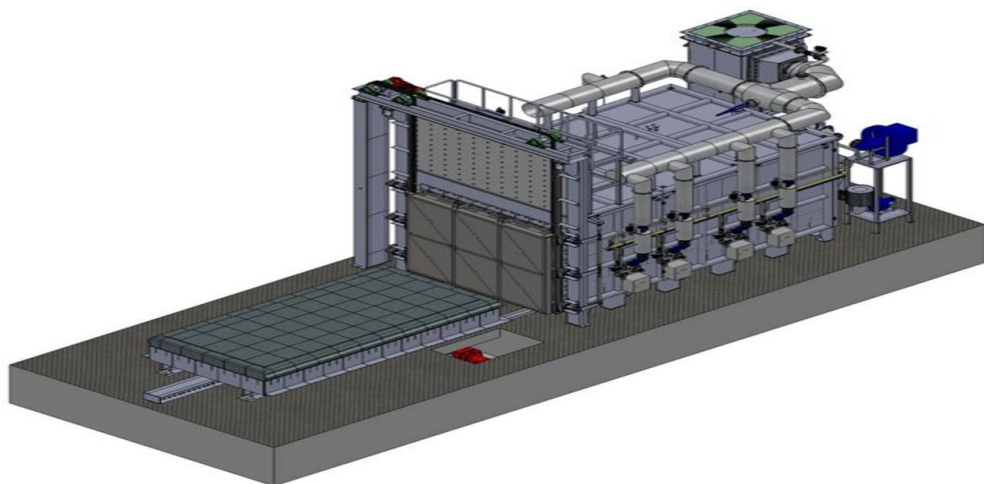


Рисунок 1.2. Загальний вигляд камерної печі з викатним подом

Загальний вигляд камерної печі з крокуючим подом представлено на рисунку 1.3, прохідної печі- на рисунку 1.4.



Рисунок 1.3. Загальний вигляд печі з крокуючим подом



Рисунок 1.4. Загальний вигляд прохідної печі

Загальний вигляд методичної печі представлено на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5. Загальний вигляд методичної печі

Основна ознака класифікації методичних печей - це число зон у них. Розрізняють температурні зони та зони спалювання палива [1], при цьому під останніми розуміють частини робочого простору, які забезпечені пальниками чи форсунками. Під температурними зонами розуміють частини робочого простору із суттєво вираженими відмінностями температурного режиму.

Основні типи конструкцій методичних печей розглянуто нижче. Їх загальна характеристика надана у таблиці 1.1 [2-8]. На рисунку 1.6, зображена п'ятизонна штовхальна піч. Заготівлі, які підлягають нагріванню подаються до завантажувального вікна 1 рольгангом завантаження 2 заштовхуються в піч штовхачем. В той же час з вікна видачі 3 до приймального рольгангу 4 подається нагріта заготівля. Робочий простір печі розбито на наступні зони : методична 5, верхня і нижня перші зварювальні 6 та 7, верхня і нижня другі зварювальні 8 і 9, томильна 10. Усі вказані зони, окрім методичної, оснащені пальниками 11, в яких спалюється паливо. У зонах (5...9) заготівлі переміщуються завдяки водоохолоджуваним подовим трубам 12, а 10 – по монолітній подині 13. З методичної зони продукти згоряння надходять до рекуператора 14, де нагрівають повітря, яке подається для горіння.

Таблиця 1.1 - Характеристики методичних печей

Характеристика	Переріз виробу, що нагрівається, мм х мм, і його довжина, м							
	60x60, 11,8	80x80, 11, 0-12,0	80x80, 12,0	235x235- 260x260, 1,225	50-230x700- 1550, 3,0-6,3	200- 240x750- 1550, 4,6 та 9,5	250- 320x250- 330, 3,6-5,2	150- 300x900- 1850, 4,5-10,5
Розміри, м								
Ширина	12,5	12,64	12,64	3,36	6,70	10,30	5,8	11,25
Довжина активного поду	15,0	20,5	23,8	18,1	29,0	35,9	31,5	37,3
Площа поду								
Активного	177	234	106	44	183	332	164	400
Габаритного	190	260	-	61	194	370	183	435
Продуктивність, (т/ч), кг/с	(110) 30,5	(110) 30,5	(110) 30,5	(23) 6,4	(110) 30,5	(205) 57,0	(90) 25,0	(280) 77,8
Теплова потужність, кВт (ккал/ч)	73300 (63 · 10 ⁶)	76800 (66 · 10 ⁶)	76800 (66 · 10 ⁶)	19800 (17 · 10 ⁶)	83700 (72 · 10 ⁶)	176800 (152 · 10 ⁶)	72500 (62,5 · 10 ⁶)	215000 (185 · 10 ⁶)
Паливо	Природний газ	Змішаний газ		Мазут	Змішаний газ			Природний газ
Теплота згоряння палива, МДж/м ³ (ккал/м ³)	35,0 (8400)	9,2 (2200)		39,4 (9400)	7,55 (8400)	6,7 (1600)	10,5 (2500)	20,9 (5000)
Температура підігріву, °С								
Повітря	400			-	450	500	500	400
Газу	-	-	-	-	350	-	-	-

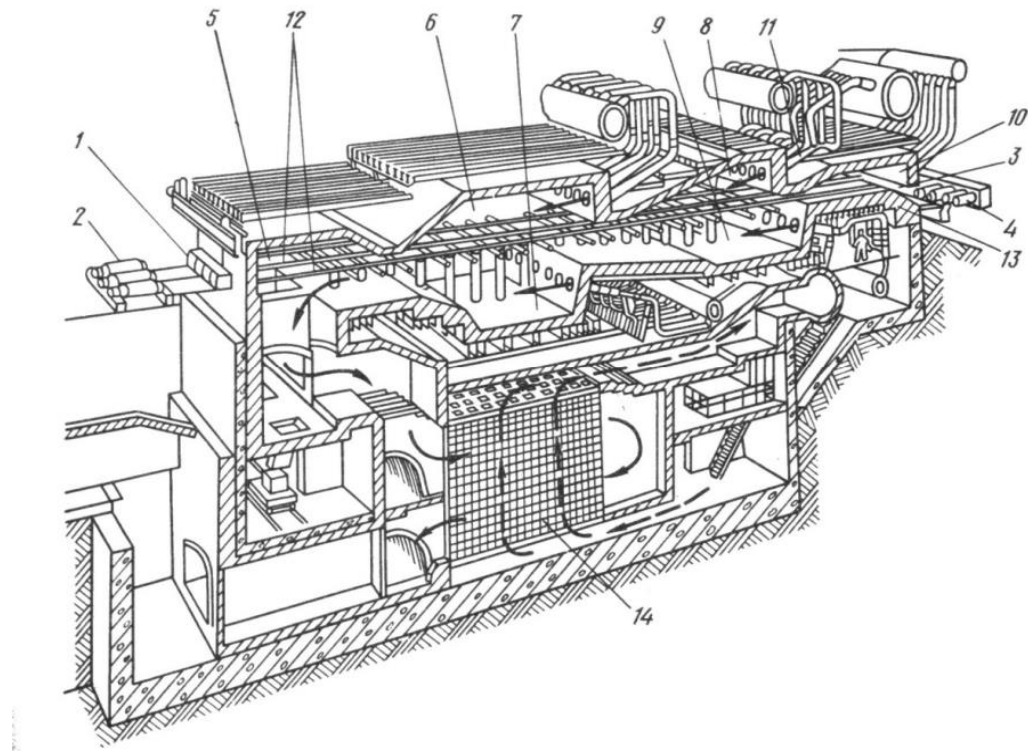


Рисунок 1.6 - Пристрій методичної печі

У зв'язку з тим, що вартість енергоносіїв дорожчає, то актуальною стає проблема їх економії. Забезпечення цієї умови буде можливо при вищих показниках печі (виробнича гнучкість і якість нагріву з обмеженнями за температурою наступних однією за одною партій металу різних марок сталі, а також додаткові виробничі втрати).

Так разом із традиційними штовхальними методичними печами, одна з конструкцій яких зображена на рисунку 1.6, останнє десятиліття в нашій країні і особливо за кордоном (США, Японія, ФРН та ін.) створювалися методичні печі з крокуючими балками. У цих печей більш висока якість нагріву, необмежена довжина печі, а, отже і продуктивність та можливість швидкого завантаження і розвантаження. До недоліків таких печей можна віднести великі капітальні та теплові втрати.

У кваліфікаційній роботі розглядається методична піч із крокуючими балками, загальний вигляд якої зображено на рис.1.7.

Сляби до печі надходять безпосередньо зі складу, транспортуються по

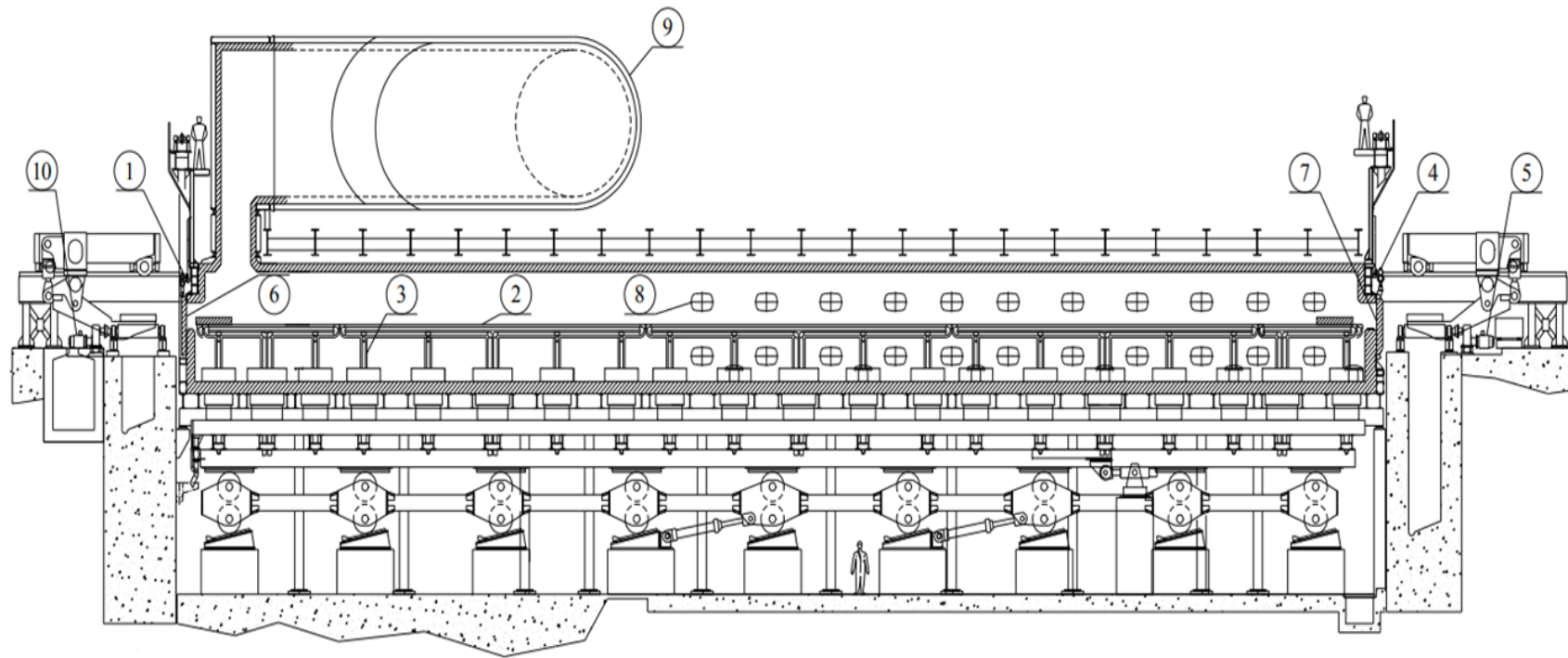


Рисунок 1.7 - Загальний вид методичної печі з крокуючими балками

1 – механізм завантажувальної машини; 2 – система крокуючих балок (рухливі та нерухомі); 3 – стояки подових труб;
 4 – механізм розвантажувальної машини; 5 - розвантажувальний рольганг; 6 – завантажувальні дверцята печі; 7 –
 розвантажувальні дверцята печі; 8 – засклені оглядові вікна; 9 – рекуператор; 10 - завантажувальний рольганг

завантажувальному рольгангу, а потім зупиняються на останньому перед піччю, піддаються процесу вирівнювання. Після проведення вимірювання довжини слябу проводиться його позиціонування згідно плану посади. Механізм завантажувальної машини 1 підіймає сляб із рольгангу та просуває всередину печі на місце, яке попередньо звільнилося. Сляби спираються на систему подових труб 2, які у свою чергу підтримуються поруч стояків 3. Механізм поду складається із комплексу нерухомих і рухомих балок, що чергуються і розташовуються поперек печі та мають охолодження, яке покращує їх механічну міцність. Сляби спираються на нерухомі балки, а піднімаються та переміщуються вперед рухомими балками, що рухаються по прямокутній траєкторії. Внутрішня частина печі має сталевий кожух із вогнетривким обмуровуванням. За мірою руху слябів від завантажувальної до розвантажувальної сторони, вони послідовно нагріваються до необхідної температури. Потім механізм розвантаження 4 підіймає сляб над рівнем пода, відводить його та розміщує на розвантажувальний рольганг 5.

Після попереднього позиціонування металу на завантажувальному рольгангу перед піччю машина підштовхує сляб вперед у позицію перпендикулярно печі. Під час цієї операції проводяться заміри ширини і довжини слябу 2 лазерними телеметрами, які встановлені на обох кінцях рольгангу. Далі відкривається завантажувальне вікно, і сляб подається всередину печі в позицію, яка розрахована на підставі його ширини та ходу завантаження попереднього слябу. Потім машина повертається до вихідного стану і вікно закривається.

Після точного автоматичного позиціонування (згідно з планом посади) і переміщення слябу завдяки механізму завантаження на стаціонарні балки він потрапляє на рухливі балки та просувається вперед. Крокове переміщення в печі виконується узгодженою послідовною роботою підйомної і штовхаючої рами. Під час руху підйомної рами вгору і вниз щодо основи, штовхаюча рама стоїть на місці та рухомі балки переміщуються лише вгору та вниз. Коли штовхаюча рамка рухається вперед і назад на

підйомній рамі, остання стоїть на місці та рухомі балки переміщуються лише вперед і назад. Отже, рухливі балки рухаються прямокутною траєкторією, що складається з 4 основних рухів: вгору та вперед, вниз та назад. Прохід слябу через піч автоматично фіксується детекторами, які встановлені у томильній зоні, із зупинкою в позиції розвантаження, звідкіля забирається за допомогою розвантажувального механізму.

Механізм приводу крокуючого поду складається із верхньої рухомої рами, де встановлені рухомі балки, та нижньої рами, яка підтримує верхню і спирається на похилі рами. У цій печі забезпечено рівномірне переміщення балок з ходами в вертикальному напрямку - 200 мм та горизонтальному - 500 мм, при чому час циклів складає 45 с. У разі тривалого зупинення прокатного стану крокуючий під переходить у режим утримання, при якому рухливі і нерухомі балки знаходяться на одному рівні і метал спирається на них одночасно.

Завантажувальні дверцята 6 складаються з 2 симетричних половин, які приводяться в рух синхронно або окремо за рахунок гідравлічного циліндра. Їх час відкриття при кожному завантаженні точно регулюється кінцевими вимикачами, що дає змогу зменшити теплові втрати печі. Дверцята - це сталева конструкція, прикріплена до поперечини. Поперечина підвішується двома ланцюгами, які ковзають по жолобу. Принцип роботи розвантажувальних дверцят і вищеописаних завантажувальних ідентичний. Основна відмінність між ними полягає в тому, що розвантажувальні дверцята обладнані водоохолоджувальною рамою задля запобігання її температурній деформації. Через люки очищення, доступ до яких здійснюється із робочого майданчика на рівні дна печі, видаляється окалина з поду печі.

У бічних стінах печі є заклені оглядові вікна 8, які розташовані вище та нижче рівня балок. Через вікна спостерігають за процесами в печі і за формою факела. Ці вікна, так як і люки з пневматичним приводом дають можливість здійснювати контроль за ходом процесу, забезпечуючи при цьому зменшення втрат тепла за більш простого обслуговування.

Система спалювання палива розрахована на забезпечення номінальної продуктивності печі 350 т/год. Нагрів печі у верхніх і нижніх зонах виконується шляхом спільного використання регульованих пальників. Передбачається 2 вентилятори подачі повітря для горіння. На виході із рекуператора гаряче повітря спершу направляється у загальний трубопровід, а далі розподіляється по пальникам.

Димові гази відводяться через отвори на склепінні із завантажувальної сторони печі 9 до рекуператора. Рекуператор – це теплообмінник, у якому димові гази конвекцією передають тепло пучку труб, нагріваючи повітря, яке проходить через них і використовується потім для горіння.

1.2 Характеристика процесу нагрівання металу з позиції керування

Відомо, що основним направлено змінюваним керованим параметром в процесі нагрівання металу є температура робочого простору. Саме вона передусім визначає тепловіддачу металу, розподіл температур у його масі, інтенсивність окалиноутворення, знос конструкції печі та інші важливі характеристики процесу теплової обробки металу і роботи агрегату [9-19]. Вищевказана температура - це головне джерело інформації щодо теплового стану окремих зон і всієї печі у цілому. На основі її вимірних значень складають інструкції з нагрівання, проводять тепловий розрахунок зон, розраховують нагрів металу, задають температурний профіль печі, здійснюють управління тепловим і температурними режимами.

Методична піч - це агрегат із протиточним рухом виробів, які нагріваються, і теплоносія в якому управляючі впливу (теплове навантаження по зонам, гідравлічний режим тощо) додаються у різних геометричних точках печі, так, щоб ефект цих впливів безперервно поширювався її простором. Підведення тепла до поверхні металу здійснюється завдяки випромінюванню факела, продуктів горіння, стін і склепіння, а також конвекції. Остання складова істотна тільки у методичній

зоні при високій швидкості продуктів горіння, що забезпечується багаторазовою примусовою рециркуляцією, яка створюється завдяки спеціально встановленим вентиляторам. У результаті вищезазначених особливостей розглянутих методичних печей, вони можуть розглядатися як об'єкт управління з розподіленими параметрами [20].

Якісне нагрівання металу характеризується наступними показниками: температура поверхні заготівлі, усереднена за її довжиною, на виході з печі відповідає заданому значенню з точністю $\pm (10 \dots 15) \text{ }^\circ\text{C}$; заготівлі прогріті так, що перепади температур $(20 \dots 40) \text{ }^\circ\text{C}$ за їх товщиною не перевищують допустимих значень. Величина ж останніх у місцях зіткнення заготівель із подовими трубами становить $(50 \dots 70) \text{ }^\circ\text{C}$ [9].

При керуванні тепловим режимом методичної печі, температуру заготівель на її виході обирають за умови врахування впливу останньої на умови нагріву металу, на якість наступної прокатки: чим вища температура металу на виході з печі, тим, зазвичай, більша пластичність металу, менше зусилля і витрата електричної енергії, які витрачаються на його деформацію при прокатці, менше зношування і ризик пошкодження прокатного обладнання. Очевидно, що зі зростанням розвантажувальної температури умови прокатки будуть сприятливішими. І лише при дуже високій температурі розвантаження пластичність і міцність металу знижуються («перегрів»), метал стає крихким і при його прокатці утворюються так звані рванини («перепал»). Для кожної марки сталі існує максимально допустиме значення температури розвантаження, яке виключає вказаний перегрів.

Також важливо, щоб температура переднього кінця заготовки була менше температури заднього, тому що останній довше знаходиться в прокатці і, отже, більше охолоджується до закінчення. При цьому слід зазначити, що на сучасних станах, які працюють при великих швидкостях прокатки, вимоги до зменшення перепаду менш істотні [21].

При інтенсивному нагріванні заготовок великої товщини високовуглецевих чи легованих сталей, які мають низьку теплопровідність,

між поверхнею та серцевиною заготівлі виникає значний перепад температур, що призводить до появи значних термічних напруг. У випадку, коли сталь не має достатньої пластичності у заготівлі з'являються внутрішні тріщини. Тому швидкість нагрівання таких сталей діапазону температур до (500 ... 700) °C обмежується. Вище цієї температури пластичність сталей збільшується настільки, що обмежувати швидкість подальшого нагріву вже недоцільно.

Існують два найбільш прийнятні підходи до оптимального управління нагріванням металу, які відображають певні економічні вимоги до роботи печей. У першому випадку піч розглядають як незалежний від стану об'єкт управління з повною інформацією, а за другим – як об'єкт управління з неповною інформацією комплексу «піч-стан» [22-25].

Для розгляду методичної печі як об'єкта управління з повною інформацією потрібно задати ті параметри, які пов'язують піч зі станом та залежать від роботи останнього. Це наступні параметри: час нагрівання заготівлі в печі та необхідна температура при її видачі із печі. Вважаючи для конкретної заготівлі заданим час нагрівання τ_n та її розподіл температури при видачі з печі, відповідно до поставлених вище завдань такий економічний критерій оптимізації набуває наступного вигляду (для N заготівель необхідно відповідним чином підсумувати значення цього критерію):

$$I_1(u, \tau_n) = c_m \cdot W_0 \cdot (u, \tau_n) + c_t \cdot \int_0^{\tau_n} B \cdot (u, \tau) \cdot d\tau + c_a \cdot \int_0^{\tau_n} D \cdot (u, \tau) \cdot d\tau + c_n, \quad (1.1)$$

де $u = u(\tau)$ - керуючий вплив на інтервалі часу $[0, \tau_n]$;

c_m, c_t, c_a, c_n - відповідно вартісні заходи шкоди від окислення металу, витрати палива, зносу печі, неточності нагріву;

$W_0(u, \tau)$ - маса окалини, що утворилася, до моменту часу τ (при керуючому впливі u);

$B(u, \tau)$ - витрати палива в момент часу τ ;

$\int_0^{\tau_n} D \cdot (u, \tau) \cdot d\tau$ - амортизація печі за час нагрівання;

$Y_c, \Delta Y$ - задана середня температура і перепад температур по перерізу заготівлі;

c_1, c_2 - відповідні вагові коефіцієнти для середніх температур та перепадів відповідно;

$\varphi_1(z)$ та $\varphi_2(z)$ - функції, що характеризують міру шкоди від неточності нагріву для середніх температур та перепадів.

В результаті критерій (1.1) для нагрівання заготівель запропоновано подати у вигляді:

$$I_1(u, \tau_n) = \int_0^{\tau_n} f_0 \cdot (u, \tau) d\tau + f_1 \cdot (Q, Q(\tau_n)), \quad (1.2)$$

де f_0 та f_1 - деякі функції.

Якщо припустити що в критерії (1.1) $c_n = \infty, c_m = c_a = 0$, то отримаємо критерій, який забезпечує мінімізацію витрат палива при заданій температурі металу в кінці нагріву. Таким чином критерій (1.1) може бути закладений в основу створення оптимальної системи управління, якщо відома задана температура металу в кінці нагріву та час нагріву, і в процесі останнього вони контролюються. А цю проблему можливо вирішити тільки за допомогою математичної моделі методичної печі, яка адекватно відображає процеси, що відбуваються в печі.

Якщо ж відсутній надійний прогноз часу нагріву, то розглядають роботу печі в комплексі «піч-стан» і враховують при цьому, що час нагріву $\tau_{н.с.}$ - випадкова величина. Щоб отримати критерій управління для такого випадку, слід до $I_1(u, \tau_{н.с.})$ додати вартість простою стану з вини печей $c_{п.} \cdot \tau_{п.} \cdot (u, \tau_n)$, де $c_{п.} \cdot \tau_{п.} \cdot (u, \tau_n)$ - відповідно ціна одиниці часу простою і час простою стану через відсутність нагрітого металу з вини печей при управлінні та час нагріву $\tau_{н.с.}$, а потім провести статистичне усереднення з розподілення випадкової величини $\tau_{н.с.}$, тобто [27]:

$$I_2(u) = M\{I_1(u, \tau_{н.с.}) + c_{п} \cdot \tau_{п} \cdot (u, \tau_{н})\}, \quad (1.3)$$

де $M\{\cdot\}$ - математичне очікування з розподілення $\tau_{н.с.}$.

В даній кваліфікаційній роботі розглядається випадок при однакових умовах нагріву і прокатки (постійні геометричні розміри, температура посаду заготівель, марки сталі, профілі прокату та продуктивність). Всі ці вимоги можуть бути задоволені при виборі незмінного в часі розподілення температури по довжині методичної печі. В цьому випадку задача управління температурним режимом печі зводиться до автоматичної стабілізації температур в опалювальних зонах впливом на теплове навантаження. Вказані параметри залишаються постійними тільки протягом окремих відрізків часу. Зміни ж цих параметрів потребують відповідних змін температурного режиму печі.

Метою управління нагрівом металу в кваліфікаційній роботі є досягнення мінімальних відхилень температури заготівель на виході з печі до необхідного значення при зведенні до мінімуму витрат енергоресурсів.

Критерій (1.1) буде прийнятним якщо є математичний аналог печі, який дозволяє отримати інформацію щодо об'єкта управління.

1.3 Аналіз відомих систем автоматичного керування процесом нагріву металу

На рис.1.8 наведена узагальнена схема контролю та регулювання теплового режиму тризонної методичної печі. Відповідно до її функціональних можливостей (таблиця 1.2) на печі передбачається регулювання температури кожної із зон, здійснюване впливом на подачу палива та забезпеченням необхідного співвідношення палива і повітря, відсікання палива при падінні тиску останнього або повітря, а також каскадна схема впливу параметра 20 на параметри 7, 12 та 16.

При зміні темпу прокатки виникає необхідність частішої перебудови теплового режиму методичної печі; параметром, що характеризує цей темп є температура її методичної зони, яка вимірюється за допомогою термопар або радіаційного пірометра. Залежно від її значення виставляються завдання регуляторам температур томильної і зварювальної зон. При цьому, як було встановлено, зазначений параметр відображає коливання темпу прокатки із запізненням приблизно на (1 ... 1,5) год., що погіршує ефективність САР.

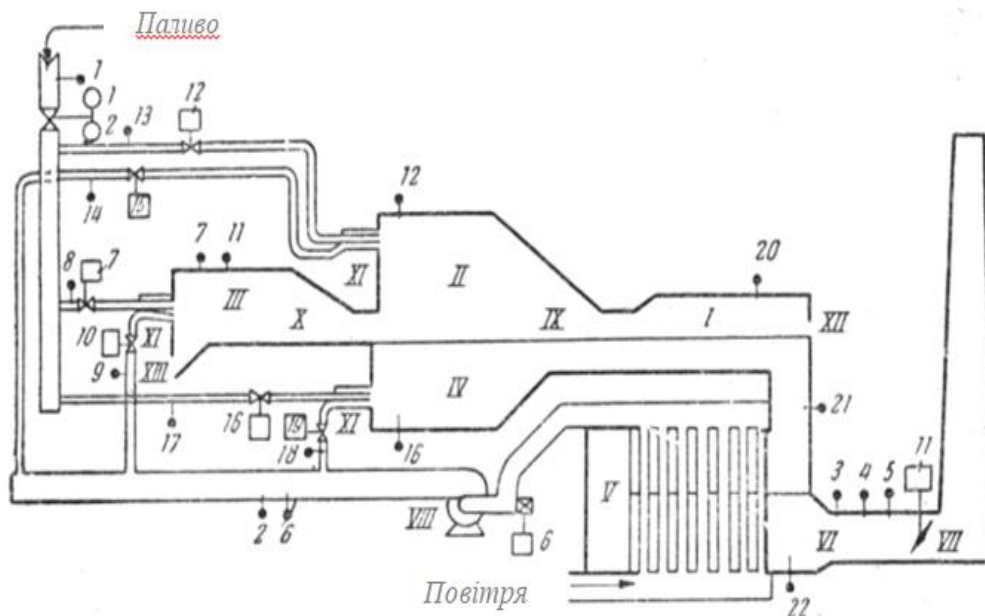


Рисунок 1.8 - Узагальнена схема контролю та регулювання теплового режиму тризонної методичної печі

I – методична зона; II – верхня зварювальна зона; III – томільна зона; IV – нижня зварювальна зона; V – рекуператор; VI – борів печі; VII – шибер; VIII – ексгаустер; IX – глісажні труби; X - монолітний під; XI – пальниковий пристрій; XII - вікно посада; XIII – вікно видачі

Таблиця 1.2 - Характеристика функціональних можливостей системи регулювання теплового режиму тризонної методичної печі

Зона контролю	Піч						Зони печі														Рекуператор	
							Томильна (Рекуперативна)					Верхня зварювальна				Нижня зварювальна				Методична		
	Тиск палива перед піччю	Тиск повітря перед ексгаузером	Температура в борві	розрідження в борві	Газовий аналіз на O ₂	Температура повітря	Температура зони	Витрати палива	Витрати повітря	Співвідношення паливо-повітря	Тиск під склепінням	Температура зони	Витрати палива	Витрати повітря	Співвідношення паливо-повітря	Температура зони	Витрати палива	Витрати повітря	Співвідношення паливо-повітря	Температура	Температура до рекуператора	Температура після рекуператора
Позначення параметру	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Вимірювання	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	+		+	+	+
Показання	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	+		+	+	+
Реєстрація	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+		+	+	+		+	+	+
Інтегрування								+					+				+					
Сигналізація	+	+																				
Автоматичне регулювання	+					+	+			+	+	+			+	+			+			
Дистанційне керування						+		+			+		+	+			+	+				
Блокування з параметрами	8,13,17	8,13,17																				
Вплив на параметри							8			9		13			14	17			18	7,12,16		

Каскадна система автоматичного регулювання нагріву металу показана на рис.1.9. Вона передбачає у своєму складі такі елементи:

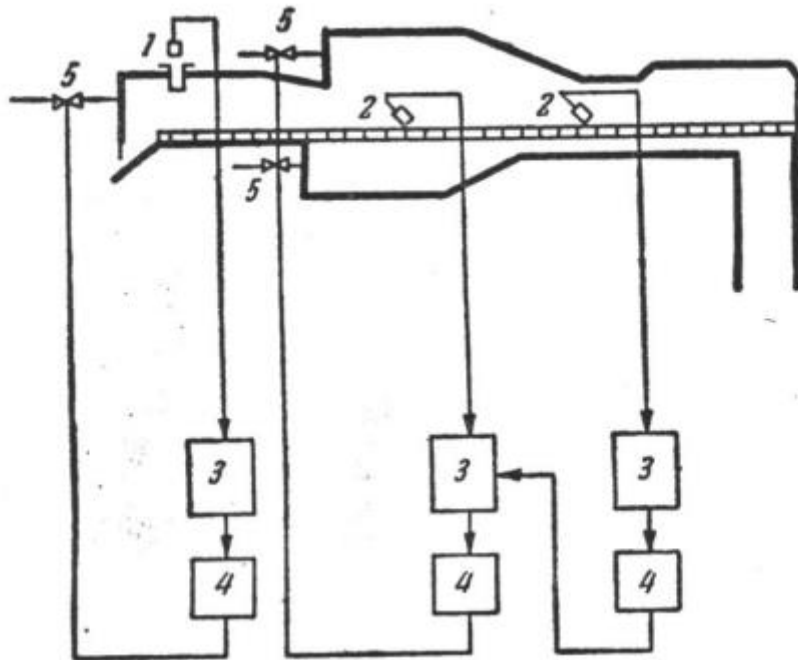


Рисунок 1.9 - Схема каскадного регулювання нагріву металу

1 – телескоп радіаційного пірометра; 2 – телескоп радіаційного пірометра, візований безпосередньо на поверхню металу; 3 – потенціометр за датчиком; 4 – регулятор; 5 – механізм вимірювання подачі палива до зони печі.

1.4 Аналіз використання методів динамічної оптимізації для управління процесом нагрівання металу

Кожний метод, який застосовується у системах автоматичного управління оптимізації визначається видом вихідної математичної моделі досліджуваного виробничого процесу. Якщо він описується звичайними диференціальними рівняннями і не накладається будь-яких обмежень на координати стану і управління, то оптимізація здійснюється за рахунок

класичного варіаційного обчислення. За наявності обмежень, які накладені на управління, для знаходження оптимальних рішень необхідно більш складний математичний апарат, наприклад, для динамічних об'єктів - принцип максимуму Понтрягіна. У ще складніших випадках, які виключають можливість аналітичних висновків і потребують використання чисельних методів та обчислювальних машин, застосовують так званий метод динамічного програмування.

Зазначений метод є одним з досить потужних і найбільш використовуваних в сучасній теорії управління. Це - обчислювальна процедура, яка істотно зменшує обсяг обчислювальних операцій, необхідних рішень розглянутих завдань і дає можливість отримання їх достатньої точності. В основу методу покладено принцип оптимальності, який стверджує, що яким би не був шлях для досягнення деякого стану системи, наступні рішення повинні належати до оптимальної програми для частини шляху, що починається з даного стану .

Метод динамічного програмування придатний для завдань оптимального управління як безперервними, так і дискретними системами. Його відмінні риси це - хороша алгоритмізованість та можливість ефективного використання сучасних засобів обчислювальної техніки. За допомогою такого методу визначають, наприклад, оптимальне розподілення температур у багатозонних нагрівальних печах. У цьому випадку етапами переходу металу з початкового стану в кінцевий є його послідовне просування через зони печі.

У кожній зоні можуть підтримуватися певне теплове навантаження та певний склад пічної атмосфери, яким відповідатиме певний темп нагрівання і окиснення металу. Очевидно, що існує найкраща комбінація управлінь (тобто витрат існуючого палива по зонах на кожному кроці переміщення заготівлі), при якій дотримується заданий температурний режим нагрівання та мінімізуються сумарні витрати на паливо та втрати за рахунок окалиноутворення. Розрахунок на основі відомої процедури динамічного

програмування дає можливість визначити цю оптимальну комбінацію управлінь для широкого класу математичних моделей об'єкта при різному виді обмежень та критеріях у вигляді функціоналів.

У випадку об'єкт управління можна описати системою рівнянь виду:

$$x(t) = f^0(x(t), u(t), w(t), t), \quad (1.4)$$

де $x(t)$ – n -мірний вектор стану;

$u(t)$ - m -мірний вектор управління;

$w(t)$ - l -мірний вектор зовнішніх збурень;

f^0 – вектор функція, що характеризує структуру та параметри об'єкта.

Вимірюванню, зазвичай, доступний не повний вектор координат об'єкта, а тільки де-яка функція виду $z(t) = f(x(t), v(t))$, яка визначається характеристиками $v(t)$ інформаційно-вимірювальних підсистем. Таким чином, завдання динамічного програмування полягає у знаходженні управління $u = u(z(t))$, як функції сигналів вимірювань, забезпечує переведення об'єкта управління з початкового стану $x(t_0)$ в задану точку $x_{\text{зад}}$, з урахуванням мінімізації критерію (1.1).

Останній же при мінімізації витрати пального і необхідності в забезпеченні заданої температури металу в кінці нагріву набуває вигляду:

$$I_2(u, \tau_n) = c_T \cdot \int_0^{\tau_n} G_T \cdot (u, \tau) \cdot d\tau + c_n \cdot \quad (1.5)$$

Вказаний метод висуває підвищені вимоги до швидкодії та об'єму пам'яті апаратної частини системи управління, які полягають у значному збільшенні інформації щодо можливих траєкторій її руху. Але на сучасному рівні розвитку комп'ютерної техніки, цей недолік будемо вважати несуттєвим. Як математичні моделі для розглянутих завдань найбільш використовуваними у теперішній час є так звані поліноміальні статистичні

моделі, у яких температура металу на виході з печі апроксимується поліномом від параметрів, що впливають на його нагрівання:

$$Y_{\text{ч}} = c_0 + c_1 \cdot \tau_{\text{T}} + c_2 \cdot \tau_{\text{T}} + c_3 \cdot \tau_{c2} + c_4 \cdot t_{c2} + c_5 \cdot t_{c1} + c_6 \cdot \tau_{c1} + c_7 \cdot S + c_8 \cdot \tau_{\text{д}} + c_9 \cdot \tau_{\text{д}} \cdot t_{\text{T}} \quad (1.6)$$

де $\tau_{\text{T}}, \tau_{c2}, \tau_{c1}, \tau_{\text{д}}$ - тривалість нагріву заготовок у томильній, другій та першій зварювальних зонах та час їх транспортування від печі до місця пірометричного контролю;

$t_{\text{T}}, t_{c1}, t_{c2}$ - температури в томильній, першій та другій зварювальних зонах;

S – товщина заготівлі;

$c_0 \div c_9$ – коефіцієнти моделі.

Перевагою моделі (1.6) є простота і гнучкий математичний апарат її побудови та адаптації. Недолік це – невідповідність фізичних процесів і, як наслідок, - вузький діапазон роботи. Якщо збільшується час нагрівання заготівлі в печі, то лінійно змінюється і температура $Y_{\text{ч}}$, хоча насправді вона прагне певної межі.

В результаті проведеного аналізу відомих оптимальних систем управління температурним режимом методичних печей стало очевидним, що для їх реалізації найбільш прийнятний метод динамічного програмування. Водночас різноманітність методичних печей потребує розробки таких систем практично з нуля у кожному конкретному випадку.

2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСУ НАГРІВУ МЕТАЛУ

2.1 Вимоги до складання математичної моделі методичної печі для завдань управління

Одне із завдань сучасної науки це - розробка та впровадження у практику методів дослідження функціонування складних систем. Основою моделювання цих систем, в тому числі і складних технологічних об'єктів, є їх узагальнене уявлення. Сутність його полягає у заміні реальної системи та її елементів на модель, яка знаходиться з ними в певній відповідності, і може відтворювати властивості та показники реальної системи, тобто буде максимально пристосованою для вирішення всіх основних завдань обчислювальних експериментів.

Математична модель печі поділена на розрахункові моделі: модель радіаційного теплообміну у робочому просторі печі і модель нагріву металу. Також у модель включені вирази для розрахунку процесу горіння, визначення витрат палива тощо. Однак у ній враховуються всі необхідні чинники для аналізу стану об'єкта з позиції управління.

Структурну схему математичної моделі методичної печі для завдань управління наведено на рис.2.1.

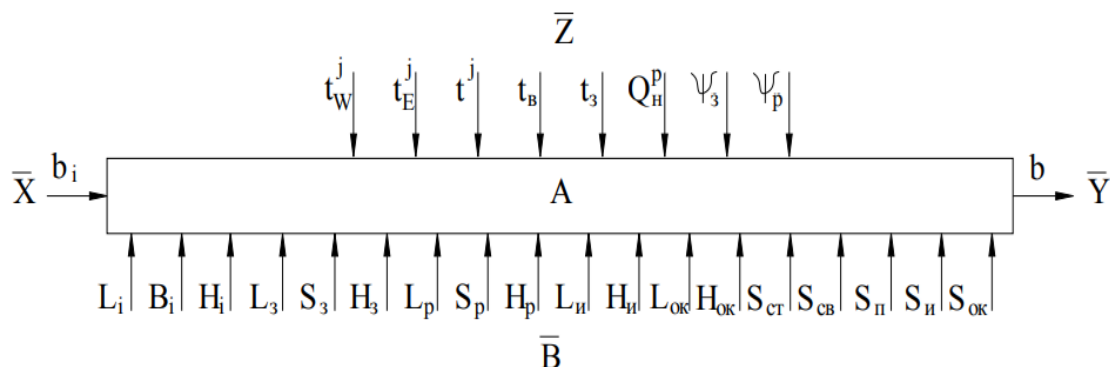


Рисунок 2.1 - Математична модель методичної печі для завдань управління

Особливість даної моделі в тому, що вона передбачає переведення печі із одного типу палива на інший (природний газ на збагачений доменний та навпаки). Зобразити математичну модель вказаної печі можна у вигляді нелінійної функції, що є перетворенням вхідних змінних \vec{X} і \vec{Z} у вихідні \vec{Y} , виду:

$$\vec{Y} = A(\vec{X}, \vec{Z}, \vec{B}) \quad (2.1)$$

де A – нелінійний векторний оператор, структура якого визначається у процесі моделювання;

\vec{X}, \vec{Z} - вектори управляючих і обурюючих параметрів;

\vec{B} - вектор конструктивних параметрів;

\vec{Y} - вектор вихідний змінної величини.

Як вихідний змінної \vec{Y} вибираємо такий важливий показник, що характеризує роботу методичної печі, як сумарна витрата палива b . Вихідна змінна \vec{Y} формується на базі таких параметрів і залежностей: довжина, ширина і висота робочого простору L_i, B_i, H_i ; довжина, товщина і висота завантажувального та розвантажувального вікон печі $L_3, S_3, H_3, L_p, S_p, H_p$; ширина і висота інспекційних люків та люків для видалення окалини $L_{и}, H_{и}, L_{ок}, H_{ок}$; товщина кладки стін, склепіння, поду, інспекційних люків та люків для видалення окалини $S_{ст}, S_{св}, S_{п}, S_{и}, S_{ок}$; температура поверхні металу з боку завантаження t_3 ; температура навколишнього середовища t_b , час у перебігу якого відкриті завантажувальне чи розвантажувальне вікна ψ_3, ψ_p ; нижча теплота згоряння палива Q_H^p .

Основними технологічними обмеженнями, які має враховувати дана модель є: перепад температури по перерізу слябу в кінці зони нагрівання $\Delta t \leq 50$ °C; температура металу наприкінці нагрівання $t_p \leq 1250$ °C.

2.2 Аналіз відомих моделей методичних печей

В теперішній час використовуються два основні напрями досліджень роботи печей, які спрямовані на виявлення резервів із енергозбереження, продуктивності та якості нагріву:

1. Здійснення за тривалий час дорогих натурних експериментів і балансових випробувань.

2. Проведення обчислювальних досліджень на створеній математичній моделі процесу нагрівання металу.

Очевидно, що другий спосіб не потребує застосування додаткових, не встановлених на печі контрольно-вимірювальних приладів, специфічного експериментального обладнання, відповідно, є менш витратним. Розглянемо коротко відомі методики розрахунку процесу нагрівання металу в методичних печах задля встановлення можливості використання їх у структурі складеної математичної моделі.

В роботі [25] було проведено дослідження щодо вибору методики розрахунку нагрівання металу в багатозонних методичних печах. Тут, як і в загальноприйнятому порядку, розрахунок нагріву металу, незалежно від використовуваної методики, здійснюється у процесі його руху, тобто, з початку методичної зони. У вказаній роботі розглянуто як інженерний, так і чисельно-аналітичний (ЧАМ) методи розрахунку, які ґрунтуються на використанні теплової діаграми. На відміну від ЧАМ протитечії, при дослідженні теплової роботи існуючих печей за інженерними методиками визначаються витрата палива за зонами і температурне поле заготівлі по довжині робочого простору печі, а задається температура печі по зонах.

Так інженерна методика розрахунку передбачає таке припущення: по довжині температура печі постійна, але в розділі її меж щільність теплового потоку і температура димових газів стрибкоподібно змінюються. При розрахунку теплового балансу зон не враховуються також втрати теплоти випромінюванням у сусідні зони та через вікна посада і видачі. Розрахунок

нагрівання металу за вищевказаною методикою ведеться відповідно до нижченаведеної послідовності.

Спершу задаються температурою печі на початку методичної зони, та визначають початкову густину теплового потоку. Далі, використовуючи метод послідовних наближень, за відомою температурою печі та прийнятим перепадом температур по перерізу заготівлі, визначають щільність теплового потоку та середньомасову температуру металу в кінці методичної зони; температуру димових газів в кінці останньої і, задаючись витратою димових газів та втратами теплоти через робочий простір печі у методичній зоні, температуру печі на початку методичної зони. Знаючи температуру печі в опалюваних зонах та розділивши кожну з них на дві по довжині, визначають середньомасову температуру металу в кінці кожної половини зони та температуру димових газів на початку наступної зони. Використовуючи тепловий баланс опалювальних зон, визначають витрату палива за зонами та витрату продуктів згоряння через методичну зону.

Доведено, що порівняно з ЧАМ використання інженерних методик розрахунку видає практично нульову похибку. Таким чином, з урахуванням сказаного та високого ступеня реалізації останніх, стає очевидним, що на створення математичної моделі, яка заснована на інженерних методах розрахунку буде витрачено значно менше часу, ніж на створення моделі за ЧАМ-методом. При цьому основні труднощі можуть виникнути через нелінійність рівнянь, які описують процес нагрівання металу внаслідок наявності теплообміну випромінюванням із гріючим середовищем та залежності теплофізичних властивостей матеріалу від температури, через складні умови теплової взаємодії заготівель із внутрішньої поверхнею кладки печі та гріючими газами, і нарешті через несиметричний обігрів та зміну температури нагрівальних газів по довжині печі.

Вичерпний опис процесу нагрівання металу може бути отримано також при використанні рівняння теплопровідності. Для його вирішення, тобто, визначення розподілу температури в заготівлі будь-якої миті часу, задаються

її вихідним розподілом, геометрією заготівлі та законом взаємодії між навколишнім середовищем та останньою. При цьому найважче виявляється встановити цей закон, оскільки саме в описі процесів взаємодії повинні бути враховані конкретні особливості теплообміну в печі. Для визначення зазначеної взаємодії використовують першу та другу крайові задачі теплопровідності.

Дослідження температурних режимів нагрівання металу в багатозонних методичних печах з торцевим розташуванням пальникових пристроїв показує, що розподіл температури робочого простору за довжиною зони носить суттєво нерівномірний характер. Для всіх зон печі характерна екстремальність температурного профілю із перепадами по довжині до 1000 °С. Результати моделювання показали, що середньоквадратичне відхилення температури металу під час проведення промислового експерименту від прогнозованого моделлю склало 650 °С у першій зварювальній зоні та 340 °С – у другій.

Загалом відомі в даний час моделі не повною мірою відображають процеси, що відбуваються в нагрівальних печах методичного типу, а характеризують тільки їх складові. Тому завдання створення універсального математичного аналога конкретної методичної печі з крокуючими балками, в якій було б враховано всі особливості її геометрії в даний час залишається невирішеним.

У кваліфікаційній пропонується синтезувати математичну модель сучасної методичної печі з крокуючими балками продуктивністю 350 т/год. Основними обчислювальними блоками такої моделі будуть: розрахунок горіння палива, розрахунок зовнішнього теплообміну в робочому просторі печі, розрахунок нагріву металу, складання теплового балансу печі. Вона має забезпечити систему управління інформацією не тільки про стан печі, а й про параметри палива і повітря, температури поверхні металу, тривалості нагріву по зонах печі тощо.

2.3 Структура моделі нагрівання металу у методичній печі

Моделювання процесу нагрівання металу є складовою загального завдання синтезу автоматичної системи керування ним. Моделі дають змогу вивчати у широких температурних діапазонах загальні закономірності, які властиві конкретному класу, а також розглядати питання керованості останніх при різному сортаменті заготівель та калорійності використаного палива. Застосування моделей нагріву при виборі технологічних режимів дозволяє значно скоротити обсяг промислових експериментів та значно зменшити відповідні матеріальні витрати.

В автоматичній системі керування методичними печами (АСК МП) призначення моделі нагріву може полягати в тому, щоб отримати узагальнену інформацію щодо температури заготовель в даний момент та спрогнозувати траєкторію нагріву в майбутньому залежно від керуючих впливів. При розробці АСК МП відповідно пред'явлених до моделей нагріву металу вимогам, вони повинні забезпечити надання інформації про температуру металу із заданою точністю, виходячи з обраної мети управління; мати максимальний ступінь простоти, який забезпечує задану точність; враховувати всі контрольовані, керуючі та обурюючі фактори, що змінюються в процесі роботи об'єкта.

Створена математична модель має адекватно відображати процеси функціонування справжньої печі, тобто, контрольовані параметри нагрівання металу в ній та отримані розрахунковим шляхом результати з математичної моделі мають бути порівнянними. Отже, для розрахунку параметрів процесу нагрівання металу в методичній печі математична модель має вирішувати кілька завдань: 1) вибір енергетично вигіднішого палива для нагрівання печі, 2) визначення наведеного коефіцієнта випромінювання від газів та кладки на метал, 3) визначення перепаду температури по перерізу металу на виході з печі, 4) розрахунок часу перебування металу у кожній зоні печі з

урахуванням факторів окислення та обезводнення металу, 5) визначення сумарної витрати газу.

Розроблювана модель повинна давати цілісне уявлення про процес моделювання. При використанні користувачем даної математичної моделі як окремих програмних продуктів він повинен отримувати результати розрахунків та зберігати їх в окремі файли для подальшого аналізу. Для виконання поставленого завдання користувач повинен мати вихідну інформацію. Таким чином, основним завданням створеної моделі методичної печі є проведення на ній експериментів, які складно провести на реальному об'єкті.

Для розробки математичної моделі був використаний метод об'єктно-орієнтованого проектування, з використанням продуктів Rational Rose 2000 та Borland C++Builder 6, які працюють під управлінням операційної Windows XP [55]. Проаналізувавши поставлені завдання, область проектування було розбито на чотири послідовні логічні блоки функціонування: 1) розрахунок параметрів процесу горіння палива в печі, 2) розрахунок зовнішнього теплообміну в робочому просторі, 3) розрахунок параметрів нагрівання металу, 4) складання теплового балансу.

2.3.1 Алгоритм розрахунку процесу горіння палива у методичній печі

У досліджуваному об'єкті, як паливо спалюється природний або збагачений доменний газ. Як відомо, останній отримують у великих кількостях (близько 3 м³ на 1 кг чавуну) у процесі доменної плавки. Методична ж піч опалюється природним газом у суміші з доменним, нижча теплота згоряння якого становить $Q_{\text{H}}^{\text{p}} = (3,5 \dots 3,8) \text{ МДж/м}^3$. Розрахунки, пов'язані з процесом горіння палива виконуються для визначення необхідної кількості та складу продуктів згоряння, температури горіння.

Метою цієї роботи є складання алгоритму розрахунку процесу горіння палива, для визначення раціональної витрати повітря, отриманої кількості продуктів згорання та температури горіння. Віртуально піч умовно поділено на зони, пальники в яких розташовані на бічних стінках у два горизонтальних ряди – верхній та нижній. Для верхнього ряду датчики температури встановлені на склепіння печі. Для нижнього ряду датчики змонтовані на бокових стінках.

Перша зона з боку завантаження металу – рекуперативна (методична).

На західній стороні вказаної зони печі розташовано температурний датчик TE1000W, на східній – TE1000E. На склепіння печі TE1000. Далі йде зона підігріву (бічні стіни – TE1020W, TE1040W, TE1020E, TE1040E, склепіння печі - TE1010, TE1030, TE1050). Після зони підігріву йдуть дві зони нагріву (бічні стіни – TE1080W, TE1120W, TE1160W, TE1080E, TE1120E, TE1160E, склепіння печі – TE1090, TE1130, TE 1150, TE170). Томильна зона (бічні стіни – TE1200W, TE1200E, склепіння печі – TE1190, TE1210).



Рисунок 2.2 - Фрагмент блок-схеми алгоритму розрахунку процесу горіння палива

Алгоритм використовує такі вихідні дані:

1. Масив температур печі, одержуваних від датчиків, розташованих на нижньому ряду бічних стін печі (WEST і EAST) $m_{te}[j], m_{tw}[j]$ та склепінні печі $m_t[j]$, де j – номер датчика. На двох боках печі розташовується по 7 температурних датчиків, склепіння печі – 12 датчиків, перерахованих вище.

2. Масиви хімічного складу енергоносіїв (природний $m[k]_п$ і доменний $m[k]_д$ газ) у відсотках [1]:

$$m_{п}[k] = \begin{bmatrix} \overbrace{m_{п}[1]/CH_4}^{92} & \overbrace{m_{п}[2]/C_2H_6}^{2,5} & \overbrace{m_{п}[3]/CO_2}^{0,5} & \overbrace{m_{п}[4]/C_3H_8}^{0,6} & \overbrace{m_{п}[5]/i-C_4H_{10}}^{0,1} & ; \\ \overbrace{m_{п}[6]/h-C_4H_{10}}^{0,1} & \overbrace{m_{п}[7]/i-C_5H_{12}}^{0,03} & \overbrace{m_{п}[8]/h-C_5H_{12}}^{0,02} & \overbrace{m_{п}[9]/heo-C_5H_{12}}^{0,03} & ; & \\ \overbrace{m_{п}[10]/C_6H_{14}}^{0,1} & \overbrace{m_{п}[11]/N_2}^4 & \overbrace{m_{п}[12]/O_2}^{0,02} & \overbrace{m_{п}[13]/H_2}^0 & \overbrace{m_{п}[14]/CO}^0 & ; \end{bmatrix},$$

$$m_{д}[k] = \begin{bmatrix} \overbrace{m_{д}[1]/CH_4}^{0,4} & \overbrace{m_{д}[2]/C_2H_6}^0 & \overbrace{m_{д}[3]/CO_2}^{22} & \overbrace{m_{д}[4]/C_3H_8}^0 & \overbrace{m_{д}[5]/i-C_4H_{10}}^0 & ; \\ \overbrace{m_{д}[6]/h-C_4H_{10}}^0 & \overbrace{m_{д}[7]/i-C_5H_{12}}^0 & \overbrace{m_{д}[8]/h-C_5H_{12}}^0 & \overbrace{m_{д}[9]/heo-C_5H_{12}}^0 & ; & \\ \overbrace{m_{д}[10]/C_6H_{14}}^0 & \overbrace{m_{д}[11]/N_2}^{42,6} & \overbrace{m_{д}[12]/O_2}^0 & \overbrace{m_{д}[13]/H_2}^8 & \overbrace{m_{д}[14]/CO}^{27} & ; \end{bmatrix},$$

де $m_{п}[1] \dots m_{п}[14], m_{д}[1] \dots m_{д}[14]$ – відсотковий вміст к-ої складової: метану CH_4 , етану C_2H_6 ; двоокису вуглецю CO_2 ; пропану C_3H_8 ; ізоотопів бутану і - C_4H_{10} та h- C_4H_{10} ; ізоотопів пентану (важкі вуглеці) і- C_5H_{12} , h- C_5H_{12} та heo- C_5H_{12} ; гексану C_6H_{14} ; азоту N_2 ; повітря O_2 ; водню H_2 ; окису вуглецю CO .

3. Емпіричні коефіцієнти (коефіцієнт умовної витрати повітря n , пірометричний коефіцієнт горіння $\eta_{\text{пір}}$, коефіцієнт відбивного відношення об'ємних вмістів N_2 та O_2 в дутті $k=3,76$ [48, 50]).

При дослідженні роботи методичної печі, перший із зазначених коефіцієнтів визначався за складом палива та продуктів згорання [1]:

$$n = \frac{1}{1 - k \cdot \frac{m_{\text{п}}[12] - 0,5 \cdot (m_{\text{п}}[14] + m_{\text{п}}[13]) - 2 \cdot m_{\text{п}}[1]}{m_{\text{п}}[11] \cdot \left[1 - \frac{m_{\text{п}}[1] \cdot (m_{\text{п}}[3] + SO_2 + m_{\text{п}}[14] + m_{\text{п}}[1])}{100 \cdot m_{\text{п}}[11] \cdot (V_{CO_2} + V_{SO_2})}\right]}}$$

де SO_2 – відсотковий вміст газів в продуктах згорання, V_{CO_2} та V_{SO_2} – об'єм SO_2 та CO_2 [48,50].

4. Мінімальна теплота згорання збагаченого доменного газу $Q_{\text{нмод}}^p$.

У досліджуваному об'єкті ефективно застосування доменного газу досягається за рахунок повного використання його наявності. У методичній печі застосовується пряме підведення до пальників двох різних газів. У зв'язку з низькою калорійністю доменного газу, що не дозволяє його пряме підведення до пальника, останній збагачується природним для того, щоб досягти калорійності не нижче 2500 ккал/м^3 або $Q_{\text{нмод}}^p \geq 10,42 \text{ МДж/м}^3$.

5. Масив густин компонентів енергоносіїв $m_p[k]$, кг/м^3 :

$$m_p[k] = \begin{bmatrix} \underbrace{m_p[1]/CH_4}_{0,714} ; & \underbrace{m_p[2]/C_2H_6}_{1,34} ; & \underbrace{m_p[3]/CO_2}_{1,964} ; & \underbrace{m_p[4]/C_3H_8}_{1,964} ; & \underbrace{m_p[5]/i-C_4H_{10}}_{2,59} ; \\ \underbrace{m_p[6]/h-C_4H_{10}}_{2,59} ; & \underbrace{m_p[7]/i-C_5H_{12}}_{3,21} ; & \underbrace{m_p[8]/h-C_5H_{12}}_{3,21} ; & \underbrace{m_p[9]/heo-C_5H_{12}}_{3,21} ; & \\ \underbrace{m_p[10]/C_6H_{14}}_{3,84} ; & \underbrace{m_p[11]/N_2}_{1,25} ; & \underbrace{m_p[12]/O_2}_{1,43} ; & \underbrace{m_p[13]/H_2}_{2} ; & \underbrace{m_p[14]/CO}_{1,25} ; \end{bmatrix}.$$

6. Залежності ентальпій продуктів згорання кДж/м^3 від температури.

Алгоритм складається з наступних обчислювальних блоків:

1. Розрахунок нижчої теплоти згоряння $Q_{\text{н}}^p$. Тут визначається склад збагаченого доменного газу та розраховується його нижча теплота згоряння. Також проводиться зіставлення теплоти згоряння $Q_{\text{нод}}^p$ з мінімально можливою $Q_{\text{нмод}}^p$ і виконується вибір типу енергоносія.

Розрахунок $Q_{\text{нп}}^p$ та $Q_{\text{нд}}^p$ здійснюється за відомою формулою Д. І. Менделєєва, наведеної в [43], з урахуванням масиву енергоносіїв (2.1) та (2.2):

$$Q_{\text{нп}}^p = 358 \cdot m_{\text{п}}[1] + 108 \cdot m_{\text{п}}[2] + 913 \cdot m_{\text{п}}[4] + 1185 \cdot (m_{\text{п}}[5] + m_{\text{п}}[6]) + 1465 \cdot (m_{\text{п}}[7] + m_{\text{п}}[8] + m_{\text{п}}[9]),$$

$$Q_{\text{нд}}^p = 358 \cdot m_{\text{д}}[1] + 108 \cdot m_{\text{д}}[13] + 127,7 \cdot m_{\text{д}}[4].$$

Масив складу збагаченого доменного газу, коефіцієнт складу газової суміші та нижчої теплоти згоряння:

$$m_{\text{од}}[i] = m_{\text{п}}[i] \cdot a + m_{\text{д}}[i] \cdot (1 - a), \quad a = (Q_{\text{нп}}^p - Q_{\text{нмод}}^p) / (Q_{\text{нп}}^p - Q_{\text{нд}}^p),$$

$$m_{\text{од}}[k] = \begin{bmatrix} \underbrace{m_{\text{од}}[1]}_{\text{CH}_4} / 73,42 & \underbrace{m_{\text{од}}[2]}_{\text{C}_2\text{H}_6} / 1,99 & \underbrace{m_{\text{од}}[3]}_{\text{CO}_2} / 4,86 & \underbrace{m_{\text{од}}[4]}_{\text{C}_3\text{H}_8} / 0,48 & \underbrace{m_{\text{од}}[5]}_{\text{i-C}_4\text{H}_{10}} / 0,08 & ; \\ \underbrace{m_{\text{од}}[6]}_{\text{h-C}_4\text{H}_{10}} / 0,08 & \underbrace{m_{\text{од}}[7]}_{\text{i-C}_5\text{H}_{12}} / 0,024 & \underbrace{m_{\text{од}}[8]}_{\text{h-C}_5\text{H}_{12}} / 0,016 & \underbrace{m_{\text{од}}[9]}_{\text{neo-C}_5\text{H}_{12}} / 0,024 & ; \\ \underbrace{m_{\text{од}}[10]}_{\text{C}_6\text{H}_{14}} / 0,08 & \underbrace{m_{\text{од}}[11]}_{\text{N}_2} / 11,8 & \underbrace{m_{\text{од}}[12]}_{\text{O}_2} / 0,016 & \underbrace{m_{\text{од}}[13]}_{\text{H}_2} / 1,62 & \underbrace{m_{\text{од}}[14]}_{\text{CO}} / 5,48 \end{bmatrix},$$

$$Q_{\text{нод}}^p = 358 \cdot m_{\text{од}}[1] + 636 \cdot m_{\text{од}}[2] + 913 \cdot m_{\text{од}}[4] + \\ + 1185 \cdot (m_{\text{од}}[5] + m_{\text{од}}[6]) + 1465 \cdot (m_{\text{од}}[7] + m_{\text{од}}[8] + m_{\text{од}}[9]) + \\ + 108 \cdot m_{\text{од}}[13] + 127,7 \cdot m_{\text{од}}[14].$$

2. Розрахунок обсягів продуктів згоряння.

Витрати кисню на горіння з урахуванням масиву енергоносіїв (2.1, 2.2)

визначається так:

$$V_{\text{O}_2\text{п}} = 0,01 \cdot \left[0,5 + \left(\begin{array}{l} 2 \cdot m_{\text{п}}[1] + 3,5 \cdot m_{\text{п}}[2] + 5 \cdot m_{\text{п}}[4] + \\ + 6,5 \cdot (m_{\text{п}}[5] + m_{\text{п}}[6]) + \\ + 8 \cdot (m_{\text{п}}[7] + m_{\text{п}}[8] + m_{\text{п}}[9]) + 9,5 \cdot m_{\text{п}}[10] \end{array} \right) \right],$$

$$V_{\text{O}_2\text{од}} = 0,01 \cdot \left[\begin{array}{l} 0,5 \cdot (m_{\text{од}}[13] + m_{\text{од}}[14]) + \\ + \left(\begin{array}{l} 2 \cdot m_{\text{од}}[1] + 3,5 \cdot m_{\text{од}}[2] + 5 \cdot m_{\text{од}}[4] + 6,5 \cdot \left(\begin{array}{l} m_{\text{од}}[5] + \\ + m_{\text{од}}[6] \end{array} \right) + \\ + 8 \cdot (m_{\text{од}}[7] + m_{\text{од}}[8] + m_{\text{од}}[9]) + 9,5 \cdot m_{\text{од}}[10] \end{array} \right) \end{array} \right].$$

Витрати повітря та обсягів компонентів продуктів згоряння:

$$V_{\text{в}} = n \cdot (1 + k) \cdot V_{\text{O}_2},$$

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01 \cdot (\text{CO}_2 + \text{SO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{S} + \sum m \cdot C_m \cdot H_s),$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01 \cdot (\text{H}_2\text{O} + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{S} + 0,5 \cdot \sum s \cdot C_m \cdot H_s),$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,01 \cdot N_2 + n \cdot k \cdot V_{\text{O}_2}, \quad \dot{V}_{\text{O}_2} = (n - 1) \cdot V_{\text{O}_2},$$

$$V_{\text{пс}} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + \dot{V}_{\text{O}_2}.$$

де s, m – кількість атомів вуглецю та водню.

3. Розрахунок дійсної температури горіння зонами печі.

Калориметрична та дійсна температури горіння:

$$t_k = t_k'' + \frac{i_0 + i_k''}{i_k' - i_k''} \cdot 100, t_d = \eta_{\text{пир}} \cdot t_k, \quad (2.17)$$

де t_k' , t_k'' - температури відповідні ентальпіям, розрахованим згідно (2.18);

$\eta_{\text{пир}} = (0,7 \dots 0,75)$ – пірометричний коефіцієнт.

Ентальпія продуктів згоряння:

$$i_0 = \frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}} + i_{\text{B}} \cdot V_{\text{B}}}{V_{\text{пс}}}, i_k' = \frac{i_{\text{CO}_2} \cdot V_{\text{CO}_2} + i_{\text{H}_2\text{O}} \cdot V_{\text{H}_2\text{O}} + i_{\text{N}_2} \cdot V_{\text{N}_2} + i_{\text{O}_2} \cdot V_{\text{O}_2}}{V_{\text{пс}}}. \quad (2.18)$$

2.3.2 Алгоритм розрахунку зовнішнього теплообміну у робочому просторі печі

Теплообмін випромінюванням є основним способом передачі тепла в печах із температурою вище 800 °С. Близько (85...90) % його передається на поверхню предметів, що нагріваються саме випромінюванням і лише (5...10) % конвекцією. Завданням алгоритму зовнішнього теплообміну є визначення наведеного коефіцієнта випромінювання від газів та кладки на метал, який буде необхідний для розрахунку нагріву останнього. Блок-схема вказаного алгоритму наведена на рис.2.3. Цей алгоритм використовує такі вихідні дані: геометричні розміри перерізу печі (довжина L_i , ширина B_i та висота H_i робочого простору зон); інформацію з алгоритму розрахунку процесу горіння палива.

Розглянутий алгоритм складається з наступних обчислювальних блоків:

1. Розрахунок поверхні та обсягів і-ої зони печі, заповненої газами включає визначення площі подини, внутрішніх поверхонь стін, склепіння і загальної та обсягу заповненого газом робочого простору:

$$F_{\text{пі}} = B_i \cdot L_i, F_{\text{клі}} = (2 \cdot H_i + B_i) \cdot L_i, B_{\text{общі}} = F_{\text{пі}} + F_{\text{клі}}, V_i = H_i \cdot F_{\text{пі}} \quad (2.19)$$

2. Розрахунок загального ступеня чорноти системи і-ої зони печі, включає: розрахунок середньої ефективної довжини променя, кутового коефіцієнта кладки на метал та загального ступеня чорноти системи; залежність ступеня чорноти CO₂ та H₂O від температури, $\varepsilon_{r_i} = f(t_i)$ згідно з відомими номограмами:

$$S_i = 0,9 \cdot \frac{4 \cdot V_i}{F_{\text{общі}}}, \varphi_{\text{кмі}} = F_{\text{пі}} / F_{\text{клі}}, \varepsilon_i = \varepsilon_m \cdot \frac{\varphi_{\text{кмі}} + 1 - \varepsilon_{r_i}}{\left[\varepsilon_m + \varepsilon_{r_i} \cdot (1 - \varepsilon_m) \right] \cdot \left[\frac{1 - \varepsilon_{r_i}}{\varepsilon_{r_i}} \right] + \varphi_{\text{кмі}}}, \quad (2.20)$$

де ε_m - ступінь чорноти металу.

3. Розрахунок наведеного коефіцієнта випромінювання від газу та кладки на метал δ_i , Вт/м² · К⁴ і-ої зони печі та його середнє значення:

$$\delta_i = 5,76 \cdot \varepsilon_i, \delta_{\text{ср}} = \sum_{i=1}^5 \delta_i / 5,$$

де $i = 5$ – кількість зон печі.

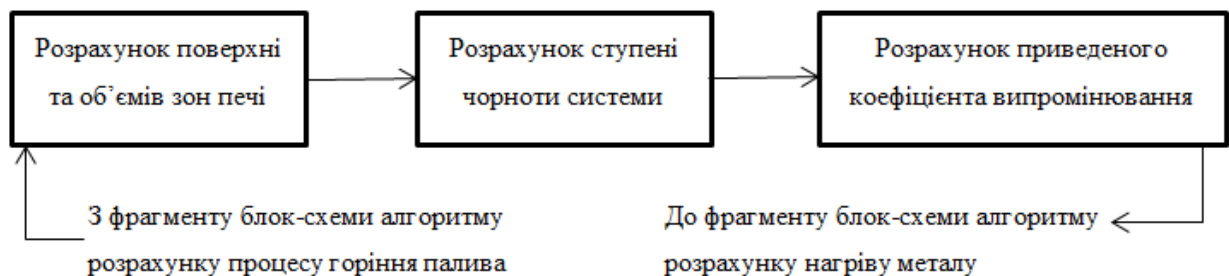


Рисунок 2.3 - Фрагмент блок-схеми алгоритму розрахунку зовнішнього теплообміну

2.3.3 Алгоритм розрахунку нагріву металу

Якість нагріву металу має важливе значення, тому що від цього залежать і ефективність роботи прокатного обладнання і якість кінцевої продукції металургійного виробництва. Час нагріву є важливим фактором розглянутої технології, яку проводять в атмосфері продуктів згорання палива. Враховуючи, що при цьому відбувається взаємодія навколишніх металів газів із залізом, його поверхня окислюється та обезводнюється. Через окислення при кожному наступному нагріванні виникають втрати металу. Обезводнення поверхневого шару останнього погіршує механічні властивості сталі, знижуючи її межі міцності, плинності та витривалості.

Блок-схема алгоритму розрахунку нагрівання металу наведена на рис.2.4. Вихідними даними тут є: масив тепловмісту $m_{ic}[1]$ та теплопровідності $m_{\lambda c}[1]$, де 1 – номер марки сталі; обмеження на перепад температури по перерізу слябу в кінці зони нагріву $\Delta t \leq 50$ °C і температуру металу $t_p \leq 1250$ °C; розміри слябів, що нагріваються $M_r \times S_r$; емпіричні коефіцієнти (коефіцієнт несиметричності двостороннього нагріву μ ; теплоємність окалини $C_{ок}$; кількість окалини, що утворюється при окисленні 1кг заліза m ; чад металу δ ; масив коефіцієнтів розрахунку нагріву металу $m_{\delta^2}[p], m_p[p], m_M[p], m_N[p]$ та критерію Біо $m_{B_i}[p]$, де p – номер коефіцієнта; інформація з алгоритму розрахунку зовнішнього теплообміну, зображеного на рис.2.4.

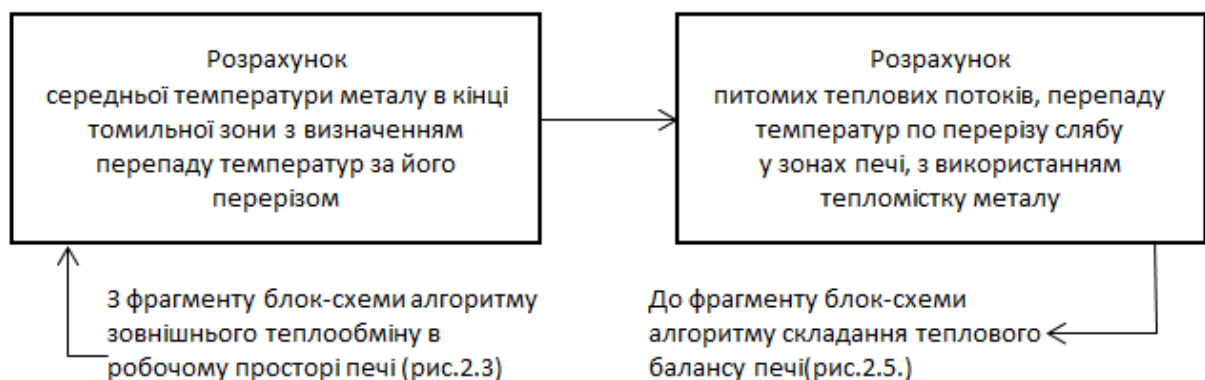


Рисунок 2.4 – Фрагмент блок-схеми алгоритму розрахунку нагріву металу

Цей алгоритм складається з наступних обчислювальних блоків:

1. Розрахунок середньої температури металу в кінці 5-ї (томильної) зони, з визначенням перепаду температур з його перерізу. Розрахунок коефіцієнта теплопередачі у 5-ій зоні:

$$a_5 = \delta_5 \cdot \left[\frac{\left(\frac{t_5 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_p + 273}{100} \right)^4}{t_5 - t_p} \right],$$

де δ_5 – приведений коефіцієнт випромінювання від газу та кладки на метал (2.21);

$t_5 = (m_{tc}[7] + m_{tw}[7] + m_t[11] + m_t[13])/3$ – температура томильної зони;

t_p – розвантажувальна температура металу.

Розрахунок коефіцієнтів теплопровідності сталі за вказаної температури. Наприклад, для марки Ст5сп коефіцієнти теплопровідності перебувають у такому співвідношенні:

$$\lambda_{200} = 0,95 \cdot \lambda_0; \lambda_{400} = 0,85 \cdot \lambda_0; \lambda_{600} = 0,75 \cdot \lambda_0; \lambda_{800} = 0,68 \cdot \lambda_0;$$

$$\lambda_{1000} = 0,68 \cdot \lambda_0; \lambda_{1200} = 0,73 \cdot \lambda_0.$$

Обчислення дійсних розмірів слябів, з урахуванням коефіцієнта несиметричності двостороннього нагрівання: $M = M_r \cdot \mu$, $S = S_r \cdot \mu$, де $\mu = 0,85$ – коефіцієнт несиметричності двохстороннього нагріву.

Визначення коефіцієнтів нагрівання металу для слябів перерізом $S \times M$

$$m_{\delta S^2}[p], m_{\delta M^2}[p], m_{PS}[p], m_{PM}[p], m_{MM}[p], m_{MS}[p], m_{NS}[p], m_{NM}[p]. \quad (2.23)$$

Рівняння теплопровідності, стосовно розглянутого об'єкта запишемо в наступному вигляді:

$$Q = \Phi_1 \cdot \Phi_2 \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau} \cdot \frac{t_{Mi}^H - t_i}{t_{Mi}^K - t_i} = \Phi_1 \cdot \left(\frac{a \cdot \tau}{S^2}, \frac{a \cdot S}{\lambda}, \frac{x}{S} \right) \cdot \Phi_2 \cdot \left(\frac{a \cdot \tau}{M^2}, \frac{a \cdot M}{\lambda}, \frac{x}{M} \right), \quad (2.24)$$

де t_{Mi}^H, t_{Mi}^K – температура поверхні тіла,

τ – тривалість нагріву металу;

x, y – координати точок нагріву металу.

Тут значення критеріїв Фур'є Φ_1 і Φ_2 [50, 58] приймаються в залежності від критеріїв Біо ($a \cdot S/\lambda, a \cdot M/\lambda$) та температурного Q .

Для визначення β виділимо з рівняння 2.24 $-\beta \cdot a \cdot \tau$:

$$\ln\left(\frac{Q}{\Phi_1 \cdot \Phi_2}\right) = -\beta \cdot a \cdot \tau, \beta = \frac{(m_{\delta S}[p])^2}{S_r^2} + \frac{(m_{\delta M}[p])^2}{M_r^2}.$$

Розрахунок температури ребра слябу $x=S, y=M$, поверхні в середині ребра $x=0, y=M$, на її середині $x=S, y=0$ та осі (центру) слябу $x=0, y=0$:

$$t_{SM} = t_5 - (t_5 - t_p) \cdot m_{PS}[p] \cdot m_{PM}[p] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}, t_{OM} = t_5 - (t_5 - t_p) \cdot m_{NS}[p] \cdot m_{PM}[p] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau},$$

$$t_{SO} = t_5 - (t_5 - t_p) \cdot m_{NM}[p] \cdot m_{PS}[p] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}, t_{OO} = t_5 - (t_5 - t_p) \cdot m_{NS}[p] \cdot m_{NM}[p] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}.$$

Розрахунок перепаду температур між першим ребром і центром слябу, другим ребром і центром, мінімального, температури металу в кінці томильної зони та часу нагріву:

$$\Delta t_1 = t_{SM} - t_{OM}, \Delta t_2 = t_{SM} - t_{SO}, \Delta t = \min \rightarrow (\Delta t_1, \Delta t_2).$$

$$t_{m5} = t_5 - (t_5 - t_p) \cdot m_{MS}[p] \cdot m_{MN}[p] \cdot e^{-\beta \cdot a \cdot \tau}, \tau_5 = \ln\left(\frac{Q}{\Phi_1 \cdot \Phi_2}\right) / \beta \cdot a_5. \quad (2.24)$$

2. Розрахунок питомих теплових потоків, перепаду температур по перерізу сляба в зонах печі, з використанням теплоємності металу виконаний у такій послідовності.

Питомий тепловий потік до металу в томильній зоні q_5 , розрахункова температура газів t_{p5} , кількість тепла, що вноситься і несуть Q_ϕ, Q_{yxi} визначалися наступним чином:

$$q_5 = i_5 / S, t_{p5} = 100 \cdot \sqrt[4]{\frac{q_5}{\delta_5} + \left(\frac{t_5 + 273}{100}\right)^4} - 273, \quad (2.25)$$

$$Q_\phi = V_B \cdot i_B, Q_{yxi} = V_{пци} \cdot (i_{CO_2} + i_{N_2} + i_{O_2} + i_{H_2O}). \quad (2.26)$$

де i_5 - теплоємність металу при температурі t_{M5} .

Питомий тепловий потік на початку та наприкінці рекуперативної зони:

$$q_{1н} = \delta_1 \cdot \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_3 + 273}{100}\right)^4 \right], q_{1к} = \delta_1 \cdot \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_3 + \frac{q_{1к} \cdot S}{3 \cdot \lambda_1} + 273}{100}\right)^4 \right],$$

де $t_1 = (m_t[1] + m_{tc}[1] + m_{tw}[1])/3$ - температура рекуперативної зони; t_3 - температура завантаження металу.

Тут обчислення $q_{1к}$ проводиться у наступній послідовності.

Для першого випадку $q_{1к1}$ приймаємо ($q_{1к} \cdot S / 3 \cdot \lambda_1 = 0$), другого та третього:

$$q_{1к2} = \delta_1 \cdot \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_3 + \frac{q_{1к2} \cdot S}{3 \cdot \lambda_1} + 273}{100}\right)^4 \right], q_{1к3} = \delta_1 \cdot \left[\left(\frac{t_1 + 273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_3 + \frac{q_{1к3} \cdot S}{3 \cdot \lambda_1} + 273}{100}\right)^4 \right]$$

Тепловий потік у рекуперативній зоні та зонах підігріву, нагріву 1,2 та кількість тепла, що випромінюється з однієї зони в іншу, визначалися наступним чином:

$$q_i = \sqrt{q_{in} \cdot q_{ik3}}, q_i'' = \frac{q_{in} - q_{ik}}{\ln(q_{in} / q_{ik})},$$

$$Q_{i-1} = q_{i-1} \cdot F_{ni-1}, F_{ni-1} = 2 \cdot B_{i-1} \cdot H_{i-1}, \quad (2.28)$$

де q_{i-1} питомий тепловий потік випромінюванням з однієї зони до іншої; B_{i-1}, H_{i-1} ширина та висота робочого простору на межах зон.

Коефіцієнт використання хімічної енергії палива $\eta_{общи}$, температура металу, перепад по перерізу та час нагрівання визначалися таким чином:

$$\eta_{общи} = (Q_n^p + Q_\phi + Q_{yxi}) / Q_n^p, t_{mi} = t_1 + \frac{q_{ik3} \cdot S}{3 \cdot \lambda_1}, \Delta t_{1k} = \frac{q_{ik3} \cdot S}{3 \cdot \lambda_1}, \tau_5 = \frac{\Delta i_1 \cdot S \cdot \rho}{q_i}, \quad (2.29)$$

де Δi_1 - збільшення тепловмісту металу в рекуперативній зоні;

ρ - питомий опір металу.

Час нагріву, температура та перепад в інших зонах: підігріву, нагрівання 1 і 2 знаходяться відповідно (2.29), а тепловий потік (2.27)

2.3.4 Алгоритм складання теплового балансу методичної печі

Найважливішою характеристикою печі є витрата палива. На діючих печах її визначають безпосереднім виміром, проєктованих - розрахунковим шляхом, на основі використання теплового балансу печі.

Блок-схему алгоритму складання теплового балансу наведено на рис.2.5.

Алгоритм складається з таких обчислювальних блоків:

1. Розрахунок температури поверхні кладки за зонами печі

$$t_{\text{кмі}} = T_{1i} \cdot (t_i + 273), T_{1i} = \sqrt[4]{\Phi_{\text{кмі}} \cdot (1 - T_{2i}^4) + T_{2i}^4}, T_{2i} = (t_{\text{ін}} + 273) / (t_{\text{ік}} + 273),$$

$$\Phi_{\text{кмі}} = \left[1 / 1 + \frac{\Phi_{\text{кмі}} \cdot \varepsilon_{\text{гі}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{м}})}{\varepsilon_{\text{м}} \cdot [1 + \Phi_{\text{кмі}} \cdot (1 - \varepsilon_{\text{м}}) \cdot (1 - \varepsilon_{\text{гі}})]} \right], \quad (2.30)$$

де T_{1i}, T_{2i} температурні коефіцієнти;

$t_{\text{ін}}, t_{\text{ік}}$ - розрахункові температури газів на початку та наприкінці i -ої зони робочого простору печі.

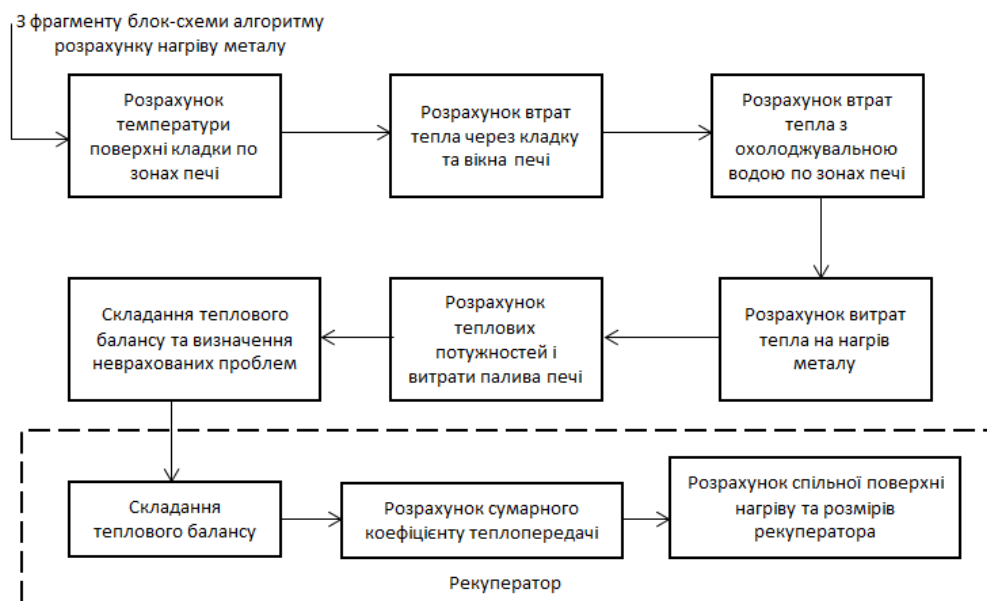


Рисунок 2.5 - Фрагмент блок-схеми алгоритму складання теплового балансу печі

2. Розрахунок втрат тепла через кладку та вікна печі.

У методичній печі з крокуючими балками по довжині зон робочого простору печі розташовуються такі види люків: люки для видалення окалини в кількості 12 одиниць, виконані з жароміцного відлитого чавуну, розмірами 400 мм x 400 мм. Ізоляція виконана з вогнетривкого бетону товщиною 200 мм; інспекційні люки у кількості 10 одиниць, розмірами 140 мм x 120 мм.

Втрати тепла через кладку та люки печі визначаються згідно:

$$Q_{\text{клі}} = \left[\frac{t_{\text{клі}} - t_{\text{в}}}{\sum \frac{S}{\lambda} + \frac{1}{a}} \right] \cdot F_{\text{клі}}, \quad Q_{\text{лі}} = \left[\frac{t_{\text{клі}} - t_{\text{в}}}{\frac{S_{\text{ні}}}{\lambda_{\text{ні}}} + \frac{S_{\text{окі}}}{\lambda_{\text{окі}}}} \right] \cdot F_{\text{лі}}, \quad (2.31)$$

де $\sum S/\lambda$ - сума теплових опорів шарів кладки;

$F_{\text{клі}}$ - зовнішня поверхня шарів кладки;

$\frac{1}{a''} = 0,05 \text{ м}^2 \cdot \text{град/Вт}$ - тепловий опір;

$S_{\text{ні}}, S_{\text{окі}}, F_{\text{лі}}$ - товщина шару кладки та площа поверхні інспекційних люків та люків для видалення окалини і-ої зони робочого простору печі [50].

У томильній зоні методичної печі втрати випромінюванням відбуваються через вікно розвантаження, а у рекуперативної зони – через вікно завантаження.

Розрахункова площа завантажувального та розвантажувального вікон відповідно:

$$F_{\text{з}} = L_{\text{з}} \cdot H_{\text{з}}, \quad F_{\text{р}} = L_{\text{р}} \cdot H_{\text{р}}.$$

Втрати тепла випромінюванням через завантажувальне та розвантажувальне вікна визначаються згідно:

$$Q_{\text{з}} = 5,75 \cdot \left(\frac{t_1 + 273}{100} \right)^4 \cdot F_{\text{з}} \cdot \Phi_{\text{з}} \cdot \psi_{\text{з}} \cdot 10^{-6}, \quad Q_{\text{р}} = 5,75 \cdot \left(\frac{t_5 + 273}{100} \right)^4 \cdot F_{\text{р}} \cdot \Phi_{\text{р}} \cdot \psi_{\text{р}} \cdot 10^{-6}, \quad (2.32)$$

3. Розрахунок втрат тепла з водою, що охолоджує, по зонах печі.

$$Q_{\text{охлі}} = q_{\text{охлі}} \cdot F_{\text{трі}}, \quad (2.33)$$

Таким чином, загальні втрати тепла і-ої зони робочого простору печі визначимо як $Q_i = Q_{\text{клі}} + Q_{\text{лі}} + Q_{\text{з}} + Q_{\text{р}} + Q_{\text{охлі}}$.

4. Розрахунок витрати тепла на нагрівання металу включає тепло витрачене на нагрівання металу Q_{mi} , що виділяється при його окисленні $Q_{екз}$, засвоєне від окислення Q_{Fei} , горіння палива $Q_{топли}$ та втрат з окалиною $Q_{оки}$.

$$Q_{mi} = \frac{100 - \sigma}{100} \cdot G \cdot (i_{ik} - i_{in}), Q_{екз} = \frac{5,65 \cdot G \cdot \sigma}{100},$$

$$Q_{Fei} = Q_{екз} - Q_{оки}, Q_{топли} = Q_{mi} - Q_{Fei}, Q_{оки} = \frac{\sigma \cdot G \cdot C_{ок} \cdot (t_{мик} - t_{мин})}{100} \cdot m, \quad (2.35)$$

де i_{in}, i_{ik} - тепловміст металу на початку і в кінці і-ї зони робочого простору печі;

σ - чад металу;

G – продуктивність печі;

$C_{ок}$ - теплоємність окалини;

$t_{мин}, t_{мик}$ - початкова та кінцева температури металу в і-ї зони робочого простору печі.

5. Розрахунок теплових потужностей $M_{пи}, M_{xi}, M_{общі}$ загальні (корисна, холостого ходу, загальна) та витрати палива печі b_i .

$$M_{пи} = \frac{Q_{топли}}{\eta_{общі}}, M_{xi} = \frac{Q_i}{\eta_{общі}}, M_{общі} = M_{пи} + M_{xi}, b_i = \frac{M_{общі}}{Q_n^p}, \eta_n = \frac{\sum Q_{топли} \cdot 100}{\sum M_{общі}}. \quad (2.36)$$

6. Складання теплового балансу та визначення неврахованих втрат.

Зональний тепловий баланс методичної печі з крокуючими балками набуває вигляду.

$$M_{общі} + Q_{ф} + Q_{екз} = Q_{топли} + Q_{Fei} + Q_{ухи} + Q_{охлі} + Q_{кли} + Q_{лі} + Q_z + Q_p + Q_{оки}. \quad (2.37)$$

Димові гази, що залишають робочий простір печі, мають високу температуру і тому забирають із собою значну кількість тепла. Цей фактор

може значно вплинути на адекватність розробленої математичної моделі. Одним із найважливіших теплових показників печі є коефіцієнт використання хімічної енергії палива, збільшення якого, пов'язане з утилізацією теплоти пічних газів, що виходять та повернення її в піч з компонентами горіння, підігрітими в рекуператорі, призводить до зменшення витрати палива. Враховуючи вищезазначене, в математичну модель включено обчислювальний блок розрахунку рекуператора.

7. Розрахунок рекуператора. Найбільш поширеними рекуператорами є металеві та керамічні. Металеві рекуператори порівняно з керамічними мають більш високий коефіцієнт теплопередачі, відсутність глибоких підземних борів та покращену герметичність. Перевагою ж керамічних рекуператорів є стійка робота при температурі відпрацьованих газів (1200 ... 1350) °С.

На досліджуваній методичній печі рекуператор призначений для нагрівання повітря, що подається до пальників печі, і являє собою конструкцію з труб, вмонтованих в димарі. Повітря через систему труб (рекуператор) за допомогою вентилятора подається в зони печі. Відходять Димові гази, які виходять, у свою чергу нагрівають холодне повітря, що подається в трубах рекуператора до температури (500 ... 590) °С - (залежно від застосовуваного палива). При неприпустимо високій температурі повітря горіння, димові гази, що відходять, розбавляються холодним повітрям (вентилятор розведення). Передбачено вимірювання температури: повітря горіння на вході TE1919A, TE1919B, TE1919C, TE1919D, TE1919E, TE1919F та виході TE1919G, TE1919H, TE1919I, TE1919J, TE1919K, TE1919L рекуператора (12 точок); димових газів, що відходять перед рекуператором TE1904 (1 точка); перед шиббером TE1924 (1 точка).

Вихідними даними є: масив виміряних температур повітря горіння, димових газів, які відходять перед і після рекуператора.

Метою розрахунку є визначення розмірів рекуператора, необхідних для забезпечення підігріву необхідної кількості повітря до необхідної температури і виконується він у такій послідовності.

Упорядкування теплового балансу. Стосовно нашого випадку тепловий баланс буде наступним:

$$\ell \cdot V_{\text{пс}} \cdot (c_{\text{пс}}^{\text{H}} \cdot t_{\text{пс}}^{\text{H}} - c_{\text{пс}}^{\text{K}} \cdot t_{\text{пс}}^{\text{K}}) = V_{\text{в}} \cdot (c_{\text{в}}^{\text{K}} \cdot t_{\text{в}}^{\text{K}} - c_{\text{в}}^{\text{H}} \cdot t_{\text{в}}^{\text{H}})$$

де $\ell = 0,9$ - поправка, яка враховує втрати тепла у навколишнє середовище;

$c_{\text{в}}^{\text{H}}, c_{\text{в}}^{\text{K}}$ - питомі теплоємності повітря при $t_{\text{в}}^{\text{H}}, t_{\text{в}}^{\text{K}}$ відповідно;

$c_{\text{в}}^{\text{пс}}$ - питома теплоємність повітря при $t_{\text{пс}}^{\text{K}}$.

Виходячи з розрахованих обсягів продуктів згоряння (2.16) їх відсоткове співвідношення буде таким: 10 % CO_2 , 20 % H_2O та 70 % N_2 і в залежності від температур димових газів на вході в рекуператор $t_{\text{пс}}^{\text{H}} = m_{t_{\text{рек}}}$ [13] і на виході $t_{\text{пс}}^{\text{K}} = m_{t_{\text{рек}}}$ [14] розраховуються їх теплоємності.

Тепло, що передається через поверхню нагріву рекуператора та середньологарифмічна різниця температур визначена таким чином:

$$Q = V_{\text{в}} \cdot (c_{\text{в}}^{\text{K}} \cdot t_{\text{в}}^{\text{K}} - c_{\text{в}}^{\text{H}} \cdot t_{\text{в}}^{\text{H}}), \bar{\Delta t} = (\Delta t_{\text{н}} - \Delta t_{\text{к}}) / \ln(\Delta t_{\text{н}} / \Delta t_{\text{к}}), \quad (2.38)$$

Розрахунок сумарного коефіцієнта теплопередачі виконано згідно з [1]

$$K = (a_{\text{в}}^{\text{конв}} \cdot a_{\text{пс}}) / (a_{\text{в}}^{\text{конв}} + a_{\text{пс}}), \quad (2.39)$$

де $a_{\text{пс}}, a_{\text{в}}$ - коефіцієнт тепловіддачі на димовій та повітряній сторонах, послідовність розрахунку яких наведена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Послідовність розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі

№ п/п	Формула
1	2
1	<p>Коефіцієнт тепловіддачі конвекцією на повітряній стороні:</p> $a_{\text{в}}^{\text{конв}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\text{в}}}{d_{\text{в.пр}}} \cdot \text{Re}_{\text{в}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{в}}^{0,4} \cdot \frac{0,5 \cdot [0,5 \cdot (t_{\text{пс}}^{\text{н}} + t_{\text{в}}^{\text{к}}) + 0,5 \cdot (t_{\text{пс}}^{\text{к}} + t_{\text{в}}^{\text{н}})] + 273}{\bar{t}_{\text{в}} + 273}$
	<p>Критерій Рейнольдса:</p> $\text{Re}_{\text{в}} = w_{\text{в}} \cdot d_{\text{в.пр}} / \nu_{\text{в}}, \text{Re}_{\text{пс}} = w_{\text{пс}} \cdot d_{\text{пс}} / \nu_{\text{пс}}$
	<p>Наведений діаметр та периметр повітряного кільця:</p> $d_{\text{в.пр}} = 4 \cdot f_{\text{в}} / \Pi, \Pi = \pi \cdot (d_{\text{в.вн}} + d_{\text{в.нар}})$
	<p>Справжня швидкість та середня температура повітря:</p> $w_{\text{в}} = w_{\text{в}} \cdot (\bar{t}_{\text{в}} + 273) / 273, \bar{t}_{\text{в}} = 0,5 \cdot (t_{\text{в}}^{\text{н}} + t_{\text{в}}^{\text{к}})$
	<p>Ширина щілини та площа перерізу для проходу повітря, з урахуванням товщини стінки рекуператора:</p> $d_{\text{в.нар}} = \sqrt{4 \cdot f_{\text{в}} / \Pi + d_{\text{в.вн}}^2} = \sqrt{4 \cdot f_{\text{в}} / \Pi + (d_{\text{пс}} + 2 \cdot \delta)^2}, f_{\text{в}} = V_{\text{в}} / w_{\text{в}}$
	<p>Швидкість повітря та продуктів згоряння:</p> $w_{\text{пс}} = (1,5 - 5) \text{ м/с}, w_{\text{в}} = (5 - 10) \text{ м/с}$
	<p>Площа перерізу та діаметр каналу продуктів згоряння:</p> $f_{\text{пс}} = V_{\text{пс}} / w_{\text{пс}}, d_{\text{пс}} = \sqrt{w_{\text{пс}} \cdot f_{\text{пс}} / \pi}$
	<p>Справжня швидкість і середня температура продуктів згоряння:</p> $w_{\text{пс}} = w_{\text{пс}} \cdot (\bar{t}_{\text{пс}} + 273) / 273, \bar{t}_{\text{пс}} = 0,5 \cdot (t_{\text{пс}}^{\text{н}} + t_{\text{пс}}^{\text{к}})$
2	<p>Коефіцієнт тепловіддачі на димарі:</p> $a_{\text{пс}} = a_{\text{пс}}^{\text{конв}} + a_{\text{пс}}^{\text{изл}}$

Продовження таблиці 2.1

1	2
2.1	<p style="text-align: center;">Конвективна складова:</p> $a_{\text{пс}}^{\text{конв}} = 0,023 \cdot \frac{\lambda_{\text{пс}}}{d_{\text{пс}}} \cdot \text{Re}_{\text{пс}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{пс}}^{0,4} \cdot (1,27 - 0,27 \cdot \frac{0,5 \cdot [0,5 \cdot (t_{\text{пс}}^{\text{н}} + t_{\text{в}}^{\text{к}}) + 0,5 \cdot (t_{\text{пс}}^{\text{к}} + t_{\text{в}}^{\text{н}})] + 273}{\bar{t}_{\text{пс}} + 273})$
2.2	<p style="text-align: center;">Перша випромінююча складова:</p> $a_{\text{изл}}^{\text{низ}} = \frac{C_{\text{в}} \cdot \varepsilon_{\text{ст}}^{\text{низ}} \cdot \left[\varepsilon_{\text{в}}^{\text{к}} \cdot \left(\frac{t_{\text{пс}}^{\text{н}} + 273}{100} \right)^4 - A_{\text{в}}^{\text{ст}} \cdot \left(\frac{t_{\text{ст}}^{\text{низ}} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{пс}}^{\text{н}} - t_{\text{ст}}^{\text{низ}}}$
2.3	<p style="text-align: center;">Друга випромінююча складова:</p> $a_{\text{изл}}^{\text{верх}} = \frac{C_{\text{в}} \cdot \varepsilon_{\text{ст}}^{\text{верх}} \cdot \left[\varepsilon_{\text{в}}^{\text{н}} \cdot \left(\frac{t_{\text{пс}}^{\text{к}} + 273}{100} \right)^4 - A_{\text{в}}^{\text{ст}} \cdot \left(\frac{t_{\text{ст}}^{\text{верх}} + 273}{100} \right)^4 \right]}{t_{\text{пс}}^{\text{к}} - t_{\text{ст}}^{\text{верх}}}$
	<p style="text-align: center;">Температура стін:</p> $t_{\text{ст}}^{\text{низ}} = 0,5 \cdot (t_{\text{пс}}^{\text{н}} + t_{\text{в}}^{\text{к}}), t_{\text{ст}}^{\text{верх}} = 0,5 \cdot (t_{\text{пс}}^{\text{к}} + t_{\text{в}}^{\text{н}}), A_{\text{в}}^{\text{ст}} = \varepsilon_{\text{CO}_2} \cdot (t_{\text{пс}}^{\text{н}} / t_{\text{ст}}^{\text{низ}})^{0,65} + \beta \cdot \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}$
	<p style="text-align: center;">Середній коефіцієнт тепловіддачі випромінюванням:</p> $a_{\text{пс}}^{\text{изл}} = 0,5 \cdot (a_{\text{изл}}^{\text{низ}} + a_{\text{изл}}^{\text{верх}})$

Визначення загальної поверхні нагріву та розмірів рекуператора

$$F = Q / K \cdot \bar{\Delta t}, \quad H = F / \pi \cdot d_{\text{пс}}. \quad (2.45)$$

Розрахунок процесу нагрівання металу, у разі опалення природним газом виконується аналогічним шляхом.

В результаті виконаної роботи, була створена математична модель методичної печі. Опис спрощених алгоритмів, наведених на рис.2.2-2.5 виконано за методом Нассі-Шнайдермана.

2.4 Аналіз адекватності математичної моделі методичної печі

Перевірка адекватності математичної моделі проводилась на підставі даних, отриманих у ТОВ «НПП Нікопольский трубний завод» під час виконання проекту. Вага металу протягом нагрівання всіх його партій становила 8 т.

Витрата газу b_i з тепловмістом металу $i_{\text{мін}}, i_{\text{мік}}$ пов'язаний з наступною формулою [1]:

$$b_i = \frac{i_{\text{мін}} \cdot (100 \cdot G - G \cdot \sigma) - i_{\text{мік}} \cdot (100 \cdot G - G \cdot \sigma) - Q_{\text{FEi}} + Q_i}{Q_n^p \cdot \eta_{\text{общи}}}$$

$$i_{\text{мік}} = B_i \cdot \frac{Q_n^p \cdot \eta_{\text{общи}}}{G \cdot (100 - \sigma)} + \frac{Q_{\text{FEi}}}{G \cdot (100 - \sigma)} - \frac{Q_i}{G \cdot (100 - \sigma)} + i_{\text{мін}}$$

(2.47)

Прогнозована температура металу визначалася за величиною теплоутримання металу (2.47). Відповідність прогнозованої розвантажувальної температури металу дійсною представимо у вигляді:

$$t_{\text{рп}}^* = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot t_{\text{рд}},$$

$$\text{де } \alpha_0 = t_{\text{рп}}^- - r_{t_{\text{рд}} t_{\text{рп}}} \cdot \vartheta_{t_{\text{рд}}} / \vartheta_{t_{\text{рд}}} \cdot t_{\text{рд}}^-; \alpha_1 = r_{t_{\text{рд}} t_{\text{рп}}} \cdot \vartheta_{t_{\text{рд}}} / \vartheta_{t_{\text{рд}}}$$

Зазначені величини обчислювалися за формулами:

$$r_{t_{pn}t_{pd}} = \frac{\sum_1^L (t_{pd} - \bar{t}_{pd}) \cdot (t_{pn} - \bar{t}_{pn})}{L \cdot \sigma_{t_{pn}t_{pd}}},$$

$$\vartheta_{t_{pd}} = \sqrt{\sum_1^L (t_{pd} - \bar{t}_{pd})^2 / (L-1)}, \vartheta_{t_{pn}} = \sqrt{\sum_1^L (t_{pn} - \bar{t}_{pn})^2 / (L-1)},$$
(2.50)

де $L = 60$ – об’єм статичної виробки (кількість експериментів).

Середньоквадратична абсолютна помилка визначалася як $\Delta t_{pn} = k \cdot \delta_{t_{pn}}^*$. Тут k - коефіцієнт Стьюдента, який визначається за таблицями відповідного розподілу, $\delta_{t_{pn}}^*$ залишкове середньоквадратичне відхилення, що обчислюється за формулою:

$$\delta_{t_{pn}}^* = \sqrt{\sum_1^L (t_{pn} - \bar{t}_{pn}^*)^2 / (L-1)}.$$
(2.51)

В результаті середньоквадратична відносна помилка прогнозу визначається так:

$$\delta_{T_n} = |\Delta T_n| / T_{n\max} \cdot 100\%$$
(2.52)

Результати обчислень наведено на рис.2.6.

В результаті перевірки математичної моделі методичної печі, підтверджено її адекватність з похибкою не більше 3 %.

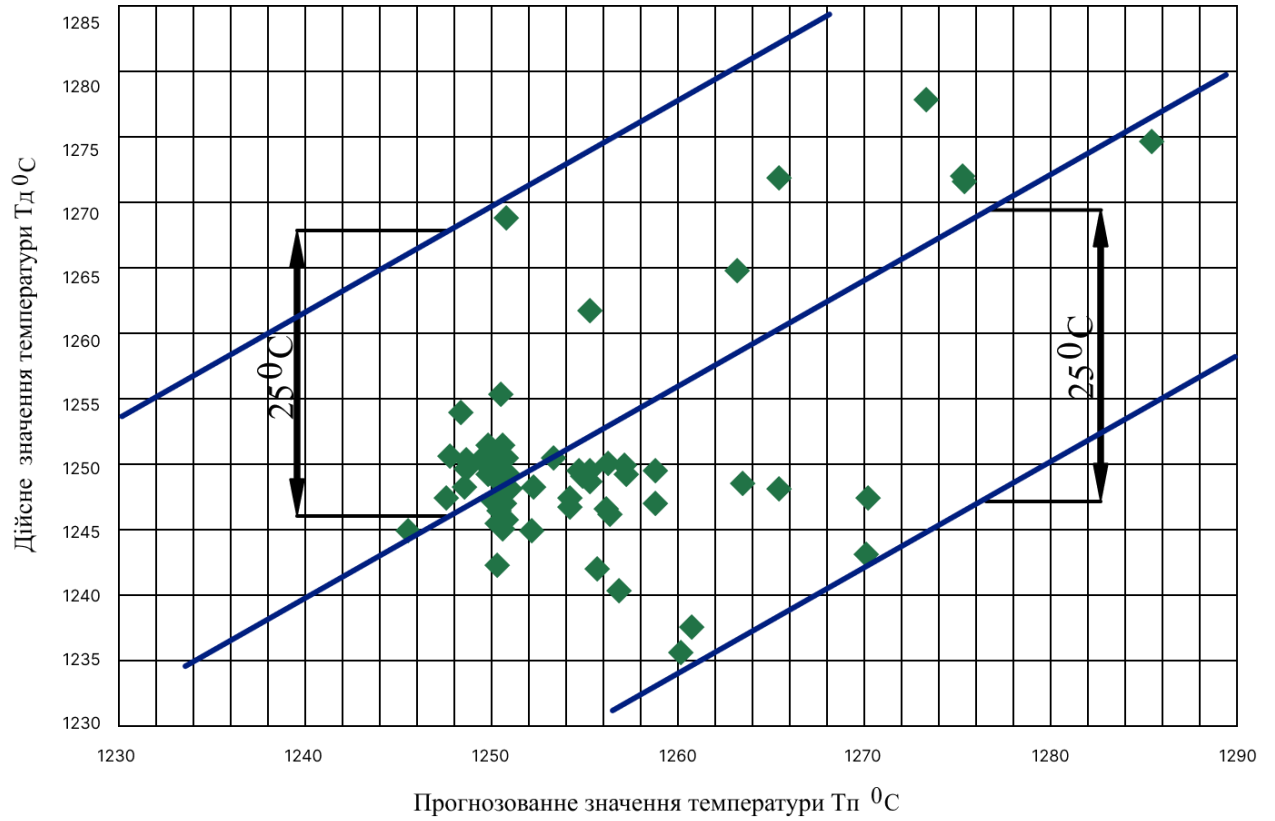


Рисунок 2.6 - Графік відхилення розрахункових параметрів моделі від дійсних

3. РОЗРОБКА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ НАГРІВУ МЕТАЛУ У МЕТОДИЧНІЙ ПЕЧІ

3.1 Аналіз послідовності функціонування системи динамічної оптимізації

Істотною перевагою методичних печей, у порівнянні зі штовхальними є додаткові можливості для управління нагріванням металу. Заготівлі в таких печах (що стосуються певної партії) можуть бути розташовані не впритул, а з будь-яким зазором, змінюючи який, можна керувати часом перебування металу в печі при фіксованій продуктивності. Інша можливість, що представляє більш цікавий підхід з практичної точки зору, полягає у тому, що можна розділяти великим зазором партії металу, для нагріву яких необхідні різні температурні режими, та керувати останніми. Однак необхідно враховувати, що керуючі впливи, які пов'язані із зменшенням продуктивності печі, можуть бути використані тільки за нагрівання марок сталей, для яких якість нагріву має більше значення, чим її продуктивність.

На діючій методичній печі ТОВ «НПП Нікопольський трубний завод» виділено дві системи управління (АСУ), які засновані на застосуванні програмованих логічних контролерів: нагріванням (генерація послідовності для управління запаленням та гасінням пальників) та транспортуванням металу. Також передбачено обмін даними щодо заготівлі з АСУ прокатного стану. У досліджуваному об'єкті запит на подачу тепла реалізується шляхом зміни тривалості включення пальників (імпульсно-послідовний принцип із циклом 60 с.).

У кваліфікаційній роботі запропоновано АСУ, яка заснована на методі динамічного програмування, що реалізує принцип оптимальності, який стверджує, що яким би не був шлях досягнення деякого стану системи, наступні рішення повинні належати до оптимальної траєкторії для частини шляху, що починається з цього стану. Застосування цього принципу дозволяє отримати всі використовувані в динамічному програмуванні функціональні

рекурентні співвідношення. Завдання полягає у пошуку оптимального режиму нагрівання металу, в якому витрата палива буде мінімальною. Отримати такий режим у печі можна шляхом генерування послідовності включення пальників.

Таким чином, для управління об'єктом, що розглядається, необхідно отримати динамічну модель процесу нагрівання металу в методичній печі, яка буде придатна для використання в алгоритмі керування. Синтез такої моделі може бути здійснено шляхом реалізації запланованого експерименту на реальному об'єкті, що досить складно та дорого, або на основі технологічної моделі, розробленої у другому розділі кваліфікаційної роботи.

3.2 Синтез динамічної моделі методичної печі

У другому розділі кваліфікаційної роботи представлені складові технологічної моделі об'єкта управління, що розглядається стосовно методичної печі з крокуючими балками в умовах ТОВ «НПП Нікопольський трубний завод». Тут же вивчено можливість отримання динамічної поліноміальної моделі роботи методичної печі, яка буде придатна для використання у системах автоматичної оптимізації.

Вирішити вказану задачу можна двома шляхами: перший – проведенням досліджень на діючій печі, що в даний час неможливо по ряду причин. До того ж це дуже дорога процедура. Другий підхід - використання розробленої технологічної імітаційної моделі методичної печі, адекватність якої підтверджена результатами пасивного експерименту та проведення на ній відповідних обчислювальних досліджень.

Одним з таких досліджень є планований експеримент, який полягає в процедурі вибору потрібної кількості та умов проведення дослідів, необхідних та достатніх для побудови шуканої моделі процесу. Планування експерименту проводилося методом Бокса Уілсона, який дозволяє отримати математичну модель процесу, використовуючи так зване факторне

планування. Ідея методу полягає в наступному: у процесі експерименту необхідно проводити невеликі серії дослідів, у кожний з яких варіюються за певними параметрами всі чинники. Застосування планування експерименту суттєво знижує час на отримання математичного опису процесу, а також забезпечує надійність отриманих результатів.

Проведення ж планованого експерименту полягає у наступній послідовності дій: вибирається необхідна і достатня кількість факторів, що визначають технологічний процес, із завданням їх рівнів та інтервалів варіювання; будується матриця планування для проведення експериментів; визначаються коефіцієнти обраної поліноміальної моделі; проводиться перевірка адекватності отриманої моделі.

Найбільш відповідальним етапом планування експерименту є вибір факторів, які суттєво впливають на технологічний процес. У випадку пропуску такого втрачається весь зміст досліджень, тому що в цьому випадку буде свідомо отримана не адекватна математична модель. Основні вимоги до факторів, що визначають технологічний процес це: керованість, тобто. можливість підтримувати значення фактора протягом усього експерименту, а також його однозначність. В якості таких факторів при проведенні планованого експерименту використані наступні: $X_{11i} \dots X_{15i}$ - сумарна зональна витрата палива у п'яти віртуальних зонах (B_i); $\sum_0^{i-1} X_{11(i-1)} \dots; \sum_0^{i-1} X_{15(i-1)}$ - передісторія з сумарної витрати палива, X_{2i} - інформація про витрату повітря (n); X_{3i} - теплота згоряння палива Q_H^p ; X_{4i} - вага металу (G_M); X_{5i} - марка сталі (l); X_{6i} - температура посада металу в піч (t_3); X_{7i} - температура навколишнього середовища (t_B); X_{8i} - частка часу відкриття завантажувального вікна з (ψ_3); X_{9i} - частка часу відкриття розвантажувального вікна (ψ_p). Тут i – номер кроку управління. При синтезі динамічної моделі методичної печі було враховано, що у ній задіяно п'ять віртуальних зон: рекуперативна, підігріву, нагрівання 1, нагрівання 2 та томильна. У роботі реалізовано дворівневий експеримент, який передбачає

варіювання факторів, на двох рівнях. Інтервали такого варіювання для вищезгаданих факторів представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 - Інтервали варіювання факторів

	X_{11i}	X_{12i}	X_{13i}	X_{14i}	X_{15i}	$\sum_0^{i-1} X_{11(i-1)}$	$\sum_0^{i-1} X_{12(i-1)}$	$\sum_0^{i-1} X_{13(i-1)}$	$\sum_0^{i-1} X_{14(i-1)}$
	$V_i, \text{м}^3 / \text{ч}$								
-1	0	2020	1360	990	700	0	0	2020	3380
+1	0	6100	4030	2460	1350	0	0	6100	10130
	$\sum_0^{i-1} X_{15(i-1)}$	X_{2i}	X_{3i}	X_{4i}	X_{5i}	X_{6i}	X_{7i}	X_{8i}	X_{9i}
	$V_i, \text{м}^3 / \text{ч}$	n	$Q_H^p, \text{МДж} / \text{м}^3$	$G_M, \text{т}$	$l, \%$	$t_3, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$	$\psi_3, \%$	$\psi_p, \%$
-1	4370	1	10,42	1	0,1	20	-10	0	0
+1	12590	1,5	34	13	1	400	40	1	1

Сумарна витрата газу по зонах $X_{11i} \dots X_{15i}$ в даному випадку визначається шляхом алгебраїчного складання витрат газу на включених пальниках, які входять до складу цієї віртуальної зони. Наприклад, сумарна витрата рекуперативної зони дорівнює нулю, а підігріву - з витрат на 1, 2, 3, 4, 5 та 6 пар включених пальників (всього 12) і т.д.

Підключена потужність пальників методичної печі наведена у таблиці 3.2. Тут враховано, що при плануванні експерименту методична піч опалюється збагаченим доменним газом, нижча теплота згоряння якого становить $Q_H^p = 29,15 \text{ МДж} / \text{м}^3$.

Потужність пальника відповідно змінюється лише із зміною величини нижчої теплоти згоряння палива. Згідно з отриманими заводськими даними, остання знаходиться у межах (23 ... 34) $\text{МДж} / \text{м}^3$

Для спрощення запису умов проведення експерименту та обробки отриманих даних, максимальне значення, варіювання кожного фактора позначалося (+1), а мінімальне – (-1).

Таблиця 3.2 - Підключена потужність пальників

	Витрата газу V_i , м ³ /год											
	Зона підігріву (Preheating zone)											
№ пальника	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
верхній ряд	980					1000				990		
нижній ряд			1050					1040				1040
Зона нагріву 1 (Heating zone 1)												
№ пальника	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
верхній ряд	830					530				640		
нижній ряд			850					530				650
Зона нагріву 2 (Heating zone 2)												
№ пальника	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
верхній ряд	530					370				280		
нижній ряд			550					460				370
Зона нагріву 2 (Heating zone 2)												
№ пальника			37	38	39	40	41	42	43	44		
верхній ряд			280				280					
нижній ряд					370				420			

Враховуючи, що в процесі управління необхідно досягти мінімізації витрати палива при незмінній якості одержуваної продукції, то динамічну модель процесу нагрівання металу в методичній печі необхідно подати у вигляді полінома залежності температури металу t_m на кожному кроці управління як функції сумарних витрат газу по зонам та їх передісторій, прийнятих на цих же кроках. Вказаний поліном буде отримано під час проведення обчислювального планованого експерименту на технологічній моделі методичної печі.

Зважаючи на те, що в результаті проведення експериментів представлялося отримати поліном, що є лінійною алгебраїчною моделлю виду $y_i = b_{11} \cdot X_{11i} + b_{12} \cdot X_{12i} + \dots + b_k \cdot X_k$ на двох рівнях, то знайти кількість дослідів, яка необхідна для реалізації усіх можливих поєднань рівнів факторів можна відповідно до залежності:

$$N = n^k, \quad (3.1)$$

де k - число факторів;

n – кількість рівнів варіювання.

Виходячи з формули 3.1 можна зробити висновок, що матриця планування повинна містити 8192 досліди (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 - Матриця планування експерименту 2^{13}

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
	X_{11i}	X_{12i}	X_{13i}	X_{14i}	X_{15i}	$\sum_0^{i-1} X_{11(i-1)}$	$\sum_0^{i-1} X_{12(i-1)}$	$\sum_0^{i-1} X_{13(i-1)}$	$\sum_0^{i-1} X_{14(i-1)}$	
1	-	+1	+1	+1	+1	-	-	+1	+1	
2	-	-1	-1	-1	-1	-	-	-1	-1	
3	-	-1	+1	-1	+1	-	-	-1	+1	
.	
.	
8192	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	
n	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	$\sum_0^{i-1} X_{15(i-1)}$	X_{2i}	X_{3i}	X_{4i}	X_{5i}	X_{6i}	X_{7i}	X_{8i}	X_{9i}	t_{mi}
1	+1	-	+1	-	+1	+1	+1	+1	+1	1260
2	-1	-	-1	-	-1	-1	-1	-1	-1	1235
3	-1	-	+1	-	-1	+1	-1	+1	-1	1247
.	
.	
8192	-1	-	-1	-	-1	-1	-1	-1	-1	1252

За отриманими в результаті експерименту необхідними значеннями t_{mi} розраховуються невідомі значення коефіцієнтів полінома виду:

$$\begin{aligned}
 t_{mi} = & b_1 \cdot X_{11i} + b_2 \cdot X_{12i} + b_3 \cdot X_{13i} + b_4 \cdot X_{14i} + b_5 \cdot X_{15i} + \\
 & + b_6 \cdot \sum_0^{i-1} X_{11(i-1)} + b_7 \cdot \sum_0^{i-1} X_{12(i-1)} + b_8 \cdot \sum_0^{i-1} X_{13(i-1)} + \\
 & + b_9 \cdot \sum_0^{i-1} X_{14(i-1)} + b_{10} \cdot \sum_0^{i-1} X_{15(i-1)} + b_{11} \cdot X_{2i} + b_{12} \cdot X_{3i} + \\
 & + b_{13} \cdot X_{4i} + b_{14} \cdot X_{5i} + b_{15} \cdot X_{6i} + b_{16} \cdot X_{7i} + b_{17} \cdot X_{8i} + b_{18} \cdot X_{9i},
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Значення коефіцієнтів полінома $b_1 \dots b_k$ обчислюються за такою формулою:

$$b_k = \frac{\sum_{i=1}^N x_{ki} \cdot t_{mki}}{N}. \tag{3.3}$$

Виходячи з останньої залежності, запишемо:

$$b_1 = \frac{(x_{12_1}) \cdot t_{m2_1} + (x_{12_2}) \cdot t_{m2_2} + \dots + (x_{12_8192}) \cdot t_{m2_8192}}{8192};$$

$$b_2 = \frac{(x_{13_1}) \cdot t_{m3_1} + (x_{13_2}) \cdot t_{m3_2} + \dots + (x_{13_8192}) \cdot t_{m3_8192}}{8192};$$

$$b_{18} = \frac{(x_{9_1}) \cdot t_{m_1} + (x_{9_2}) \cdot t_{m_2} + \dots + (x_{9_8192}) \cdot t_{m_8192}}{8192}.$$

За результатом обробки експериментальних даних із застосуванням пакету Data Fit v.8.2.79, визначено невідомі коефіцієнти полінома (формула 3.2).

$$\begin{aligned} t_{mi} = & 0,02 \cdot X_{12i} + 0,02 \cdot X_{13i} + 0,05 \cdot X_{14i} + 0,13 \cdot X_{15i} + \\ & + 0,01 \cdot \sum_0^{i-1} X_{13(i-1)} + 0,009 \cdot \sum_0^{i-1} X_{14(i-1)} + 0,007 \cdot \sum_0^{i-1} X_{15(i-1)} + \\ & + 8,5 \cdot X_{3i} + 34,01 \cdot X_{5i} + 1,45 \cdot X_{6i} + 12,03 \cdot X_{7i} - 81,3 \cdot X_{8i} - 92,7 \cdot X_{9i}. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Отримана поліноміальна модель була перевірена на адекватність по методиці та масиву експериментальних даних, використаних при побудові технологічної математичної моделі печі. Похибка становила 3,35 %, причому її значення при дублюванні (заміні) моделі, з технологічної на шукану склала $3,35 - 3,00 = 0,35$ %. Досягнуті результати свідчать про придатність динамічної моделі для використання в задачах автоматичного управління.

3.3 Алгоритм динамічної оптимізації процесу нагрівання металу методичної печі та його програмна реалізація

На підставі дослідження процесу нагрівання металу в методичній печі, результати якого приведені вище, встановлено, що він є динамічним, змінює свій характер при проходженні металу по зонам печі та відповідно його нагрівання, і питання управління ним, з метою мінімізації витрати газу, доцільно вирішувати на рівні динамічної оптимізації. У цьому розділі кваліфікаційної роботи поставлено завдання синтезувати алгоритм оптимального управління технологічним процесом нагрівання металу в методичній печі на основі отриманої у попередньому розділі динамічної моделі.

Розрахунок оптимальних керуючих впливів починається із введення даних, які впливатимуть на процес нагрівання металу. При цьому основа розробленого алгоритму є класичним завданням динамічного програмування. Машина, використовуючи весь спектр можливих керуючих впливів N на одному кроці i , з урахуванням накладених обмежень, розраховує на підставі полінома t_{mi} , можливі варіанти переведення об'єкта управління із стану i в $i+1$. Далі на підставі поданої витрати газу аналізується кінцева температура $t_{m(i+1)}$, порівнюється із заданою, що дорівнює $(1200 \dots 1250)^\circ\text{C}$ (томильна зона). Якщо значення отриманої температури не відповідають необхідним, то беруться значення витрати газу відповідно до таблиць (3.1; 3.2; 3.3).

Якщо ж зазначена температура досягнута, то в перший буфер заносяться параметри останнього кроку розрахунку, і ставиться мітка, що результат досягнуто та розрахунок завершено. Інакше зберігаються параметри поточного кроку, та процес розрахунку продовжується для наступних наборів керуючих впливів. Після закінчення визначення всіх можливих значень t_{mi} на кроці $i+1$ з першого буфера зчитуються в другий буфер параметри всіх значень t_{mi} , які не досягли необхідного значення для кроку розрахунку, і процес перебору ведеться $r \cdot n$ разів, для кроку $i+2$ де r -

кількість незавершених операцій. При отриманні необхідного результату ставиться мітка у відповідному буфері.

Процедура розрахунку триває доти, доки всі значення не будуть задовольняти вихідному. Після закінчення розрахунку всіх можливих керуючих впливів, при яких досягається зазначена температура t_{mi} вибирається траєкторія руху об'єкта, що забезпечує міні витрати газу. При цьому початкове значення витрати газу порівнюється з його наступним значенням кроку. Якщо це значення менше, то записуємо його у вихідну змінну. Інакше додаємо крок Q і повторюємо цю ж процедуру. В результаті такого перебору і визначається міні значення витрати газу.

З буфера витягується вся послідовність оптимальних параметрів витрати газу, які раніше були відзначені відповідними мітками. Отримане завдання вирішується шляхом рекурсії, іншими словами, поступового перебору за записами буфера, що містить потрібну нам інформацію. Останній процес триває доти, доки не буде переглянуто весь зміст буфера. Вся інформація, що задовольняє нашій умові, записується у зв'язковий список B .

На наступному етапі, виходячи з цього списку, який містить послідовність оптимальних значень витрати газу і реалізується керування процесом нагрівання металу. Аналізуючи отримані помилки на кожному кроці управління, у разі перевищення допустимого значення температури, система управління поміщає до буфера додаткову відмітку про поточний стан процесу, на підставі якого і проводиться перерахунок. Блок-схему запропонованого алгоритму зображено на рис.3.2.

Відповідно до рис.3.1 нагрівання металу розбито на 14 кроків у часі. Сумарні зональні витрати газів взяті на кроках 5, 8, 11 та 13. Такий вибір обґрунтований тим, що саме в цих інтервалах (5...8), (8...11) та (11...13) знаходяться віртуальні нагрівальні зони. Також тут враховуються температури на переходах зон печі:

$$\text{- рекуперативна - підігріву } t_1 = (m_{te}[6] + m_t[5] + m_{tw}[4])/3;$$

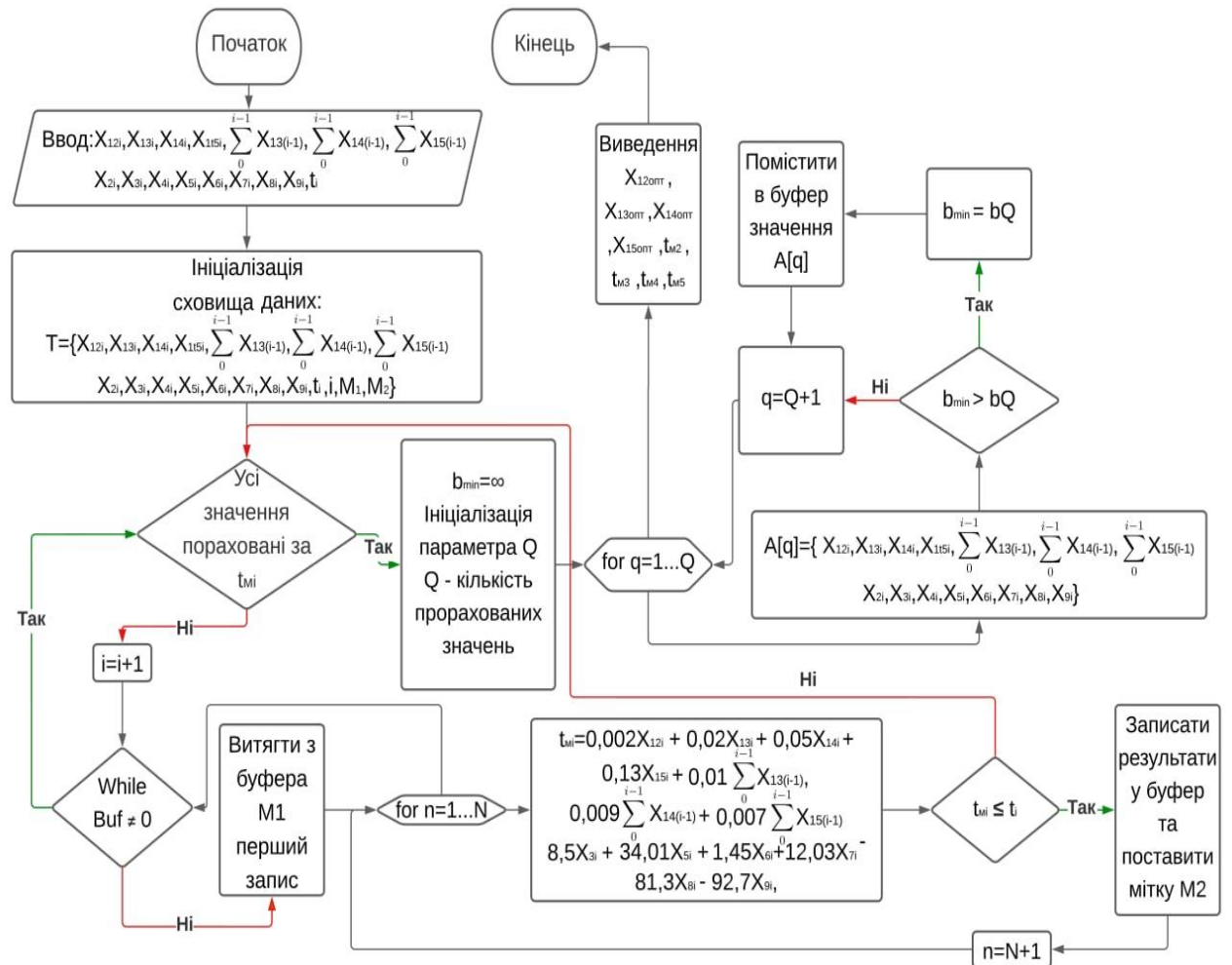


Рисунок 3.1- Блок-схема алгоритма управління нагрівом металу в печі

- підігріву – нагріву 1 $t_2 = (m_{te}[10] + m_t[9] + m_{tw}[8])/3$;
- нагріву 1 - нагріву 2 $t_3 = (m_{te}[16] + m_t[15] + m_t[17] + m_{tw}[18])/3$;
- нагрівання 2 – томильна $t_3 = m_t[21] + m_t[23]/2$ та $t_5 = t_p \geq$

1250 °С.

ВИСНОВОК

Ці температури (кроки 3, 5, 8, 11 і 13) використовуються нижченаведеним алгоритмом щодо t_{mi} .

3.4. Обчислювальні дослідження ефективності алгоритму динамічної оптимізації процесу нагрівання металу в методичній печі

Для оцінки ефективності синтезованого алгоритму на його базі створено програмне забезпечення. Основними вимогами, які висуваються до нього є: можливість вводити в динамічну модель і змінювати під час нагрівання металу в печі значення керуючих впливів технологічного процесу, фіксація зовнішніх обурювальних впливів з метою своєчасного коригування оптимальної траєкторії, а також здатність до детального відображення основних технологічних параметрів під час нагрівання металу та їх архівування до бази даних.

Для розробки програмного забезпечення, що дозволяє провести обчислювальні дослідження алгоритму управління процесом нагрівання металу в методичній печі, запропоновано використовувати продукт Borland C++ Builder 6 – працюючий під керуванням операційної системи Windows. САУ об'єктом, що досліджується, розроблена в продукті Borland C++ Builder 6 є програмно оформленим алгоритмом, написаним мовою C++.

Як база даних для збереження результатів обчислювальних експериментів використовується додаток Database Desktop, який зв'язується з Borland C++ Builder 6. Ці дані можна надалі обробляти, проводити необхідні обчислення та здійснювати статистичний аналіз проведених експериментів. Масив даних являє собою набір факторів, які впливають на процес нагріву металу, наведених у таблиці 3.1

В результаті розрахунків, згідно з розробленим алгоритмом (взята партія №1) час нагріву в рекуперативній зоні становив – 1625,5с., зоні розігріву – 3171,6с., зоні нагріву 1 та 2 – 2616,4с., томильній зоні - 1379,5с. Відповідно повний час перебування слябів зазначених розмірів становив 8793,0 с. (2 год. 27 хв.). При проведенні експерименту проходили партії по 36 слябів, кожний масою по 8 т., наступних марок сталі: стандартна вуглецева Ст5сп ; високоякісна конструкційна.

При розрахунку на i -му кроці враховується сума передісторій щодо витрати газу у попередніх зонах. В результаті визначається оптимальна крива нагрівання металу, з урахуванням температурних обмежень по зонах печі, які враховуються у вигляді уставок, отриманих з математичної моделі печі та заданих у вихідних даних алгоритму управління t_i . Програма визначає координати цієї кривої шляхом вказівки номерів рядків. При цьому також є можливість визначити які номери пар пальників були включені.

Даною програмою передбачено також подання обурення в систему у вигляді зменшення або збільшення калорійності газу на i -му кроці управління процесом нагрівання металу. Графічно переведення об'єкта управління в кінцеву точку, при виникненні обурення на вказаних 2, 4 та 6-му кроках, представлено на рис.3.2. При цьому в кожному з цих випадків повинні забезпечуватись необхідні показники якості.

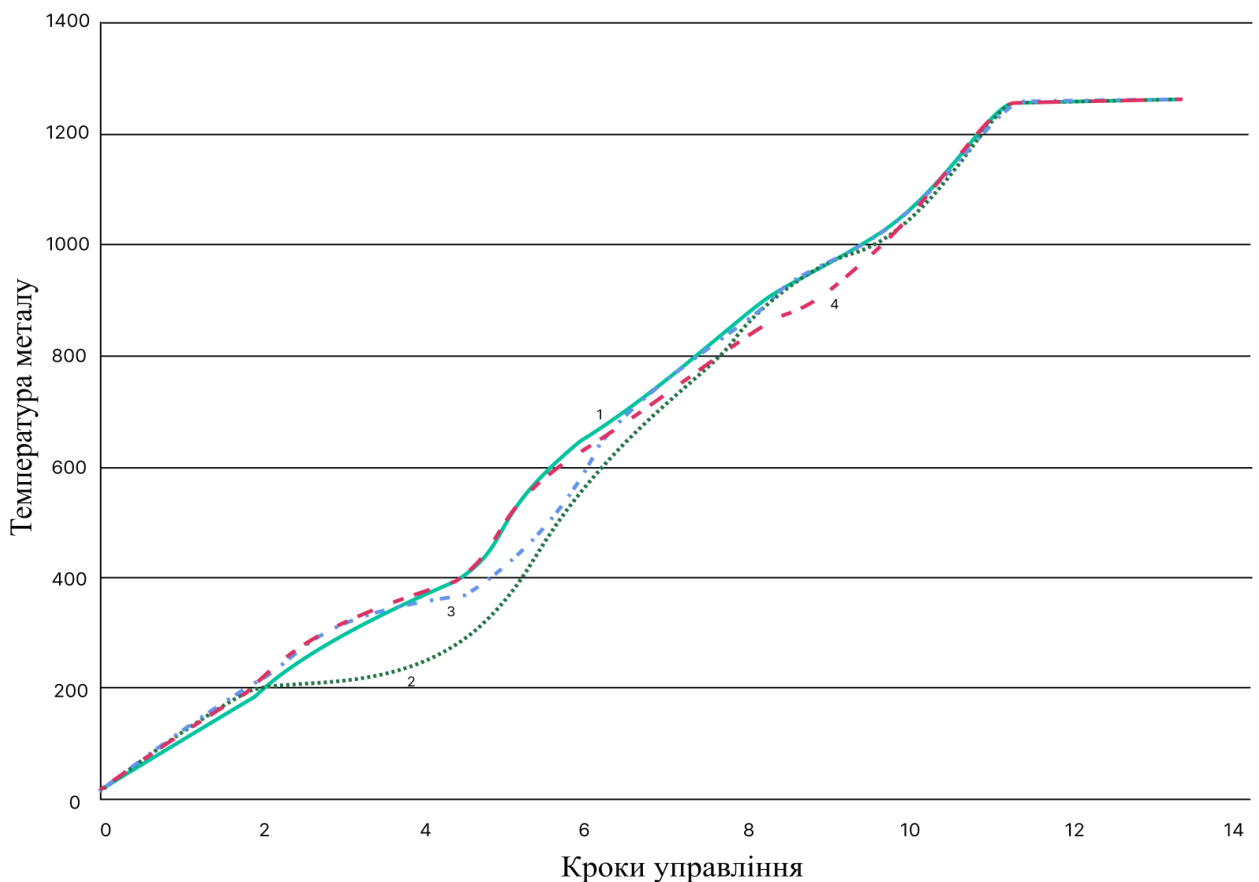


Рисунок 3.2 - Крива температури металу при можливих збуреннях змінюючи калорійності палива

З рис.3.2 видно, що об'єкт досягає кінцевої точки різними шляхами, в залежності від обурення, що подається. Крива 1 відображає процес нагріву слябу без подання обурення (партія № 3). Крива 2 відповідає подачі обурення зміною калорійності на кроці $i = 2$ (№ 7), крива 3 на кроці $i = 4$ (№ 41), крива 4 на кроці $i = 6$ (№ 19). З моменту подання обурення на i -му кроці, система розраховує нову криву нагрівання відповідно до цього i -го кроку.

У таблиці 3.4, як приклад, наведено експериментальні значення сумарної витрати природного газу при нагріванні 3, 7, 19 та 41 партій слябів, у напівавтоматичному режимі зі зміною калорійності палива (для 7, 19 та 41 партій) та порівняльний аналіз останніх, отриманих під час роботи печі (варіант № 1) та дослідження ефективності алгоритму динамічної оптимізації (варіант № 2).

Таблиця 3.4 - Експериментальні значення сумарної витрати природного газу внаслідок зміни калорійності палива

№ партії	Марка сталі	$Q_{\text{нр}}^{\text{од}}$ МДж/м ³	Сумарна витрата природного газу м ³ /год		Економія, %
			Варіант №1	Варіант №2	Варіант №2-1
3	Ст5сп	34	14040	12327	12,2
7		34 → 15	5195	5175	9,8
41		34 → 20	7582	6822	10,02
19		34 → 25	9830	8742	11,07

Одержане цією системою зниження сумарної витрати природного газу при нагріванні зазначених партій слябів, що в середньому на 10,8 % менше чинних нормативних показників, свідчить про ефективність та доцільність розробленого алгоритму.

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА РЕАЛІЗАЦІЇ ЗАПРОПОНОВАНОГО ЗАХОДУ

4.1 Порівняльний аналіз використання динамічних алгоритмів та розпізнаючої оптимізації

Перевірка ефективності розроблених алгоритмів оптимального управління нагрівом металу методичної печі та їх порівняльний аналіз проводилися при використанні даних, отриманих на печі ТОВ «НПП Нікопольський трубний завод». Віртуальні значення сумарної витрати природного газу для систем динамічної (варіант 2), розпізнаючої (варіант 3) оптимізації та експериментальних даних згідно з зазначеними додатками, внаслідок зміни калорійності палива збагаченого доменного газу $Q_{\text{нр}}^{\text{од}}$ представлені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Значення сумарної витрати природного газу внаслідок зміни калорійності палива

№ партії	Марка сталі	$Q_{\text{нр}}^{\text{од}}$ МДж /м ³	Сумарна витрата природного газу м ³ /год			Економія, %		
			Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3	Варіант №2-1	Варіант №3-1	Варіант №3-1
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	Ст5сп	34	14040	12327	12046	12,2	14,2	2
2		29 → 34	14040	12034	12135	14,285	13,571	0,05
5		34 → 23	8986	7648	7660	14,893	14,751	0,009
6		23 → 34	14020	12094	11994	13,736	14,448	-0,051

Продовження таблиці 4.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	Ст5сп	34 → 15	5195	5122	4943	1,408	4,859	-2,45
8		15 → 20	7582	6126	7484	19,208	1,294	0,9325
9		20 → 29	11650	9986	10685	14,285	8,285	0,42
10		29 → 25	9828	8364	8922	14,893	9,219	0,380
11		25 → 30	12215	10537	10824	13,736	11,387	0,170
14		30 → 29	11650	10289	10306	11,680	11,538	0,012
15		29 → 34	14040	13637	12020	2,877	14,388	-4
19	09Г2С	29 → 20	9830	8490	8350	13,633	15,060	-0,104
20		20 → 29	11650	10896	10393	6,474	10,791	-0,666
23	08пс	29 → 20	7582	7062	7040	6,857	7,142	-0,0141
27		20 → 29	11650	10712	10629	8,054	8,766	-0,088
30	Ст5сп	29 → 34	14040	13463	13472	4,411	4,044	0,083
34	09Г2С	34 → 25	9828	9520	8680	3,133	11,680	-2,727
37	Ст5сп	25 → 34	14020	12598	12140	10,14	13,405	-0,321
41		34 → 20	7582	6545	6426	13,775	15,242	-0,114
Середнє значення						10,869	11,443	0,574

У даній таблиці наведено значення сумарної витрати природної газу, що входить до складу збагаченого доменного, сумарну витрату якого можна обчислити, виходячи з розрахованого у другому розділі кваліфікаційної роботи коефіцієнта газової суміші (2.7). Вважається, що нижча теплота збагаченого доменного газу $Q_{\text{нр}}^{\text{од}}$ виміряна калориметром.

У ході процесу нагрівання металу алгоритми динамічної та розпізнавальної оптимізації, які можуть бути використані у складі існуючої

системи управління піччю показали хорошу стійкість до зовнішніх обурювальних впливів, що викликається зміною калорійності палива, внаслідок нестачі доменного газу, температури посада металу в піч. У разі перевищення помилки управління з температурі металу більш ніж на 5 %, система управління робила перерахунок оптимальних керуючих впливів (зональної витрати природного газу), забезпечуючи коригування процесу з метою мінімізації сумарних витрат природного газу.

Виходячи з результатів нагріву розглянутих партій металу, можна зробити висновок, що системою розпізнавальної оптимізації було досягнуто зниження сумарної витрати природного газу на 0,574 % по відношенню до системи динамічної оптимізації та 11,443 % ($1247\text{м}^3/\text{год}$) до вихідної системи. Система ж динамічної оптимізації показала результат 10,869 % 3 ($1184\text{ м}^3/\text{год}$) по відношенню до вихідної системи. Хоча у порівнянні з реалізацією класичного методу динамічної оптимізації досягнуто незначного зниження зазначеної вище сумарної витрати, метод розпізнавальної оптимізації більш простий та універсальний. Він дозволяє розробляти аналогічні системи для інших методичних печей без переробки їхнього програмного забезпечення.

Крива нагріву партії слябів № 7 за зміни калорійності палива (34 15) МДж/м³ представлена на рис.4.1. Тут крива 1 відповідає температурі металу при постійній теплоті згорання; 2 – при реалізації розпізнавального режиму, 3 – динамічної оптимізації. Із вказаного рисунка видно, що система розпізнавальної оптимізації має більш високу стійкість до зовнішніх впливів, що обурюють, у вигляді зміни калорійності палива в порівнянні з динамічною системою оптимізації.

Точність методу розпізнавальної оптимізації визначається кроком перебору параметрів, які впливають на процес. При цьому чим менше крок, тим більш адекватно відображена реальна технологічна ситуація у логіко-предикатній моделі об'єкта. У разі використання алгоритму розпізнавальної оптимізації в САУ процесом нагрівання металу, точність величини

оптимального управління (зональної витрати природного газу) буде визначатися похибкою сумарного його вимірювання, що дорівнює 3,5 %.

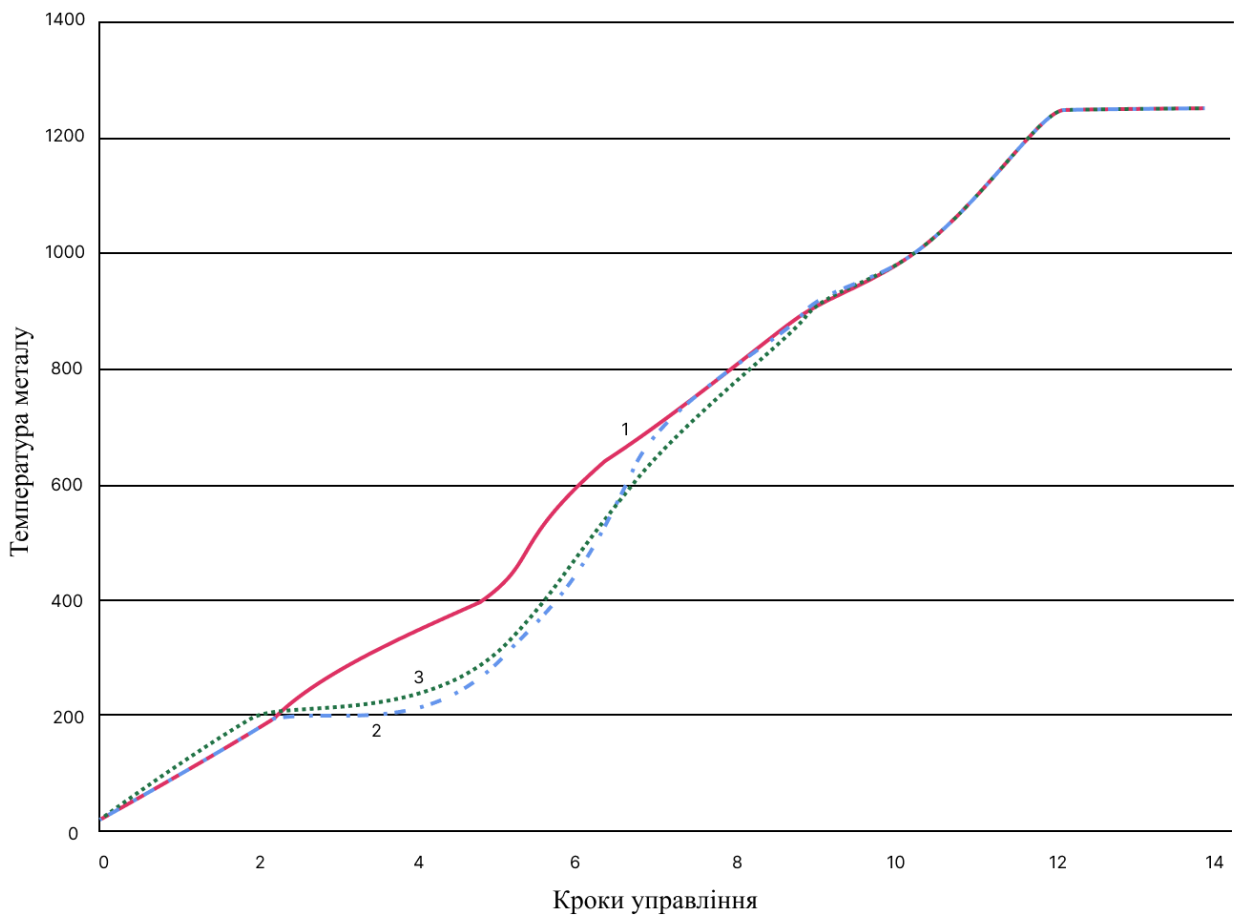


Рисунок 4.1 - Криві нагріву партії слябів №1 за зміни калорійності палива

В результаті проведених експериментів система розпізнавальної оптимізації виявилася більш ефективною у порівнянні з розробленою в третьому розділі. Підтримка заданого режиму нагрівання відповідно до параметрів, що розраховуються системою, дозволяє суттєво знизити сумарну витрату газу.

4.2 Обґрунтування параметрів технічних засобів системи керування

Існуюча система управління методичною піччю заснована на застосуванні ПЛК (програмованих логічних контролерів) розділена на дві частини: нагрівання та переміщення. Наразі можливості процесорів ПЛК

значно зросли, і тепер можлива обробка об'ємної інформації з високою надійністю та в межах прийнятного часу. Дані контролери використовуються для високошвидкісної обробки (арифметичні операції та регулювання по замкнутому циклу), а також для високошвидкісної обробки двійкових сигналів (логічне управління). Стандартні функціональні блоки оформлені у вигляді програмних модулів, які користувач може включити у свою програму для ПЛК. Ця система забезпечує такі функції: стеження за процесом, обмін даними, керування, захист.

Обмін даними між комп'ютером прокатного стану, комп'ютером печі, ПЛК печі та операторськими станціями здійснюється по каналу передачі Ethernet. Обмін даних між ПЛК завантаження/вивантаження/переміщення, дистанційного введення/виводу та пристроями зважування здійснюється каналом передачі даних Profibus. Апаратні засоби управління складаються з двох окремих ПЛК SIEMENS типу S7-400 та модулів дистанційного введення/виводу ET200, склад яких легко змінити, оскільки кожен слот підходить для встановлення плат введення/виводу будь-якого типу.

Система управління пальниками ВСУ генерує послідовності для управління запаленням та гасінням пальників у кожній зоні. Управління в такому послідовному режимі дає рівномірне нагрівання в печі при постійній довжині полум'я. Для вимірювання температури металу передбачається два пірометри на обох сторонах печі. На досліджуваному об'єкті передбачено два температурні режими регулювання: напівавтоматичний (рівень 1) та автоматичний комп'ютерний (рівень 2). Рівнем 1 піч розділена на віртуальні зони, температура яких вимірюється термопарами, встановленими на вході в зону, починаючи з розвантажувального боку печі. Функції системи рівня 2 полягають у визначенні температурних уставок у різних віртуальних зонах печі для того, щоб сляб, що видається з печі, мав задану температуру прокату. Контролер нагрівання печі виконує порівняння заданої температури з реальною в кожній зоні та видає запит рівнем 2 її збільшення чи зменшення. Як тільки ці уставки будуть задані рівнем 2 рівень 1 відрегулює

подачу тепла в піч, тобто забезпечить виконання уставок рівня 2. З контролера інформація надходить як на головний сервер так і на пульти завантаження та розвантаження печі. Залежно від типу управління, контролер видає рекомендації нагрівачу (комп'ютерний зал), або безпосередньо впливає на приводи виконавчих механізмів.

Для організації людино-машинного інтерфейсу використовується пакет програм WONDERWARE-In Touch, а як операційна система Microsoft Windows. Розроблена у кваліфікаційній роботі система розпізнавальної оптимізації може замінити існуючу систему управління нагріванням і виконуватиме такі функції: отримання вимірних значень температур за зонами, витрат газу; визначення та передача оптимальних уставок у існуючі системи.

4.3 Техніко-економічне обґрунтування доцільності використання алгоритму розпізнавальної оптимізації

Сучасні концепції реформування ринку природного газу передбачають поступове зменшення лімітів його споживання великими промисловими підприємствами, а ціна додаткового газу, який постачається незалежними постачальниками в даний час на спеціалізованому електронному майданчику, може перевищувати регульований тариф, який встановлений органами виконавчої влади більш ніж у 1,5 рази. Ця обставина вказує на суттєвий економічний ефект, який можна отримати від проведення заходів щодо оптимізації споживання природного газу.

Техніко-економічні показники роботи методичних печей залежать як від технічних можливостей, які вони мають, так і від якості керування їх тепловим режимом. Технічні можливості методичної печі визначаються сукупністю її конструктивних і теплотехнічних характеристик. Під час роботи печі ці характеристики є наперед заданими, оскільки вони формуються при розрахунку, конструюванні та будівництві печей. Тому

покращення показників роботи діючих методичних печей може досягатися головним шляхом удосконаленням процесу управління їх тепловим режимом.

Техніко-економічні показники впровадження розпізнавальної системи оптимізації на печі представлені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Техніко-економічні показники впровадження розпізнавальної системи оптимізації на печі

Показник	Позначення	Од. вимірювання	Базовий варіант	Розрахунковий варіант
Питома витрата природного газу	b	м ³ /т	55,8	48,6
Продуктивність печі	V	т/доб	1499	1499
Вартість розробки програмного забезпечення	ΔK_1	грн	-	256652
Річне зниження експлуатаційних витрат	E_r	грн	-	7252896
Термін окупності капітальних вкладень	T_1	міс	-	2

Розрахунок техніко-економічного обґрунтування, для вищезгаданого випадку показав, що річне зниження експлуатаційних витрат склало близько 7,3 млн. грн., за капітальних вкладень у 1,4 млн. грн., а окупляться вони протягом 2 місяців.

У випадку будівництва нової подібної печі до вартості розробки програмного забезпечення додається вартість матеріалів та обладнання (таблиця 4.3).

Таблиця 4.3 - Техніко-економічні показники впровадження розпізнавальної системи оптимізації на новостворених методичних печах

Показник	Позначення	Од. вимірювання	Базовий варіант	Розрахунковий варіант
Питома витрата природної газу	b	м ³ /т	55,8	48,6
Продуктивність печі	V	т/сут	1499	1499
Сума додаткових капітальних вкладень	ΔK_2	грн	-	2158242
Вартість розробки програмного забезпечення	ΔK_2	грн	-	256652
Річне зниження експлуатаційних витрат	E_T	грн	-	7252896
Термін окупності капітальних вкладень	T_1	міс.	-	4

4.4 Дослідження можливості підвищення керованості методичної печі

Методична піч, як тепловий агрегат, відрізняється складністю процесів руху, які протікають у її робочому просторі (руху повітряного середовища, зовнішнього та внутрішнього теплообміну). У металургійному виробництві частка споживання газоподібного палива зазначеними печами становить 16 %. З них 43 % теплоти становить природний газ, 26 % – коксовий та 31 % – доменний газ. Враховуючи зростання цін на енергоносії, гостро постає питання розвитку енергозберігаючих технологій. В процесі вивчення існуючої

методичної печі продуктивністю 350 т/год шляхом дослідження на технологічній моделі печі виявлено, що зі збільшенням числа керованих зон температурний режим за довжиною печі стає більш гнучким. У зв'язку з цим цікавить вивчення можливості зниження газоспоживання за рахунок збільшення кількості керованих зон.

Одним із факторів, що визначають економічність роботи нагрівальної печі, є коефіцієнт використання теплоти палива (КВТ), підвищення якого призводить до скорочення витрати палива. Одним із способів збільшення КВТ є утилізація теплоти вихідних пічних газів і повернення її в піч з компонентами горіння, підігрітими в рекуперативних теплообмінниках, на які суттєво впливає ступінь керованості прилеглої зони. У роботі поставлено завдання дослідження можливості підвищення рівня керованості методичною піччю за рахунок підвищення теплового навантаження рекуперативної зони.

Аналіз теплового режиму методичної печі показує, що для економії палива доцільно перерозподілити витрати останнього по ділянцям регулювання, збільшивши при цьому теплове навантаження першої по ходу руху металу зони, обладнаної рекуператором для підігріву повітря, що може призвести до збільшення КВТ та зниження загальної витрати палива на піч.

У процесі вивчення зазначеної методичної печі та досліджень на її технологічній моделі встановлено, що відсутність регулювання витрати за довжиною рекуперативної зони надає негативний вплив на температуру газів, що йдуть у рекуператор, а цей фактор, у свою чергу, впливає на нагрівання металу в наступних зонах печі.

Усунути наведений вище недолік, можна за рахунок підвищення керованості розглянутого агрегату за рахунок використання додаткових пальників наприкінці рекуперативної зони методичної печі. Остання, як відомо, є динамічним об'єктом, у якому температура металу під час нагрівання змінюється. Збільшення ж теплового навантаження в кінці рекуперативної зони може призвести до зниження витрати палива. Таким чином, необхідно дослідити можливість зміни величини теплового

навантаження в рекуперативній зоні та оцінити ефективність використання зазначеного керуючого впливу.

Базуючись на математичній моделі методичної печі, було проведено ряд обчислювальних експериментів з вивчення розподілу температури металу за зонами останньої. Використання при моделюванні інженерних методів розрахунку дозволило визначати вищезазначений параметр у кожній зоні печі. При проведенні експерименту передбачено, що піч проходять партії по 36 слябів, кожен масою 8т, наступних марок сталі: стандартна вуглецева Ст5сп високоякісна конструкційна 08пс; низьколегована високоміцна сталь 09Г2С. Температура посада металу в піч становила від (200 ... 400) °С.

З урахуванням введення регулюючого впливу на методичну зону, при нагріванні партії слябів № 1, розрахунковий час нагріву в останній становить – 1712,32 с (раніше було 1625,5 с), у зоні розігріву – 2850,62 с (3171,6 с), зонах нагріву 1 та 2 – 2116,4 с (2616,4 с), томильній зоні – 1126,45 с (1379,5 с). Відповідно повний час перебування слябів зазначених розмірів склав 7805,79с - 2 год. 17 хв. (8793,0 с - 2 год. 45 хв.). Таким чином, в результаті дослідження встановлено, що при використанні пальників у рекуперативній зоні додатково можна зменшити перебування металу на 28 хв.

Динаміка нагріву зазначеної партії слябів зображена на рис.4.2. З графіка видно, що підвищення температури методичної зони, сприяє більш інтенсивному нагріванню металу в ній, і за рахунок цього у наступних зонах стає можливим більш раціональний перерозподіл зазначених температур із зменшенням витрати газу на найбільш потужних пальниках. А нам відомо, найбільшу потужність (980 ... 1040) м³/год) мають пальники, що знаходяться в зоні підігріву (Preheating zone) – (1...12). Потім по ходу просування до сторони розвантаження їх потужність зменшується.

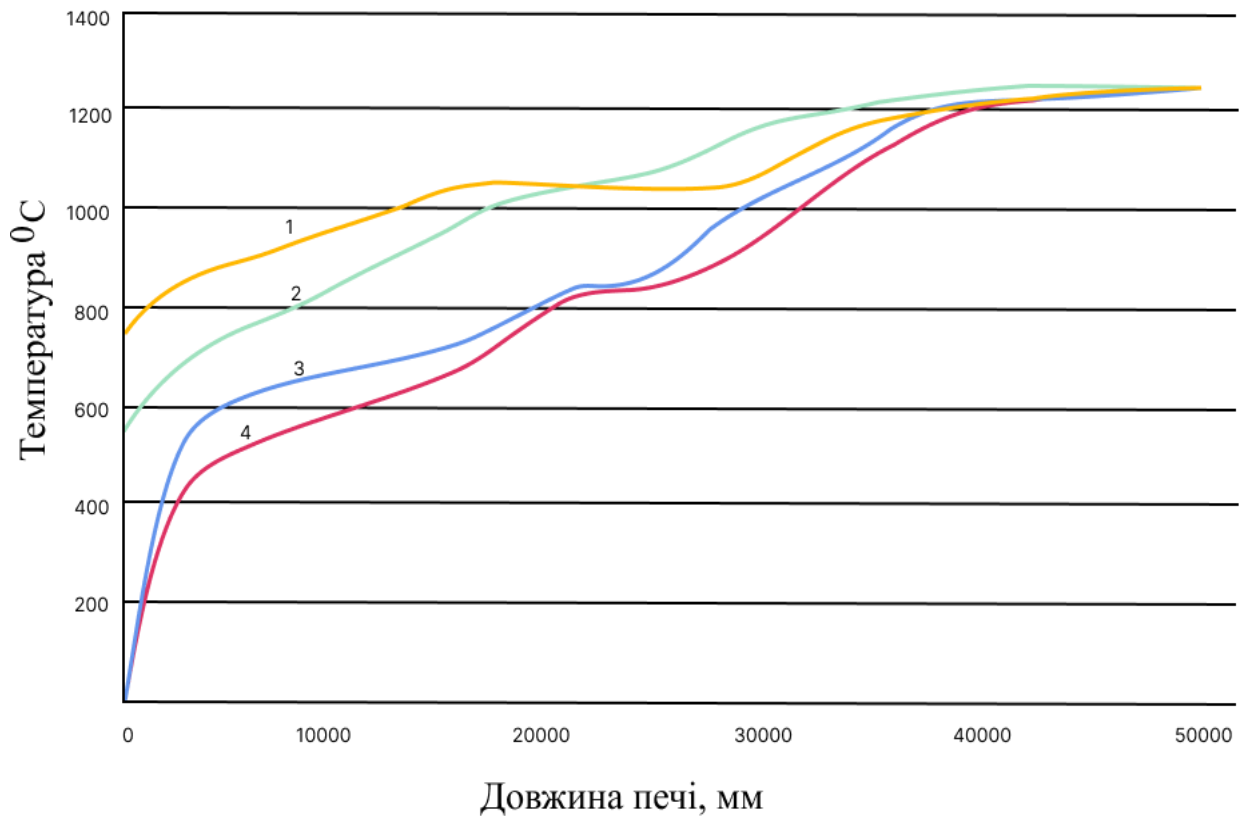


Рисунок 4.2 - Динаміка нагріву партії слябів №1

1, 3 – розподіл температури печі та металу відповідно за її довжиною при використанні нового керуючого впливу, 2, 4 – без нього

Згідно з технологією нагрівання металу в методичній печі, найбільша теплове навантаження зосереджено у зоні підігріву. Тут підключена потужність пальників 1,2 - 980 м³/год; 3,4 -1050 м³/год; 5,6 -1000 м³/год; 7,8 та 11,12 - 1040 м³/год; 9,10 - 990 м³/год. З огляду на це частка сумарної витрати природного газу зони підігріву по відношенню до загального (11619,6 м³/год, таблиця 4.4) становитиме 43 %, нагріву 1 (heating 1) – 28 %, нагріву 2 (heating 2) – 18 % та томильної (soaking) – 11 %.

Таблиця 4.4 - Результати експериментальних досліджень ефективності запропонованого додаткового керуючого впливу.

№ партії	Марка сталі	Вага, т	Сумарні витрати природного газу, м ³ /год		Економія, %
10	Ст5сп	8	9828	8835	10,10
16	09Г2С		14040	12355	12,00
21	08пс		11650	9984	14,30
3	Ст5сп		14040	11948	14,90
4	09Г2С		14040	12117	13,70
22	08пс		11650	10430	10,47
11	Ст5сп		12215	10941	10,43
34	09Г2С			9828	9737
23	08пс		7582	6892	9,10
13	Ст5сп		12215	11494	5,90
18	09Г2С		14040	13228	5,78
24	08пс		7582	7021	7,40
31	Ст5сп		14040	1522	10,84
14	Ст5сп		11650	10358	11,09
19	09Г2С		9830	8761	10,87
1	Ст5сп		11653	10312	11,51
20	09Г2С		11650	10800	7,30

Як відомо, температура горіння (калориметрична) залежить від ентальпії продуктів згорання (формули 2.17, 2.18), остання прямо пропорційна ентальпії повітря і обернено пропорційна обсягу продуктів згорання. Таким чином, збільшуючи теплове навантаження рекуперативної зони методичної печі, ми підвищуємо температуру вихідних газів, повітря горіння і печі в наступні зони.

Конструкцією рекуператора на аналізованій методичній печі передбачено обмеження температури підігріву повітря на рівні 590°С., що

відповідає температурі димових газів, що йдуть перед рекуператором 1350°C.. В результаті проведення обчислювальних експериментів на технологічній моделі методичної печі визначено межі можливого варіювання теплового навантаження рекуперативної зони. На рис.4.3 наведено графік залежності варіювання витрати газу рекуперативної зони b_1 від сумарної витрати на піч b .

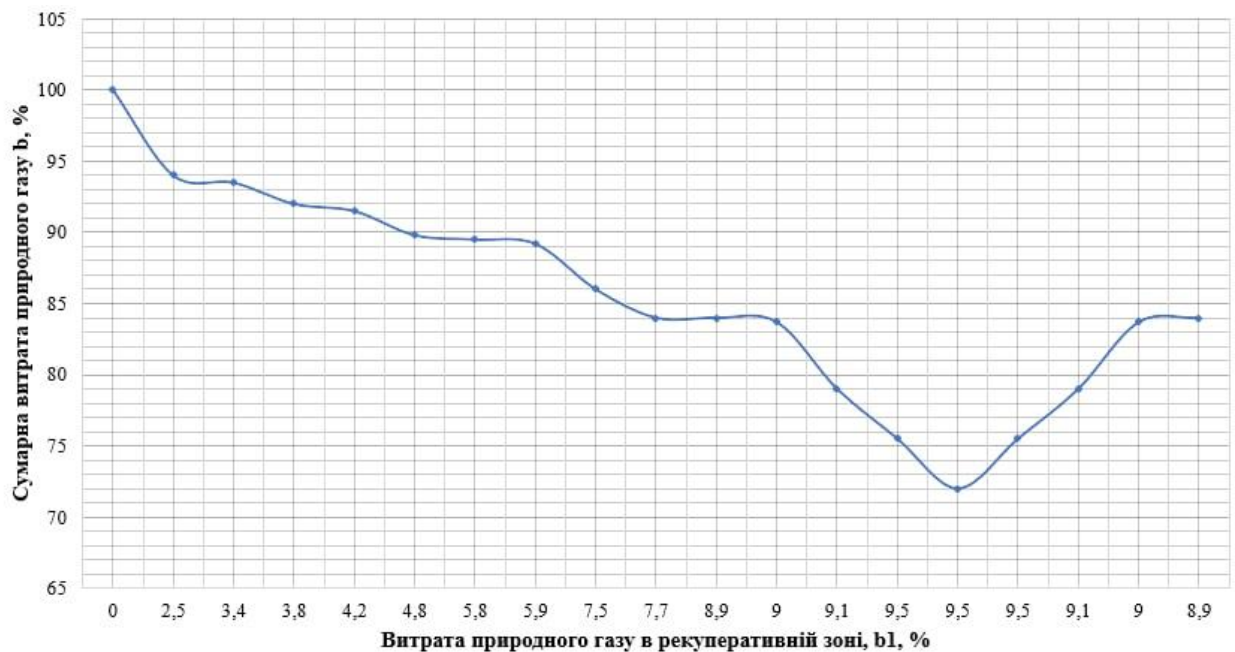


Рисунок 4.3 - Залежність витрати природного газу в рекуперативній зоні від сумарної витрати

При використанні додаткового керуючого впливу у вигляді зміни витрати палива в рекуперативній зоні, її теплове навантаження зміниться. Відсоток розподілу витрати газу по зонах печі з використанням додаткового керуючого впливу (у рекуперативній зоні встановлено дві пари пальників потужністю 3640 м/год кожні, аналогічні парам 21, 22 і 23, 24 зони підігріву 1) і без нього наведено на рис. 4.4.

Таким чином, збільшення кількості нагрівальних зон печі шляхом подачі теплового навантаження в рекуперативну зону обсягом 9,5 % від її

сумарної витрати на піч підвищує керованість останньої та зменшує споживання газу до 10,4 %.

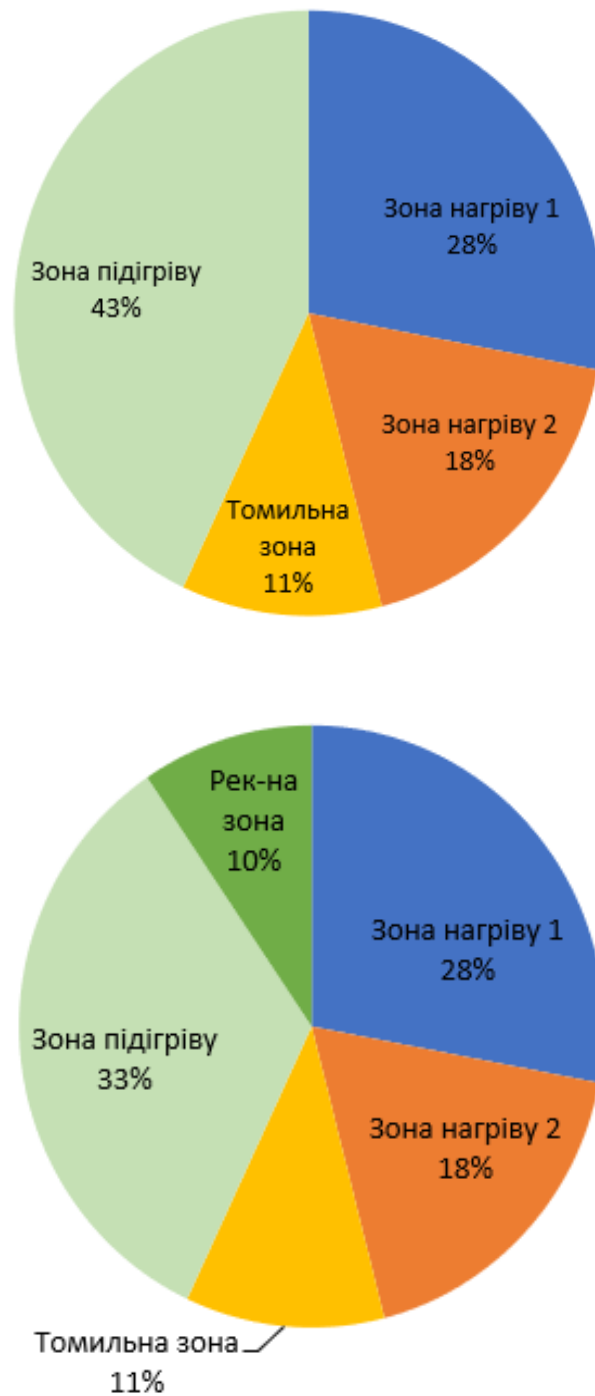


Рисунок 4.4 – Споживання природного газу віртуальними зонами печі

ВИСНОВКИ

1. Аналіз стану питань з управління процесом нагрівання металу методичних печах в умовах значного зростання цін на енергоносії дозволив зробити висновок про необхідність розробки енергозберігаючої системи керування зазначеним процесом.

2. Розроблена технологічна математична модель, що представляє собою алгоритми розрахунку процесу горіння палива, зовнішнього теплообміну в робочому просторі печі, процесу нагрівання металу, складання теплового балансу печі з визначенням сумарної витрати палива, що дозволяє використовувати її для дослідження ефективності алгоритмів управління розглянутим технологічним об'єктом. Модель перевірена на адекватність, похибка експерименту склала не більше 3 %.

3. Розроблена динамічна модель процесу нагрівання металу за методом планованого експерименту. Модель була перевірена на адекватність, похибка становила 3,35 %.

4. На основі методу динамічного програмування розроблено алгоритм керування методичною піччю. Застосування алгоритму дозволяє знизити сумарну витрату газу піччю на 10,869 %.

5. Використання додаткового керуючого впливу у вигляді зміни витрати палива у рекуперативній зоні печі дозволяє знизити сумарну витрату газу на 10,4 %.

6. Розраховані техніко-економічні показники підтвердили доцільність впровадження заходу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міністерство енергетики України : веб сайт. URL:
<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>
(дата звернення 10.09.2022).
2. Державна служба статистики України : веб сайт. URL:
<http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 04.11.2022).
3. Державна служба статистики України : веб сайт. URL:
http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2018/dop/06/dop_vp2017.pdf
(дата звернення 21.09.2022).
4. Нафтогаз група. Обсяги використання газу : веб сайт. URL:
[https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/8B3289E9F4B2CF50C2257F7F0054EA23?OpenDocument&Expand=7&\]](https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/8B3289E9F4B2CF50C2257F7F0054EA23?OpenDocument&Expand=7&) (дата звернення 15.10.2022).
5. V. O. Gabrinets, I. V. Tytarenko, G. L. Gnatiuk. Substantiation of the further implementation of heat pump and heat storage technology into the energy of industry and utilities. *Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects* : collective monograph. New York : USA : Yunona Publishing , 2019. P. 53-60.
6. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах : монография. Донецк : Ноулидж, 2012. 247 с.
7. Баріщенко О. М., Ревун М. П. Актуальні енергозберігаючі методи роботи нагрівальних печей : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 138 с.
8. Ерёмин А. О. Современные способы отопления нагревательных печей. *Металлургическая теплотехника* (Сб.научн. трудов НМетАУ). Днепропетровск : Новая идеология, 2008. С. 139 – 151.
9. Пилипенко Р. А. Интенсификация тепловой работы камерных печей, отапливаемых природным газом. *Металлургическая теплотехника* (Сб. науч. трудов НМетАУ). Днепропетровск: НМетАУ, 2002. Т.8. С.99-105.
10. Єрємін О. О., Сибір А. В., Губинський В. Й. Дослідження об'ємно – регенеративного опалення камерної печі на основі математичного

модельовання руху газів і теплообміну. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика* : зб. наук. пр. Дніпропетровськ : Нова ідеологія. 2010. Вип. 2. С. 96–106.

11. Крылова Л. С., Горбунов В. А. Расчет теплообмена в камерной нагревательной печи с учетом неизотермичности газового объема. *Металлургическая теплотехника*. 1989. Т. 2. С. 167-168.

12. Одиноченков В. В., Гаврева И. В. Обеспечение разработки и реализации стратегии эффективности ресурсо - и энергопотребления на предприятиях промышленности. *Экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами*. 2013. №3. С. 32-34.

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

14. Ревун М. П., Зинченко В. Ю. Перспективные направления совершенствования тепловой работы нагревательных и термических камерных печей. *Металлургическая теплотехника (Сборник научных трудов НМетАУ)*. 2006. № 6. С. 294-302.

15. Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Комаров А. В. Оптимальный режим использования топлива при энергосберегающем нагреве. *Изв. ВУЗ. ЧМ*. 2004. №12. С. 48-53.

16. Ганжа А. М., Заєць О. М. Оцінка ефективності системи утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXV міжнародної наук.-практ. конф., 17-19 травня 2017 : тези доп. Ч. I. Харків : НТУ «ХП». 249 с.

17. Stepanov M., Ivanova M., Litovchenko P., Ivanova L., Tarasenko O. Study of thermal modes of working fluids in grinding machines. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020. P. 299-308.

18. Юрко В.В., Ганжа А.Н. Методика расчета тепловых процессов в петлевом теплообменном аппарате при запыленном греющем

теплоносителе. *Экология и промышленность*. 2019. № 2 (59). С. 43–50.
<https://doi.org/10.35477/2311-584x.59.43-50>.

19. Зінченко В. Ю., Радченко Ю. М, Кузьменко А. А., Матказіна Р. Р., Чижов С. Є., Курило. Н. В. Вдосконалення низькотемпературного нагрівання металу в камерних термічних печах. *Металургія* 2017. Вип. 1 (37). с. 106 – 110.

20. Соколов В.М. Современные технологические решения при разработке топочно-горелочных устройств. *Новости теплоснабжения*. 2012. № 10(146). С.23-25.

21. Кошельнік О.В., Хавін Є.В., Павлова В.Г. [Моделювання роботи теплообмінних апаратів систем енерго- та теплопостачання високотемпературних технологічних установок](#). Інтегровані технології та енергозбереження. 2015. №1. С.14-18.

22. Ткаченко В. Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Київ : Наукова думка, 2008. 244 с.

23. L. Romano-Acosta, I. Álvarez-Elcoro, O. Zapata-Hernandez, and L. Leduc-Lezama. Optimization of Heating Cycles Prior Forging for Large Steel Ingots Based on a Simulation Model. *Materials Performance and Characterization*. 2018. No 1. P. 33-48. DOI : 10.1520/MPC20170139.

24. N. Bohlooli Arkhazloo, Y. Bouissa, F. Bazdidi-Tehrani, M. Jadidi, J.-B. Morin, M. Jahazi. Experimental and unsteady CFD analyses of the heating process of large size forgings in a gas-fired furnace. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. No. 8. P. 940. DOI :10.1016/j.csite. 2019. 100428.

25. Тимошпольский В.И., Трусова И.А., Менделев Д.В., Ратников П.Э. Анализ методов математического моделирования процессов теплообмена в промышленных печах для нагрева металла. *Литьё и металлургия*. 2012. № 2 (65). С. 102 – 107.

26. Сорока Б. С. Интенсификация тепломассообменных процессов при сжигании топлива в печах. Развитие теории топливных печей и топочных

процессов. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2006. №5. С. 3-1.

27. Качан Ю.Г., Николенко А. В., Степкин В. В. Алгоритм расчета процесса горения топлива в методической печи. *Теория и практика металлургии*. 2007. №2-3. С. 131-134.

28. Арутюнов В. А., Ибадуллаев Т. Б. Развитие методов математического моделирования теплофизических процессов в топливных промышленных печах. *Металлург*. 2011. № 1. С. 33–36.

29. Сибирь А. В., Решетняк С. И., Романько Я. В. Применение современных методов моделирования для расчета тепловой работы топливных нагревательных печей. *Теплотехника и энергетика в металлургии* : сб. тр. XV Международной конференции. Днепропетровск, 7–9 октября 2008 г. Днепропетровск, 2008. С. 204–205.

30. Калашников С. Н. Численно-аналитическое моделирование тепломассообменных процессов в металлургических агрегатах на основе разработки объектных приложений. *Изв. ВУЗ. ЧМ*. 2002. №8. С. 46 – 49.