

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»

ІНЖЕНЕРНО – ХІМІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ А.І. Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2019 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напрямку підготовки **6.050202 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології»**

на тему: Автоматизація процесу випалювання вуглецевих виробів

Виконала студентка 4 курсу, групи ЛА-52

_____ Гаврилюк Марина Валеріївна _____

(прізвище, ім’я, по батькові)

_____ (підпис)

Керівник _____ д. т. н., професор Жученко А. І. _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант Охорона праці _____ к. т. н., доцент Ковтун І.М. _____

(назва розділу)

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проекті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Інженерно-хімічний факультет

(повна назва)

Кафедра автоматизації хімічних виробництв

(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Напрямок підготовки 6.050202 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані техно-
нології

(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ А.І. Жученко
(підпис) (ініціали, прізвище)

«___» _____ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ
на дипломний проект студенту**

Гаврилюк Марини Валеріївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Автоматизація процесу випалювання вуглецевих виробів,

керівник проекту д. т. н., професор Жученко Анатолій Іванович

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

затверджені наказом по університету від «___» _____ 2019 р. № _____

2. Термін подання студентом проекту _____

3. Вихідні дані до проекту система керування, що забезпечує задані показ-
ники якості процесу керування

4. Зміст пояснювальної записки Аналіз процесу випалювання вуглецевих виро-
бів; розробка схеми автоматизації процесу; математичне моделювання печі
випалювання; синтез та дослідження системи керування печі випалювання;
охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників,
плакатів, презентацій тощо) Схема автоматизації процесу випалювання ву-
глецевих виробів.

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	к. т. н., доцент Ковтун І. М.		

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Аналіз процесу випалювання вуглецевих виробів	1.04.2019	
2	Розробка функціональної схеми автоматизації	08.04.2019	
3	Математичне моделювання багатоканальної печі випалювання	20.04.2019	
4	Дослідження технологічних режимів роботи режимів об'єкта керування	23.04.2019	
5	Синтез системи керування	06.05.2019	
6	Охорона праці	24.05.2019	

Студент

(підпис)

Гаврилюк М. В.

(ініціали, прізвище)

Керівник проекту

(підпис)

Жученко А. І.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Дипломний проект на здобуття ступеня бакалавра містить дослідження процесу випалювання вуглецевих виробів, його математичне моделювання, дослідження температурних режимів процесу, синтез системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів з ПІД- та МРС-регуляторами та порівняння даних систем керування, та оформлена у записку об'ємом 83 сторінки. Пояснювальна записка містить 32 рисунки, 1 таблицю, 18 літературних джерел.

Об'єктом дослідження дипломного проекту є процес випалювання вуглецевих виробів. Предметом дослідження є математична модель, температурні режими процесу у камері горіння та синтез системи керування процесом.

У дипломному проекті досліджено технологічний процесу випалювання вуглецевих виробів. Проведено математичне моделювання процесу випалювання вуглецевих виробів на базі моделі з розподіленими параметрами. На базі розробленої математичної моделі проведено дослідження роботи багатокамерної печі при різних температурних режимах роботи об'єкта. Проведено аналіз існуючих систем керування та запропоновано 2 способи керування технологічним процесом. Проведено дослідження запропонованих алгоритмів та описано переваги та недоліки кожного з них.

Ключові слова: випалювання, спосіб випалювання, вуглецеві вироби, багатокамерна піч випалювання, вуглецеві заготовки, математична модель, система керування, ПІД-регулятор, МРС-регулятор.

ABSTRACT

The graduate bachelor's degree project includes the study of the process of burning out carbon products, its mathematical modeling, the study of temperature regimes of the process, the synthesis of the control system for the process of firing carbon products from the PID- and MPC-regulators, and compares the data of control systems, and is drawn up in a note of 83 pages. Explanatory note contains 32 drawings, 1 table, and 18 literary sources.

The object of the study of the diploma project is the process of burning carbon products. The subject of the study is the mathematical model, temperature regimes of the process in the combustion chamber and the synthesis of the process control system.

The diploma project explores the technological process of burning carbon products. The mathematical modeling of the carbonaceous firing process on the basis of a model with distributed parameters was carried out. On the basis of the developed mathematical model, research was carried out on the operation of a multi-chamber furnace under various temperature conditions of the object's operation. The analysis of existing control systems is carried out and 2 ways of controlling the technological process are proposed. The research of proposed algorithms is carried out and the advantages and disadvantages of each of them are described.

Keywords: burning, method of burning, carbon products, multi-chamber burning stove, carbon blanks, mathematical model, control system, PID-regulator, MPC-regulator.

ВСТУП

Темою даного дипломного проекту є «Автоматизація процесу випалювання вуглецевих виробів».

Випалювання – процес термічної обробки пресованих заготовок, що приводить до спікання частинок порошку наповнювача коксом сполучного матеріалу. Утворений в результаті спікання матеріал являє агломерат вуглецевих частинок, скріплених коксом сполучного матеріалу. Цей новий стан забезпечує такі цінні властивості виробів, як міцність, термічна і хімічна стійкість, висока електропровідність, завдяки яким вуглецеві матеріали широко застосовуються в різних галузях промисловості.

Метою даної роботи є ознайомлення з власне процесом випалювання вуглецевих виробів, огляд існуючих математичних моделей процесу випалювання вуглецевих виробів, дослідження температурного режиму процесу випалювання, розробка і дослідження математичної моделі процесу випалювання вуглецевих виробів, використання якої в подальших дослідженнях дозволить в найкоротші терміни і з мінімальними матеріальними витратами, виконати оцінку механічного і енергетичного стану печей випалювання при різноманітних наперед завданих характеристиках технологічного регламенту, та синтез системи керування процесом випалювання вуглецевих виробів, що забезпечить випуск готової продукції заданої якості при функціонуванні процесу випалювання у режимі ресурсо- та енергозбереження.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.	Анк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1.АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ.

1.1.Загальна характеристика процесу виробництва вуглецевих виробів.

Первинною сировиною для отримання електродних заготовок є продукти нафтової і кам'яновугільної промисловості: піролізні і крекінгові нафтові кокси, пекові кокси, кам'яновугільні пеки і смолопеки [1].

На стадії виробництва монолітної вуглеграфітової продукції кокс використовується в якості наповнювача, а в якості сполучного і просочуючого матеріалу – кам'яновугільні пеки з різними температурами розм'якшення і смолопеки. За температурою розм'якшення пеки поділяються на м'які, середні і тверді. Найбільшого поширення у виробництві вуглеграфітової продукції отримали середньо і високо температурні пеки [2].

Виробництво вуглеграфітових виробів включає ряд технологічних процесів і операцій, які представлені на рис. 1.1.

На першому етапі здійснюється подрібнення сировини, що містить у своєму складі вуглець. Розмір шматків при подрібненні матеріалу наповнювача може досягати 40-45 мм. Після подрібнення матеріал надходить у прожарювальну піч з температурою прожарювання не нижче температури подальшого випалювання – 850-1300 °С. При прожарюванні з наповнювача видаляється волога і леткі речовини, збільшується його щільність, механічна міцність, електропровідність, теплопровідність і термостійкість, змінюється структура речовини [3]. Прожарений матеріал охолоджується і розмелюється для подальшого розсіюванням по фракціям. Після розсіювання сировина надходить у сортові бункери. З них певна кількість кожної фракції наповнювача і сполучного матеріалу подається в змішувачі. Фізичні властивості отриманих вуглеграфітових виробів в значній мірі залежать від складу суміші, тому кожен вид продукції має свою рецептуру суміші [2].

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		9

Шихта в змішувачах перемішується протягом 1-5 год. Температура в процесі маси перемішування маси підвищується до рівня 125-150 °С.

Отримана вуглецева маса при необхідності охолоджується і надходить в пресове відділення, де їй надають необхідну форму. Пресування маси виконують продавлюванням через мундштук певної форми або формуванням в закритій матриці. Вироби після пресування мають температуру близько 80 °С. Для запобігання деформації під дією власної ваги їх охолоджують у водяному середовищі до затвердіння [10, 11].

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		10

Від способу і характеристик пресування значно залежать такі фізичні властивості електродної продукції як щільність, електро- і теплопровідність, механічна міцність. При пресуванні в заготовках виникає текстура, яка не зникає навіть після високотемпературної обробки і впливає на те, що електродні вироби мають різні теплофізичні і механічні властивості (тобто характеризуються анізотропією) в залежності від напрямку по відношенню до осі пресування [4].

Після пресування і подальшого охолодження вуглеграфітові вироби піддаються випалюванню. Під випалюванням розуміють термічну обробку спресованих виробів при температурі 850-1300 °С, при якій органічний сполучний матеріал переходить в кокс і скріплює частки наповнювача. Випалювання заготовок здійснюється в печах різних конструкцій [5]. Технологія випалювання змінюється залежно від конструкції печі. Незважаючи на конструктивні відмінності випалювальних печей, основні технологічні операції є схожими для всіх типів печей: підготовка і завантаження, випалювання заготовок, охолодження і вивантаження.

Підготовка печі до роботи полягає в її очищенні і профілактичному ремонті конструкції. Завантаження печі починається засипанням в обсяг касет камер печі шару пересипки, товщиною 100 ± 25 мм. Далі встановлюються заготовки паралельно між собою, відстань між ними регулюється залежно від їх розмірів і схеми завантаження. Проміжки між заготовками заповнюються пересипкою на 100-150 мм вище торців заготовок. Далі камера печі закривається теплоізоляційним укриттям - склепінням печі.

Випалювання здійснюється в печах за рахунок теплоти спалення природного газу. Тривалість випалювання може становити 360-480 год. При цьому питома витрата енергії становить 3,9-4,5 ГДж /т. Для забезпечення цілісності, необхідної щільності і міцності заготовок, процес випалювання проводиться з різною швидкістю зростання температури: до 250 °С - до 2

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		12

К/год; 250-450 °С - до 1,5-2 К/год; 450-650 °С - до 4 К/год; вище 650 °С - до 5 К/год [6, 7].

Вивантаження обпалених виробів здійснюється після повного охолодження камери печі. Після вивантаження придатні вироби піддають механічному очищенню від частинок пересипки, яка спеклася.

При необхідності отримання продукції з більш якісними характеристиками після випалювання її піддають просоченню кам'яновугільним пеком, штучними смолами і ін., а після цього повторно випалюють.

1.2.Опис технологічного процесу випалювання графітових виробів.

Випалювання – процес термічної обробки пресованих заготовок, що приводить до спікання частинок порошку наповнювача коксом сполучного матеріалу.

Як видно з визначення, основою при випалюванні вуглецевих пресованих заготовок є формування з сполучного матеріалу цементуючої коксової решітки. При цьому відбувається термічна деструкція зв'язку, утворення з нього напівкоксу і подальше перетворення його в кокс, що зв'язує в єдине ціле частки вуглецевого наповнювача. Утворений в результаті спікання матеріал являє агломерат вуглецевих частинок, скріплених коксом сполучного матеріалу. Це новий стан забезпечує такі цінні властивості виробів, як міцність, термічна і хімічна стійкість, висока електропровідність, завдяки яким вуглецеві матеріали широко застосовуються в різних галузях промисловості.

Виходячи з призначення операції випалювання вуглецевих формованих заготовок, головними завданнями при випалюванні вважають забезпечення максимального виходу коксового залишку з сполучного матеріалу, що обумовлює міцність спікання частинок наповнювача і кінцеву механічну

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		13

міцність випалених заготовок і готових виробів; отримання матеріалу з однорідною по всьому об'єму заготовки бездефектною структурою.

Виконання цих вимог залежить від безлічі факторів, у тому числі від якості вихідних сировинних матеріалів (коксу-наповнювача і сполучного матеріалу), умов виготовлення "зеленої" заготовки (рецептури, параметрів змішування і пресування маси), а також від параметрів випалювання: швидкості нагріву "зелених" і охолодження випалених заготовок, рівномірності температурного поля по довжині заготовок, кінцевої температури випалювання, властивостей засипних матеріалів, схем завантаження заготовок в камери і т.д..

У процесі випалювання у вуглецевих заготовках внаслідок їх складного вихідного складу протікають різні фізико-хімічні процеси, що супроводжуються зміною агрегатного стану (заготовка спочатку розм'якшується внаслідок розплавлення сполучного пеку, потім знову твердіє в результаті коксування останнього); зміною розмірів (розширенням і усадкою); втратою маси. Ці зміни заготовок можуть відбуватися в певній послідовності і одночасно супроводжувати один одного. Результатом різноманітних впливів є напруги в заготовках, які при несприятливому поєднанні технологічних параметрів можуть привести до спотворення форми заготовок і їх розтріскування. Тому нагрівання та охолодження заготовок під час випалювання при інших рівних умовах необхідно вести таким чином, щоб звести до мінімуму неминуче виникнення в них напруги.

За характером фізико-хімічні процеси нагрівання вуглеграфітових електродних заготовок під час їх випалювання поділяють на кілька етапів [10].

На першому етапі нагріву (до 100-120 °С) відбувається часткове розм'якшення пеку і релаксація залишкових пресових напружень, що супроводжується незначним збільшенням розмірів заготовок, переважно в діаметрі. В процесі подальшого нагрівання до температур 200-230 °С відбувається розширення заготовок, пов'язане з термопластичними змінами

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		14

сполучного матеріалу. При цьому їх довжина сягає свого максимального значення.

Дослідження [6, 10] показують, що уповільнення швидкості нагріву електродних заготовок на початку випалювання (приблизно до температур 250 °С в тілі заготовок) сприяє надмірному їх розширенню в діаметрі і осідання по довжині. У разі підвищеної пластичності «зелених» заготовок, це може привести до значної їх деформації. Уповільнення швидкості нагріву на початку випалювання також сприяє втраті сполучного матеріалу із заготовок за рахунок витіснення його частини на поверхню, що в свою чергу підсилює стиснення пересипки на поверхні заготовок. Збільшення швидкості нагріву заготовок в інтервалі температур до 250 °С, навпаки сприяє зменшенню величини їх розширення і, відповідно, їх деформації і ймовірності стиснення пересипки.

В інтервалі температур 230-300 °С при досягненні пеком мінімальної в'язкості і максимальної пластичності матеріалу, відбувається осідання заготовок під дією сили тяжіння, що супроводжується значним збільшенням їх діаметра і зменшенням їх відносного видовження. Стосовно збільшення діаметра заготовок до зміни її довжини на даному етапі можна прогнозувати ступінь деформації випалених заготовок. Чим більше це відношення, тим більш ймовірна кінцева деформація. На даному етапі надмірна частина пеку видавлюється на поверхню заготовок і в пересипці, що в результаті призводить до втрати заготовками своєї маси. При 280-300 °С в сполучному матеріалі заготовок утворюються перші порушення цілісності матеріалу, викликані розривом пекових прошарків і відривом їх від зерен наповнювача.

В інтервалі температур 300-375 °С починається інтенсивне ущільнення структури пеку при одночасному протіканні процесів деструкції. При температурах 400-420 °С частина продуктів деструкції, яка не увійшла в процеси поліконденсації за рахунок малої початкової газопроникності заготовок, накопичується в них, утворюючи газовий тиск, що викликає різке збільшення їх обсягу. Щоб уникнути цього явища, нагрів заготовок в

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		15

діапазоні температур 300-420 °С, необхідно проводити з мінімальною швидкістю зростання температури [6, 10].

В інтервалі 350-400 °С різко знижується пластичність пеку. Подовження заготовок у цих умовах збільшує розриви його прошарків переважно в напрямку, перпендикулярному до осі пресування. При подальшому нагріванні заготовок (вище 400-420 °С) за рахунок виділення летючих речовин з сполучного матеріалу різко зростає екзотермічний ефект і швидкість втрати маси, зменшується розширення заготовок. Збільшення темпу нагріву заготовок в інтервалі 350-480 °С сприяє процесам розпаду сполук, які тільки що утворилися. Це знижує вихід формованого твердого залишку з сполучного матеріалу, а отже і міцність спікання його з наповнювачем. Для збереження цілісності структури заготовок в інтервалі 300-480 °С необхідно їх нагрівати з мінімальною швидкістю [6, 10].

При досягненні рівня температур 480-650 °С відбуваються процеси ущільнення структури твердого залишку сполучного матеріалу, що переходить в кокс. Цей процес протікає з поглинанням теплоти і супроводжується збільшенням пористості і газопроникності матеріалу заготовок. За даними [6], швидкість нагріву заготовок в період формування коксу з напівкоксу (480-650 °С) може бути вдвічі більше, ніж в інтервалі 350-480 °С.

При температурах понад 650 °С в заготовках тривають процеси ущільнення структури коксу, утвореного із сполучного матеріалу. Заготовки ущільнюються, зростає їх механічна міцність, електро- і теплопровідність.

Таким чином, процес нагрівання вуглеграфітових заготовок при випалюванні характеризується комплексом фізико-хімічних процесів, що протікають у середині заготовок. При цьому відбувається зміна обсягу і маси заготовок, які при несприятливому поєднанні технологічних параметрів виробництва і випалюванні можуть викликати значну їх деформацію. Для збереження форми, розмірів і структури електродних заготовок, забезпечення їх цілісності, необхідно враховувати особливості фізико-хімічних

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		16

перетворень шляхом визначення необхідної швидкості нагріву заготовок в інтервалі інтенсивного газовиділення з сполучного матеріалу. Встановлено [10], що найбільший вплив швидкості росту температури на властивості заготовок відповідає інтервалу 350-480 °С, коли і відбувається процес інтенсивного газовиділення.

Для мінімізації дефектів і забезпечення необхідної щільності і міцності вуглеграфітових заготовок в процесі їх випалювання рекомендується вести їх нагрівання за наступним регламентом [6, 10]: до 250 °С – відносно швидко; 250-480 °С – з мінімально можливою швидкістю зростання температури; 480-650 °С – зі швидкістю, вдвічі більшою, ніж в другому інтервалі; вище 650 °С – зі швидкістю, в чотири рази більшою, ніж у другому інтервалі.

Після закінчення випалювання заготовок починається процес їх охолодження. При цьому спостерігається значна нерівномірність температурного поля камери печі. У той час як периферійні частини виробів починають охолоджуватися, температура всередині заготовок може ще залишатися незмінною. У міру охолодження зовнішні частини заготовок починають стискатися, що призводить до зменшення їх внутрішньої напруги. Подальше охолодження зовнішніх частин заготовок випереджає охолодження внутрішніх, що знову посилює внутрішні напруги, які можуть призвести до руйнування виробу. Ця обставина змушує сповільнювати процес охолодження [11].

1.3.Конструктивні особливості печі.

У сучасній світовій практиці промислового виробництва вуглеграфітової електродної продукції використовують випалювальні печі наступних видів:

- багатокамерні кільцеві закриті, типу Рідгаммера [5, 9];
- багатокамерні кільцеві відкриті, переважно використовуються для виробництва анодних блоків алюмінієвої промисловості [8, 9];

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		17

– багатокамерні кільцеві закриті, застосовуються для випалювання заготовок у контейнерах при прямому нагріванні газами (без засипки між контейнерами) [9];

– з черенем викочування – для випалювання великогабаритних виробів в індивідуальних контейнерах з прямим нагріванням газами [9];

– тунельні - для повторного швидкісного випалювання продукції, просоченої пеком [3, 9];

– електричні [9].

Із зазначених конструкцій найбільш широке застосування в світі отримали багатокамерні кільцеві печі закритого типу або типу Рідгаммера. За роки експлуатації печі даного типу зазнали значних конструкційних змін. Напрямок модернізацій в основному стосувався зменшення перепаду температур по висоті робочого обсягу камер, зниження теплової інерції і т.д. Так, наприклад, звуження касет камер печі, спеціалізація печей на один типорозмір продукції дозволили не тільки механізувати процес обслуговування і в значній мірі його інтенсифікувати, а й збільшити продуктивність печей. У печах Рідгаммера природний газ спалюється за допомогою пальників, вмонтованих на периферії зводу з боку руху «вогню». При цьому факел направлений в вогневі канали (або колодязі), призначені для перетікання продуктів згоряння з попередньої камери в наступну.

У порівнянні з багатокамерними касетними печами, печі з викотним подом, відрізняються меншою тепловою інерцією, дозволяють більш повно спалювати виділені летючі речовини, що в результаті дає значну економію палива [5].

Сумарне завантаження однієї печі з викотним подом 110-200 т «зелених» заготовок. Випалювання ведеться в контейнерах з жароміцної сталі. В якості пересипки використовується нафтовий кокс. Температура випалювання становить близько 850 °С, тривалість кампанії - 360 год [9]. Температура випалених заготовок при вивантаженні - 500 °С. Температурний перепад за висотою заготовки не більше 15 °С. У верхній частині печі

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		18

встановлюються вентилятори для перемішування газів і вирівнювання температурного поля, а газові пальники - з 2-х бічних сторін печі.

Тунельні печі працюють у безперервному графіку з тривалістю кампанії 80-270 год [3]. Піч має 20 температурних зон. В верхній частині печі є газохід, в торці якого встановлений пальник і до кожної температурної зони підведений індивідуальний газохід з регульованим клапаном. Заготовки випікаються в індивідуальних касетах, встановлених на візки для зручності пересування по тепловим зонам печі. В кожній зоні може знаходитися лише один візок.

Точність підтримки температурного поля за висотою камери печі досягається за рахунок використання вентиляторів.

Відсутність пересипки між контейнерами та випалювання без пересипання просочених заготовок в тунельних печах забезпечує значну економію пересипних матеріалів, а також різко знижує трудомісткість операцій при очищенні випаленої вуглеграфітової продукції. У тунельних печах можна повністю механізувати трудомісткі операції завантаження і вивантаження заготовок.

Для випалювання спеціальної вуглеграфітової продукції невеликого діаметру, вимоги, до якості якої особливо високі, використовуються електричні печі випалу. До їх переваг можна віднести високу стабільність нагріву заготовок і безпересипну технологію випалювання. Висока собівартість випалювання в порівнянні з газовими печами робить їх неприйнятними для промислового випалювання заготовок великого діаметру [9].

У вітчизняній практиці (ПАТ «Укрграфіт») та інших заводах СНД використовують в основному багатокамерні кільцеві закриті печі типу Рідгаммера. Багатокамерна піч випалу складається з поглиблених в землю 28-32 камер, розташованих в двох паралельних рядах. Камери знаходяться в безпосередній близькості одна від одної і з'єднані між собою по торцях

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		19

каналами для послідовного руху газів. Загальний вигляд багатокамерною печі випалу типу Рідгаммера представлений на рис. 1.2.

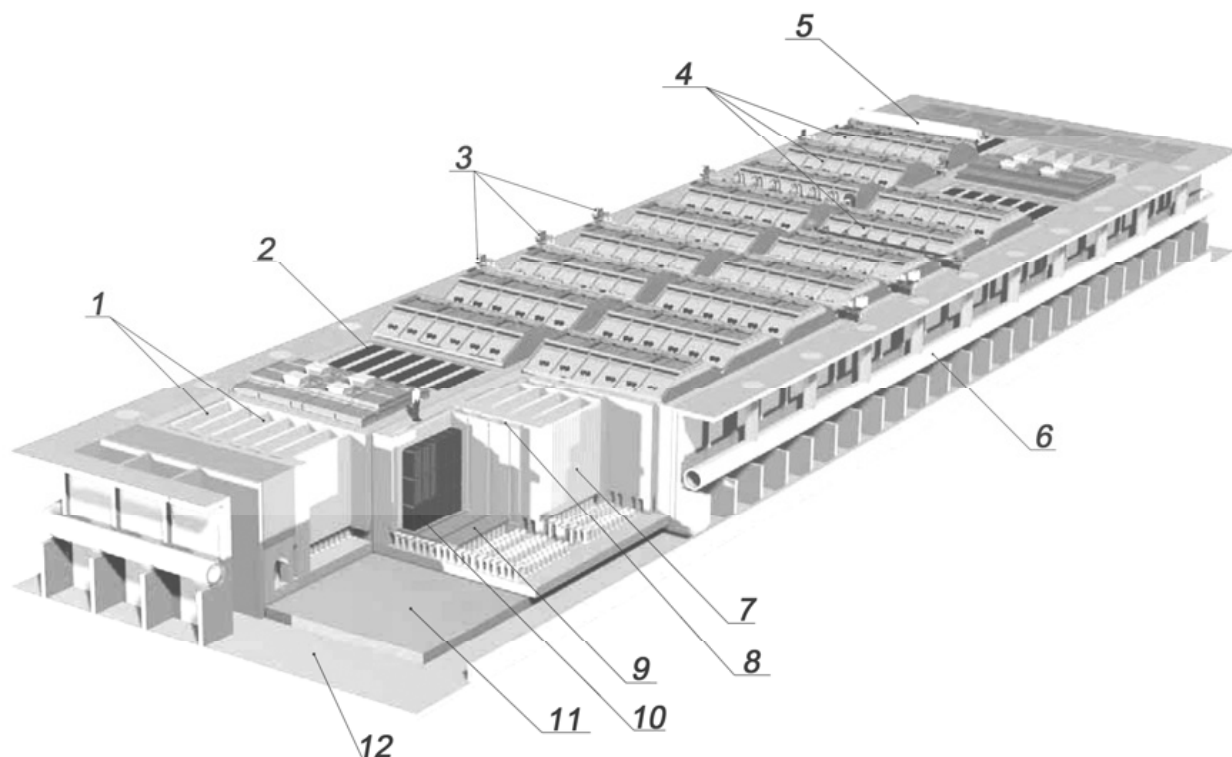


Рис. 1.2. Конструкція печі Рідгаммера для випалювання вуглеграфітової продукції:

- 1 - камера з касетами; 2 - пересипка; 3 - рампи з пальниками; 4 - звід;
 5, 6 - обладнання для відведення і транспортування димових газів, відповідно;
 7, 8 - торцеві і бічні муфельні канали, відповідно; 9 - подина; 10 - заготовки;
 11 - цегляна кладка; 12 – бетон

Камери розділені між собою міжкамерними простінками. Муфельні простінки всередині камери утворюють кілька касет для розміщення випалювальних виробів, пересипаних коксової шихтою. Пересипка

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.З	Арк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		20

забезпечує відновлювальне середовище в зоні випалювання заготовок, запобігаючи деформацію випалювальної продукції, під дією власної ваги на початку процесу і зменшує непродуктивні тепловтрати в навколишнє середовище.

Щоб розглянути роботу багатокамерною печі, скористаємося схемою процесу випалювання групи камер, зображених на рис. 1.3.

Розглянемо випадок, коли рампи з пальниками встановлені на камерах 7, 8 (Див. рис. 1.3). Газ змішується з повітрям або з димовими газами, які проходять через камери 9 і 8, відповідно, і згорає під склепінням і в вогневих каналах камер 7, 8. Отже, в камерах 7, 8 підтримується максимальна температура процесу або, як прийнято на виробництві, камери знаходяться «під вогнем». Продукти згоряння не відводяться відразу в димову трубу, а проходять через ряд камер 3-6 і підігрівають завантажені в них вуглеграфітові вироби, і таким чином охолоджуються. Димові гази, що відходять, повинні проходити через таку кількість камер, щоб їх температура знизилася до 160-200 °С і використання їх у подальшому циклі стало недоцільним [9]. Необхідне для спалювання газу повітря проходить попередньо через камеру 9, в якій знаходяться вже випалені з досить високою температурою (до 1000 °С) електродні заготовки. Таким чином, повітря для спалювання природного газу, нагрівається і подається до камери 8 з температурою 250-350 °С. При збільшенні кількості охолоджуваних камер до чотирьох температура підігрівається повітря також підвищується і може досягати 600-800 °С [5].

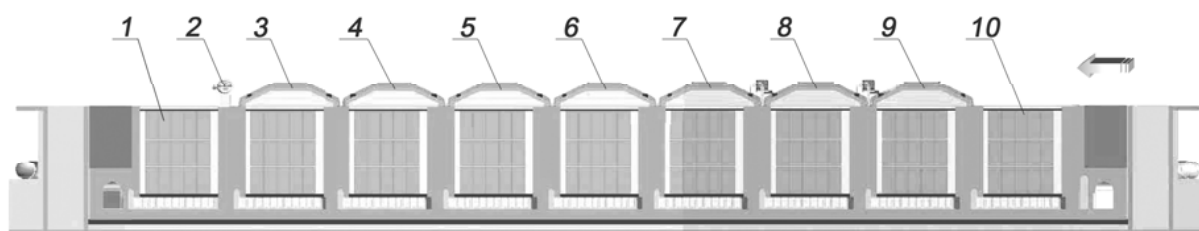


Рис. 1.3. Схема випалювання заготовок у багатокамерній печі типу Рідгаммера:

- 1 - камера на завантаженні; 2 - обладнання для відведення димових газів;
- 3-6 - камери, що підігріваються димовими газами камер 7, 8;

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		21

7, 8 - камери «під вогнем»; 9 - камера на охолодженні; 10 - камера на розвантаженні

По завершенню випалювання подача газу припиняється, і рампа з пальниками переставляється на наступну камеру в напрямку руху димових газів. При цьому камера 9 буде відключена від групи камер, задіяних в процесі, тому що вона вже досить охолоджена і буде поставлена на розвантаження, а камера 1, яка тільки що завантажена, буде підключена до групи камер. Разом з цим, обладнання для підключення печі до борову відведення димових газів буде переведено на наступну камеру в напрямку руху вогню. На рис. 1.4 показана схема руху газів в розрізі камери печі випалювання.

Згорання природного газу здійснюється під склепінням печі і в вогневих колодязях. Димові гази з простору під склепінням камери печі надходять через муфельні канали під подиуну камери. Далі димові гази через вогневі колодязі потрапляють у наступну камеру. Рух димових газів забезпечується димососом.

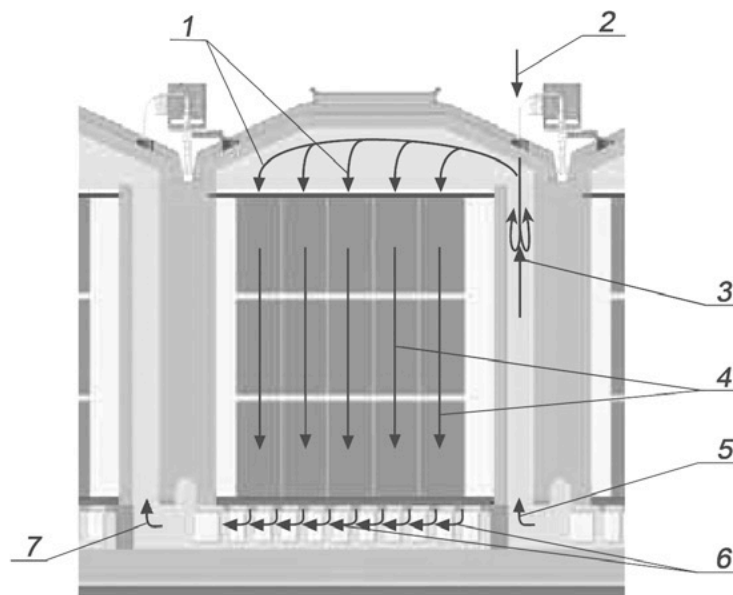


Рис. 1.4. Схема руху газів у камері печі випалювання:

- 1 - гарячі димові гази під склепінням; 2 - подача природного газу; 3 - горіння;
4 - гарячі димові гази в муфельних каналах; 5, 7 - нагріте повітря і димові гази,
відповідно; 6 - рух димових газів під подиуну

1.4. Параметрична схема процесу випалювання вуглецевих виробів.

Проаналізуємо вхідні та вихідні потоки печі, що зображена на рис. 1.5..

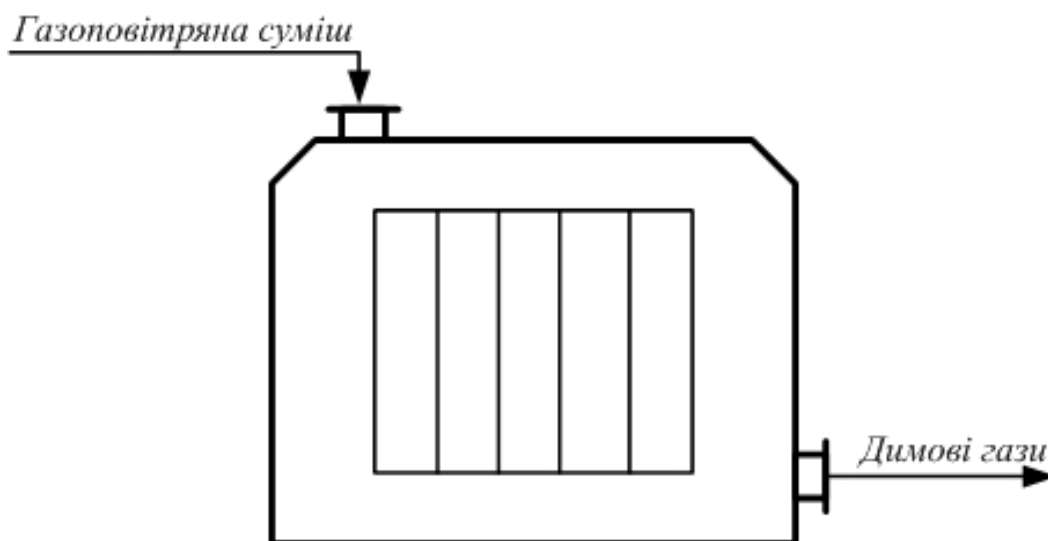


Рис. 1.5. Вхідні та вихідні потоки печі

У складі газоповітряної суміші присутнє повітря та природний газ.

Процес горіння у камерах печі відбувається завдяки природному газу, який надходить в апарат. Горіння – це окислювальний процес, що відбувається між горючими речовинами палива та окислювача, в ролі якого найчастіше використовується кисень повітря. Для нормального перебігу процесу горіння також подається повітря у певному співвідношенні з природним газом. Для забезпечення горіння природного газу необхідно підтримувати особливі умови:

- підтримувати високу температуру у зоні горіння;
- забезпечувати неперервну подачу природного газу та повітря у зону горіння;
- перемішувати природний газ та повітря;
- організувати неперервне відведення продуктів згорання, а саме димових газів, із зони горіння.

В результаті повного згорання природного газу утворюються такі речовини, як CO_2 , H_2O , SO_2 та N_2 . Якщо горіння відбувається з надлишком повітря, то у димових газах буде присутній кисень. Загалом процес горіння –

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		23

надзвичайно складне явище, тому представити точний опис простими рівняннями неможливо.

При згоранні природного газу утворюються гарячі маси димових газів. Було визначено, що кількість повітря, що надходить у камеру, визначається розрідженням у печі. Встановлено, що чим більше розрідження, тим більше димових газів надходить у камеру. У даному випадку залежність кількості та температури димових газів від розрідження, відіграє позитивну роль у процесі, адже це дає можливість використовувати гази у наступній камері підігріву.

Розглянемо детальніше піч як об'єкт керування.

Основним параметром, що визначає перебіг процесу випалювання заготовок, є температура. Ефективність процесу, а саме якість виробів, визначається швидкістю підвищення температури. Тривалість процесу залежить від максимально досягнутої температури в контрольних точках заготовок, адже існує істотна нерівномірність розподілу температурного поля в середині виробу.

Основним джерелом неконтрольованих внутрішніх збурень можна розглядати повітря, а саме його витрату та температуру. Повітря надходить до камери безперервно, так як кількість повітря, що підводиться на горіння визначається розрідженням у печі. Зазвичай, газ одночасно споживається двома-трьома камерами, що знаходяться поруч. Таким чином, повітря надходить в першу камеру гарячим, а у наступні - холодним з атмосфери. Тож так як повітря надходить у камеру «самоходом» неможливо встановити вимірювальні прилади на даний канал, тому приймаємо температуру та витрату повітря за неконтрольоване внутрішнє збурення.

У такому випадку, встановлено, що об'єкт має одне керування – витрату природного газу на вході у піч, зміна якого забезпечує зміну швидкості нагрівання та випалювання вуглецевих заготовок.

Розподіл температурного поля заготовок є основним показником стану об'єкта.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		24

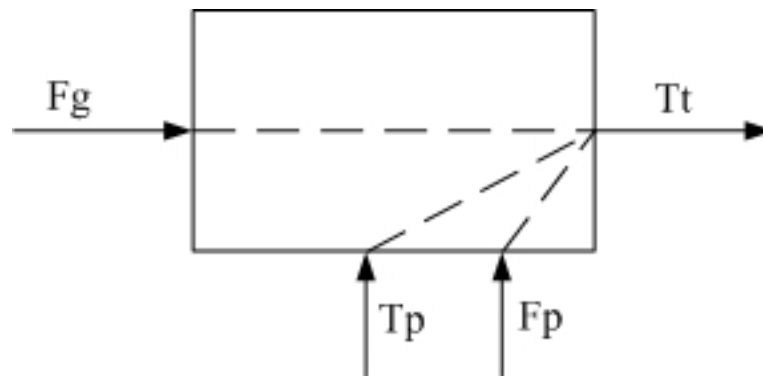


Рис. 1.6. Структурно-параметрична схема печі

На рис. 1.6. зображено структурно-параметричну схему печі. Таким чином, канал керування «витрата природного газу на вході апарату – температура заготовок».

1.5. Постановка задачі керування.

Відповідно до вище сказаного, основним показником стану об'єкта є температура в печі, що досягається спалюванням природного газу в вогневих колодязях. На відміну від класичних ситуацій, коли температура в печі залежить від температури та витрати палива та повітря, в нашому випадку витрата та температура повітря виступає у вигляді неконтрольованого збурення. Це у свою чергу обумовлює проведення попереднього дослідження впливу даних параметрів на температурний режим печі.

Відтак основною задачею керування даним процесом є забезпечення відповідної температури за каналом керування при врахуванні впливу неконтрольованого збурення.

1.6. Висновки до розділу.

Аналіз особливостей і показників випалювання вуглеграфітової продукції, експериментальних досліджень, виконаний на підставі вивчення літературних джерел показує наступне:

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		25

- випалювання є однією з найважливіших технологічних операцій, в процесі якого відбувається формування фізичних властивостей вуглеграфітової продукції різного призначення;

- процес випалювання «зелених» вуглеграфітових заготовок в багатокамерних печах характеризується кінцевою температурою 850-1300 °С, великою тривалістю (360-480 год) з і значними енерговитратами 3,9-4,5 ГДж/т;

- у світовій практиці промислового виробництва вуглеграфітової продукції найширше використання отримали багатокамерні закриті кільцеві печі типу Рідгаммера, в яких підвід теплоти відбувається за рахунок згорання природного газу;

- найбільш низька швидкість зростання температури в заготовках повинна бути забезпечена в температурному діапазоні інтенсивного газовиділення з сполучного матеріалу;

- процес випалювання вуглеграфітової продукції в багатокамерних печах характеризується значною нерівномірністю температурного поля в заготовках.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		26

2.МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ.

2.1.Аналіз існуючих математичних моделей.

Для визначення раціональних теплових режимів роботи технологічного обладнання, зокрема випалювальних печей, доцільно окремі експериментальні дослідження поєднувати з методами математичного моделювання [12], які дають можливість значно зменшити матеріальні витрати і скоротити час розробок.

Як відомо, нагрів заготовок в камері печі випалювання здійснюється за рахунок конвективного і радіаційного теплообміну між димовими газами, що проходять через муфельні канали, і теплопередачі через стінку муфеля і пересипки до заготовок. Розподіл температури по діаметру і висоті електродної заготовки в процесі випалювання визначають умови теплообміну і пірогенетичної зміни сполучного матеріалу.

Зважаючи на складний теплообміну, гідродинамічні процеси при горінні природного газу, великі розміри і ін., багатокамерні печі є досить складним об'єктом для математичного моделювання фізичних полів, що відбуваються в процесі випалу. Це в основному і визначило те, що кількість робіт присвячених цій проблемі в літературних джерелах є досить обмеженими.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		27

Сформульовано математичний опис процесів, які протікають при випалюванні вуглеграфітових заготовок в камері багатокамерної печі, що включає: теплообмін між димовими газами і муфельними каналами печі; теплопровідність в тілі заготовки; процес видалення продуктів термічного розкладання летючих; зміна щільності заготовок при випалюванні.

Завдання теплообміну між димовими газами і муфельними каналами печі в [11] вирішувалося з використанням розробленої математичної моделі конвективного і радіаційного теплообміну за допомогою програмного забезпечення (ПО) MCAD 2001i Pro. В якості граничних умов задавалися: розподіл температури гріючих газів і швидкість потоку. Отримані результати використовувалися для подальшого вирішення задачі теплопровідності безпосередньо в заготовках.

Розрахунок процесу нагріву заготовок в [11] виконано шляхом рішення двовимірної нестационарної задачі теплопровідності для областей пересипки, заготовок і футерування. При цьому граничні умови частково визначалися з рішення попередньої задачі. Завдання теплопровідності також вирішувалося в середовищі MCAD 2001i Pro, що дозволило отримувати в режимі реального часу температурне поле касети камери в цілому і циліндричної заготовки окремо.

Кількість летких, що виділяються з сполучного матеріалу і зміна щільності заготовок при випалюванні розраховувалися за відомими формулами [11].

В роботі [12] представлена математична модель гідродинамічного стану шахтної печі при випалюванні вуглеграфітових виробів, що включає: теплообмін між продуктами згоряння, поверхнею контейнера з заготовками в пересипці і поверхнями футерування робочої камери печі; теплообмін в контейнері, включаючи області пересипки і заготовок, а також в футеровці печі.

Для вирішення завдання зовнішнього теплообміну в системі газ-кладка-поверхня контейнера використовувався спрощений зональний метод

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		28

радіаційного теплообміну в поглинає і випромінює середовищі [12]. У рамках цього методу система зональних рівнянь формується шляхом підстановки виразів для потоків результуючого випромінювання і конвективної тепловіддачі в рівняння теплового балансу кожної із зон, включаючи теплової потік, що падає або випромінюється зоною.

Метою завдання внутрішнього теплообміну є визначення нестационарних температурних полів в контейнері з заготовками, футеровці бічних стін печі, склепінні, решітці подини, і максимального перепаду температур випалюються заготовок при заданих умовах теплообміну на їх поверхнях, отриманих з рішення зовнішньої завдання. Обчислювальний алгоритм передбачав розрахунок температурного поля контейнера з рекомендованим кроком інтегрування за часом 600 с.

Використовується також математична модель гідродинамічного стану кільцевої багатокамерною печі Рідгаммера, що включає в себе половину перетину камери печі (з міркувань симетрії) в напрямку руху димових газів і складається з 500 000 елементів (рис. 2.1а).

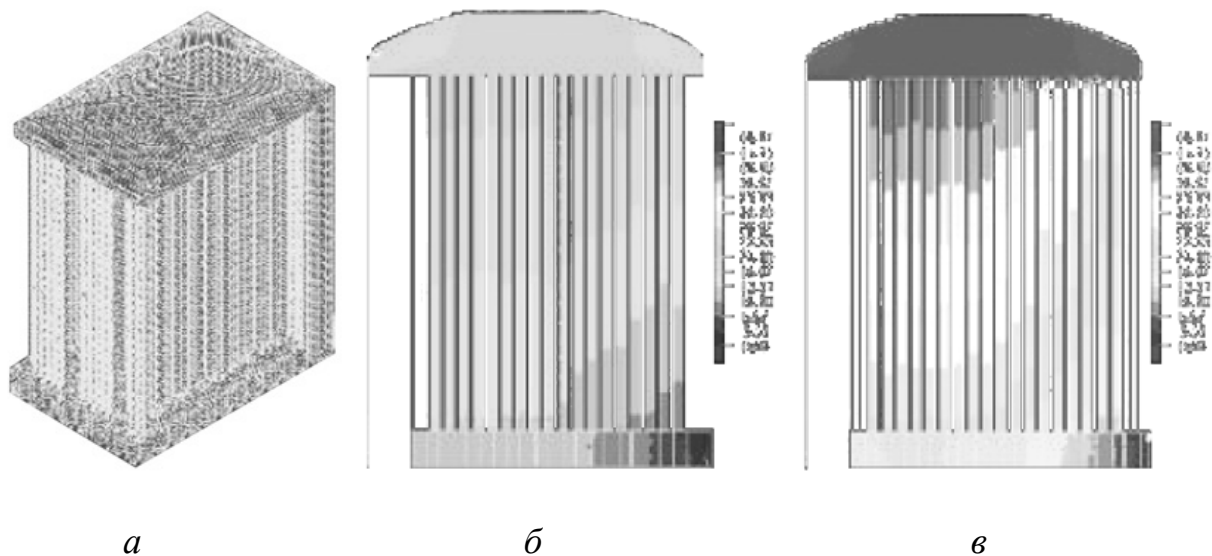


Рис. 2.1. Математичне моделювання гідродинамічного стану печі випалювання: а - дискретизація камери печі випалу (1/2 частина); б, в - розподіл тиску в газовому просторі базової і зміненої конструкції камери печі випалювання, відповідно

На рис. 2.1б, в показані поля розподілу тиску в газовому просторі камери печі базової і зміненої конструкції, відповідно. Результати чисельного моделювання показали, що зменшення розміру вікон для виходу димових газів з камери призводить до підвищення тиску в напрямку їх руху і, як наслідок, до більш рівномірного підігріву електродних заготовок.

З аналізу, доступних в літературних джерелах, даних по математичному моделюванню процесу випалювання можна зробити висновок, що вони є неповними і недостатніми, щоб в повній мірі оцінити вплив тепло-гідродинамічних процесів, що протікають під час випалювання в багатокамерних печах, на властивості і якість вуглеграфітової продукції. Ні в одному з доступних літературних джерел не розглядається процес горіння природного газу при випалюванні електродних заготовок в багатокамерних печах. У печах випалювання відбувається процес турбулентного горіння природного газу на етапі «камера під вогнем» без попереднього змішування з окислювачем і, тому може бути описаний схожими математичними моделями, розробленими для іншого промислового устаткування.

2.2.Багатокамерна піч випалювання як об'єкт математичного моделювання.

Фізичну модель багатокамерною випалювальної печі можна сформулювати наступним чином. Піч складається не менше ніж з двох або більше десятків камер, розташованих в два ряди нижче нульової позначки корпусу цеху випалювання. Кожна камера печі (рис. 2.2) в свою чергу складається з касет 10, стінки і подина яких утворюють газові канали. В середину кожної касети, попередньо заповненої нижнім шаром пересипки 4, завантажуються «зелені» заготовки 8, між якими і зверху яких також засипається пересипка. Зверху камера накривається теплоізолюваним укриттям 1 - склепінням. Рух димових газів через камеру печі від попередньої до подальшої здійснюється за наступним газовому тракту: вікна

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		30

6, вогневі канали 5, простір під склепінням 1, муфельні канали 9, простір між стовпчиками подини, вхідні вікна наступної камери. У процесі тривалого випалювання електродних заготовок (360-480 ч) одночасно задіяна група камер печі, що складається з 6-9 одиниць. Причому перші дві або одна камера по ходу руху газів знаходяться під вогнем, а інші камери нагріваються за рахунок димових газів перших камер. Таким чином, виконується утилізація теплоти відхідних димових газів. Під час випалювання група камер у печі знаходиться на різних етапах випалювання, якщо на першій - випалювання підходить до свого завершення, то в останньої - воно тільки починається. По завершенню періоду випалювання на першій камері, її відключають від «вогню» і від групи камер, задіяних в процесі. «Вогонь» переноситься на наступну по ходу руху газів камеру і до групи камер підключається нова камера, розташована за останньою камерою в групі.

Димові гази печі є стисливою рідиною, температура яких може досягати понад 1300 °С і мають властивості поглинаючого і випромінюючого, не розсіювального середовища. Режим руху газів у каналах печі є турбулентним. Теплообмін у газовому тракті печі є складним радіаційно-конвективним, а в твердих конструкціях печі - здійснюється за рахунок теплопровідності. На етапі «камера під вогнем» у вогневих каналах і під склепінням печі відбувається процес горіння природного газу, який подається через отвори 2 в зведенні камери. Згоряння природного газу в обсязі печі вважається повним з утворенням діоксиду вуглецю і водяної пари. Кінетика хімічної реакції дифузійного турбулентного горіння ґрунтується на законі Аррениуса [13] і вихрової дисипації [14]. Нагрівання димових газів відбувається за рахунок хімічної реакції горіння і дисипації в'язкості.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.3	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		31

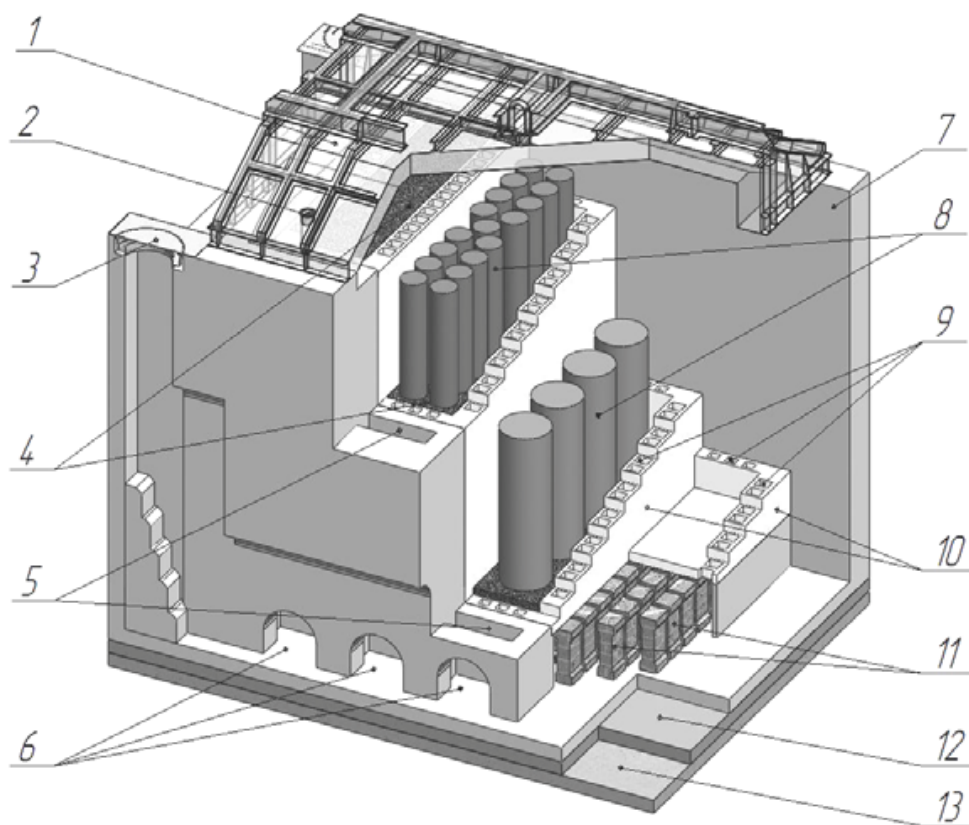


Рис. 2.2. Камера печі випалювання: 1 - звід; 2 - отвори для установки пальників; 3 - канал для відведення димових газів; 4 - пересипання; 5 - вогневі канали; 6 - вікна входу димових газів з попередньої камери; 7 - вогнетривка футеровка камери; 8 - вуглеграфітові заготовки; 9 - муфельні канали; 10 - касети; 11 - стовпчики подини касети; 12 - цегляна кладка; 13 – бетон

При нагріванні заготовок в печі в інтервалі температур 250-500 °С (в залежності від властивостей сполучного матеріалу) відбуваються процеси інтенсивного газовиділення з сполучного матеріалу. Проходження цього інтервалу на відносно високих темпах нагріву вуглеграфітових заготовок (більше 2,5 К/год) може викликати їх пористу структуру, утворення тріщин, надлишкову втрату маси і самозаймання летючих, що в результаті може призводити до некерованості процесом випалювання, відхилення від заданого регламенту випалювання за рахунок додаткового підвищення темпу нагріву.

При побудові математичної моделі доцільно розглядати тільки одну камеру, що послідовно проходить всі стадії випалювання заготовок - від

нагрівання димовими газами до інтенсивного нагрівання на етапі «камера під вогнем».

Відповідно до сформульованої фізичної моделі багатокамерної печі математична модель нестационарного дифузійного горіння природного газу в турбулентному потоці може бути побудована на основі усереднених по Рейнольдсу рівняннях Нав'є-Стокса.

Перейдемо до складання теплового балансу камери печі.

На підставі літературних даних тепловий баланс камери багатокамерної печі, в якій забезпечуються умови протікання технологічного процесу за рахунок спалювання природного газу, можна записати наступним рівнянням:

$$Q_{гор} + Q_{пов} + Q_{пал} = Q_{загр} + Q_{пер+фут} + Q_{вип} + Q_{хім} + Q_{неп} + Q_{т.вт} + Q_{відх.г}, \quad (2.1)$$

де $Q_{гор} = BQ_{н}^p$ - теплота, що виділяється за рахунок горіння природного газу, кВт; $Q_{н}$ - нижча робоча теплота згоряння природного газу, кДж /м³; B - витрата природного газу, м³/с; $Q_{пов} = L_{\alpha}h'_{пов}$ - теплота, що вноситься з підігрітим повітрям, кВт; L_{α} - дійсна витрата повітря, споживана на горіння, м³/с; $h'_{пов}$ - ентальпія підігрітого повітря, кДж /м³; $Q_{пал} = c_{рпал}T_{пал}B$ - теплота, що вноситься природним газом, кВт; $c_{рпал}$ - об'ємна ізобарна теплоємність природного газу, кДж/(м³К); $T_{пал}$ - температура природного газу, К; $Q_{загр}$ - теплота, що витрачається на нагрівання завантаженої камери, кВт; $Q_{пер+фут}$ - теплота, що йде на нагрівання пересипання і футерування камери, кВт; $Q_{вип}$ - теплота на випаровування вологи, кВт; $Q_{хім}$ - теплота на хімічні процеси, кВт; $Q_{неп}$ - втрати теплоти з неповнотою згоряння природного газу, кВт; $Q_{т.вт}$ - тепловтрати через огорожу печі, відкриті люки та ін., кВт; $Q_{відх.г}$ - втрати теплоти з газами, кВт.

Зазвичай рівнянням типу (2.1) користуються для складання підсумкового теплового балансу багатокамерною печі на підставі експериментальних даних. Якщо ж потрібно виконати складання теплового балансу на основі даних про чисельні експериментів з використанням,

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		33

наприклад, математичної постановки задачі, то рівняння (2.1) має дещо інший вигляд. При цьому методика ґрунтується на складанні миттєвого балансу печі, а для отримання підсумкового - застосовується просте підсумовування.

2.3. Математична модель процесу випалювання вуглецевих виробів.

Для опису багатокамерної печі випалювання було обрано математичну модель наведену у роботі [15].

Рівняння балансу для середніх величин при моделюванні виходять шляхом усереднення миттєвих рівнянь балансу. Початковими умовами для усереднення миттєвих рівнянь балансу нерозривності, збереження кількості руху, транспорту компонентів реакції горіння, енергії, є:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0; \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{i,j}}{\partial x_i}; \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i Y_k) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (V_{k,i} Y_k) + \dot{\omega}_k, \quad k = \overline{1, N}; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \rho h_s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h_s) = \dot{\omega}_T + \frac{D_p}{D_t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i}, \quad (2.5)$$

де ρ – густина; t – час; u_i – компоненти швидкості; p – тиск; τ_{ij} – тензор напружень; Y_k – масова частка компонентів хімічної реакції горіння; $V_{k,i}$ – дифузна швидкість k -го компонента; $\dot{\omega}_k$ – швидкість реакції k -го компонента; h_s – ентальпія; $\dot{\omega}_T$ – об'ємне джерело теплоти за рахунок горіння; D_p / D_t –

субстанційна похідна від тиску; D_t – коефіцієнт турбулентної дифузії; λ – теплопровідність; T – температура.

Усереднення по Рейнольдсу при постійній щільності потоку полягають у розподілі будь-якої величини на середню складову коливання. Використовуючи цю процедуру, рівняння збереження маси (2.2) приводиться до вигляду:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) = \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i + \overline{\rho' u'_i}) = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \bar{u}_i) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho' u'_i}), \quad (2.7)$$

де $\overline{\rho' u'_i}$ – невизначена величина, що відповідає кореляції між густиною та швидкістю коливань.

Ця величина також є масовим джерелом для середнього поля течії $\overline{\rho' u'_i}$, що є незручною для використання. Усереднення по Рейнольдсу для змінної щільності потоків вводить багато інших невідомих кореляцій між будь-якими величинами і щільністю коливань. Щоб уникнути цих труднощів використовують середньозважені величини (так зване осереднення по Фавро).

У результаті, рівняння усереднення можна подати у вигляді:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) = 0 ; \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j''}); \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{Y}_k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Y}_k) = - \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{V_{k,i} Y_k} + \overline{\rho \tilde{u}_i \tilde{Y}_k''}) + \overline{\dot{\omega}_k}, \quad k = \overline{1, N}; \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \overline{\rho \tilde{h}_s}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \tilde{u}_i \tilde{h}_s}) = \overline{\dot{w}_T} + \frac{\overline{D_p}}{D_t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} - \overline{\rho \tilde{u}_i'' \tilde{h}_s''} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\overline{\rho \sum_{k=1}^N V_{k,i} Y_k h_{s,k}} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}; \quad (2.11)$$

$$\frac{\overline{D_p}}{D_t} = \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \overline{u_i} \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x_i} = \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial t} + \tilde{u}_i \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x_i} + \overline{u_i''} \frac{\partial \overline{\rho}}{\partial x_i}. \quad (2.12)$$

Ці рівняння формально аналогічні класичним рівнянням, осереднені по Рейнольдсу для потоків постійної щільності. Для замикання невідомих величин в рівняннях (2.8) - (2.11) необхідно вибрати будь-яку модель турбулентності. Якщо, наприклад, вибрати модель з двома рівняннями – $k - \varepsilon$. При такому підході турбулентна в'язкість визначається як

$$\mu_t = \overline{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

де турбулентна кінетична енергія k і швидкість її дисипації ε описується за допомогою двох рівнянь балансу:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho k}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \tilde{u}_i k}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \overline{\rho} \varepsilon; \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{\rho \varepsilon}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{\rho \tilde{u}_i \varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \overline{\rho} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (2.14)$$

Член P_k визначається як

$$P_k = -\overline{\rho \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j''} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j},$$

де $\overline{\rho \tilde{u}_i'' \tilde{u}_j''}$ – напруга Рейнольдса, що визначається з виразу Бусінеска.

Константи в $k - \varepsilon$ моделі турбулентності зазвичай приймають по:

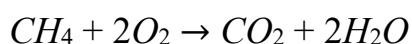
$$C_\mu = 0.09; \quad \sigma_k = 1.0; \quad \sigma_\varepsilon = 1.3; \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44; \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92.$$

Ця модель користується великою популярністю завдяки своїй простоті і економічній ефективності. Далі необхідно записати хімічну реакцію горіння

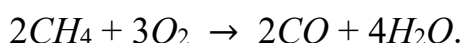
					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.3	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		36

органічного палива і вибрати модель горіння, наприклад, модель вихрової дисипації. Для замикання системи рівнянь (2.8) - (2.14) необхідно записати відповідні початкові і граничні умови.

Хімічна реакція горіння органічного палива (метану у складі природного газу) має вигляд



Горіння метану супроводжується виділенням великої кількості теплоти та утворенням вуглекислого газу та води. У разі нестачі кисню метан окиснюється не повністю. І тоді замість карбон(IV) оксиду CO_2 утворюється карбон(II) оксид CO , відомий як чадний газ:



2.4. Дослідження властивостей об'єкта керування на основі математичної моделі.

Проведемо дослідження властивостей печі на основі її математичної моделі. Будемо досліджувати зміну температури заготовок, внаслідок зміни витрати природного газу, що надходить на вхід до печі, та зміни витрати повітря, що також надходить у піч у складі газоповітряної суміші.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		37

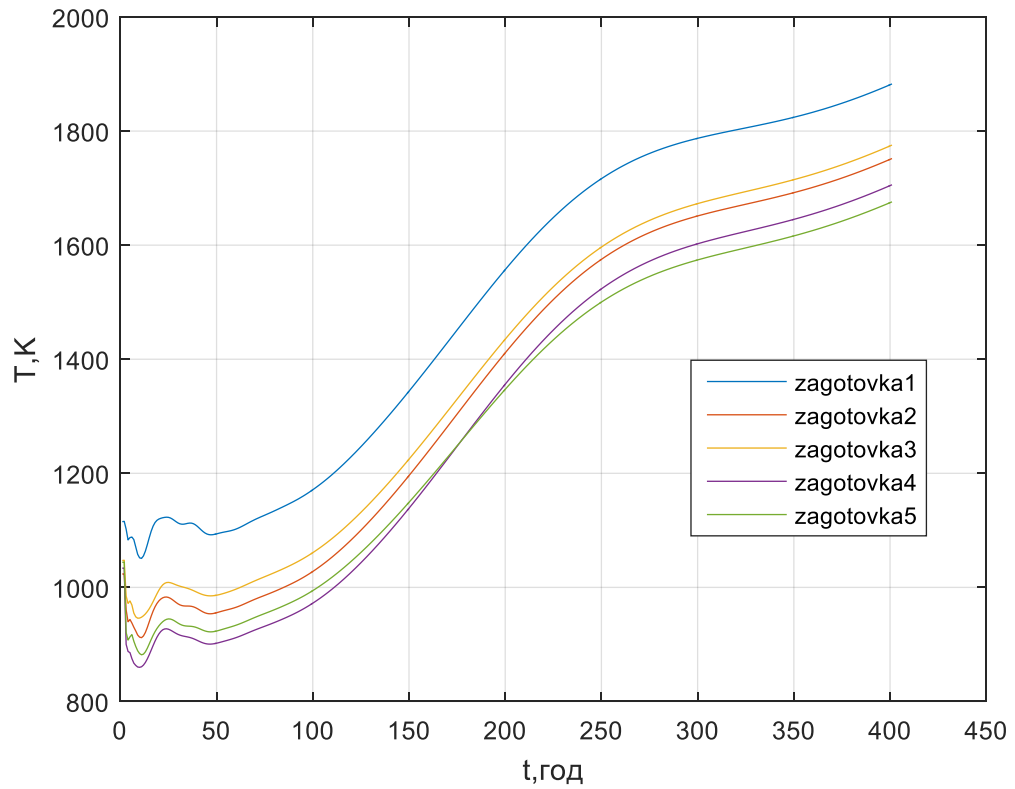


Рис. 2.3. Графік зміни температури заготовок при витраті природного газу 50 м³/год та температурі повітря 273 К.

На даному графіку відображено зміну температури заготовок залежно від витрати природного газу та початкової температури повітря на вході.

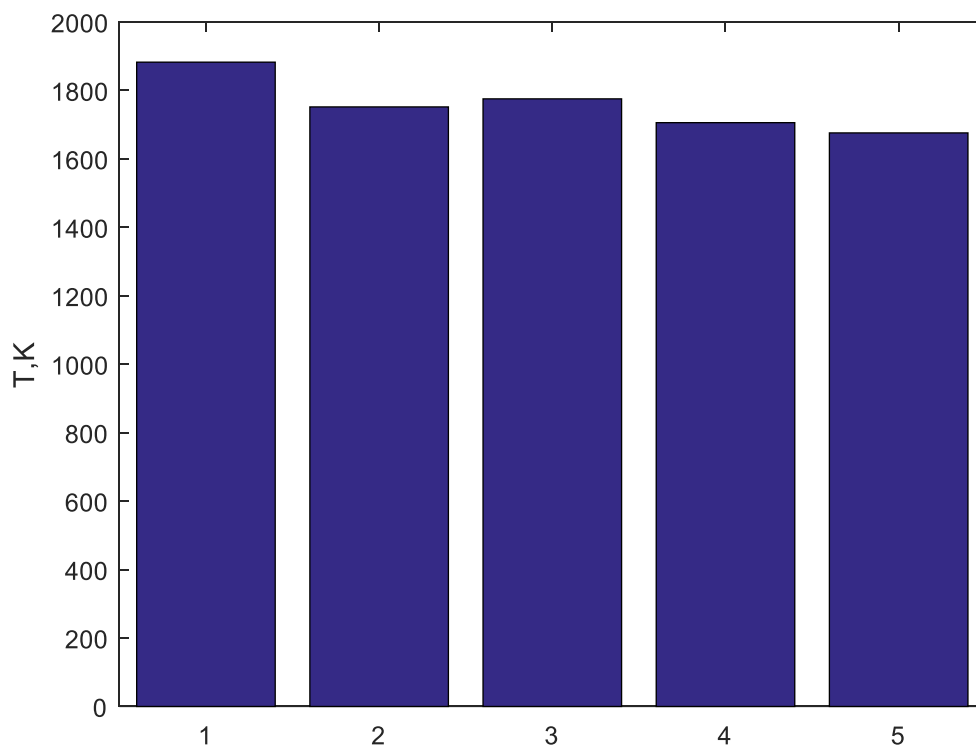


Рис. 2.4. Діаграма кінцевих температур заготовок при витраті природного газу 50 м³/год та температурі повітря 273 К.

Дана діаграма демонструє різницю кінцевих температур заготовок наприкінці процесу горіння в печі при витраті природного газу 50 м³/год та температурі повітря 273 К. Очевидно, найвища температура у першій заготовки – 1882 К. Різниця температур першої та останньої заготовки (кінцева температура 1676 К) сягає 206 К. Кінцева температура другої заготовки становить 1752 К, третьої – 1775 К, четвертої – 1706 К.

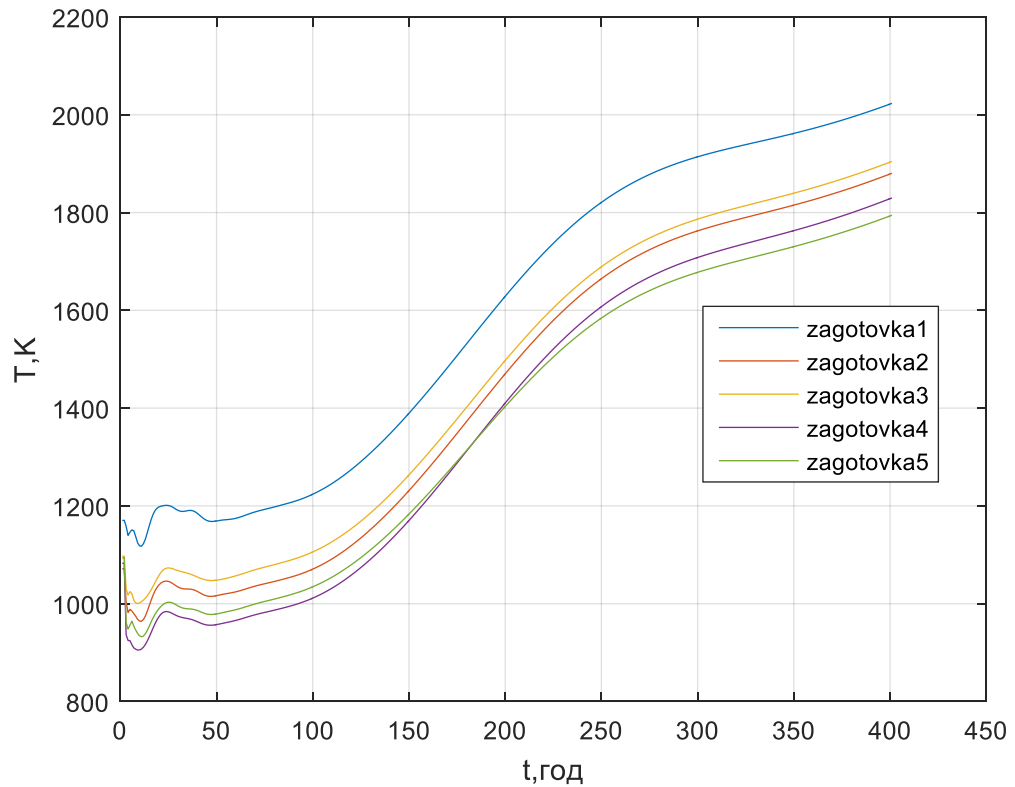


Рис. 2.5. Графік зміни температури заготовок при витраті природного газу $55 \text{ м}^3/\text{год}$ та температурі повітря 273 К .

Зображений графік відображає зміну температури заготовок залежно від витрати природного газу та початкової температури повітря на вході. У порівнянні з першим дослідженням температура заготовок впродовж усього процесу горіння значно зростає.

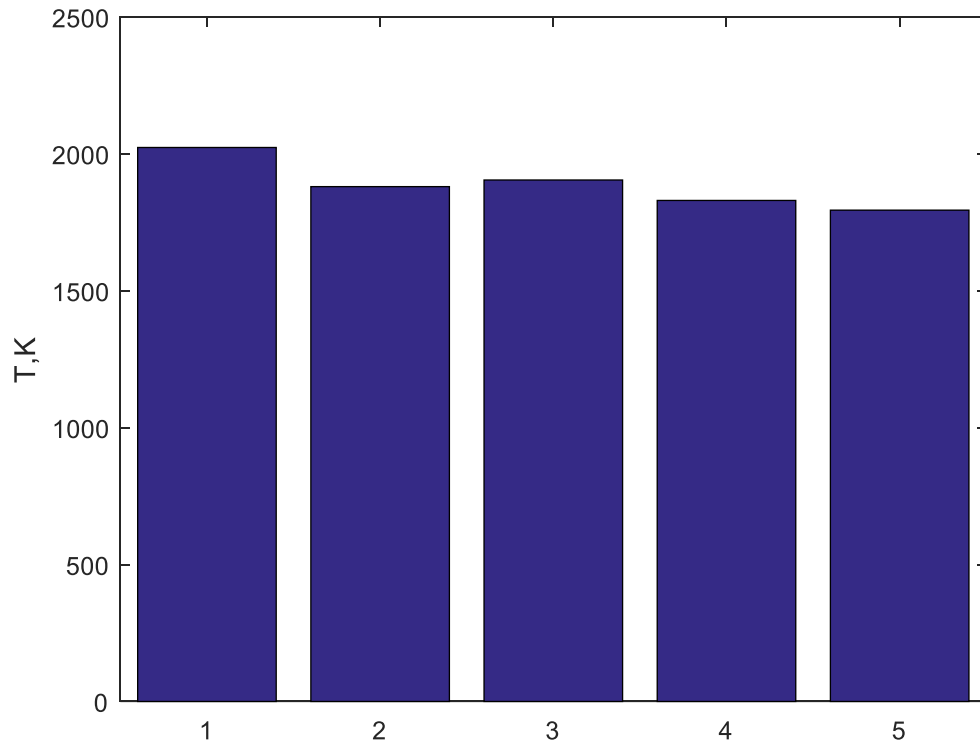


Рис. 2.6. Діаграма кінцевих температур заготовок при витраті природного газу 55 м³/год та температурі повітря 273 К.

Дана діаграма демонструє різницю кінцевих температур заготовок наприкінці процесу горіння в печі при витраті природного газу 55 м³/год та температурі повітря 273 К. Найвища температура у першій заготовці – 2023 К. Тобто порівняно з першим дослідженням температура зросла майже на 200 К. Різниця температур першої та останньої заготовки (кінцева температура 1794 К) сягає 229 К. Отже, різниця температур теж зростає. Кінцева температура другої заготовки становить 1880 К, третьої – 1904 К, четвертої – 1830 К.

Таким чином, при зростанні витрати природного газу на 5 м³/год температура заготовок порівняно з першим дослідженням зросла майже на 200 К.

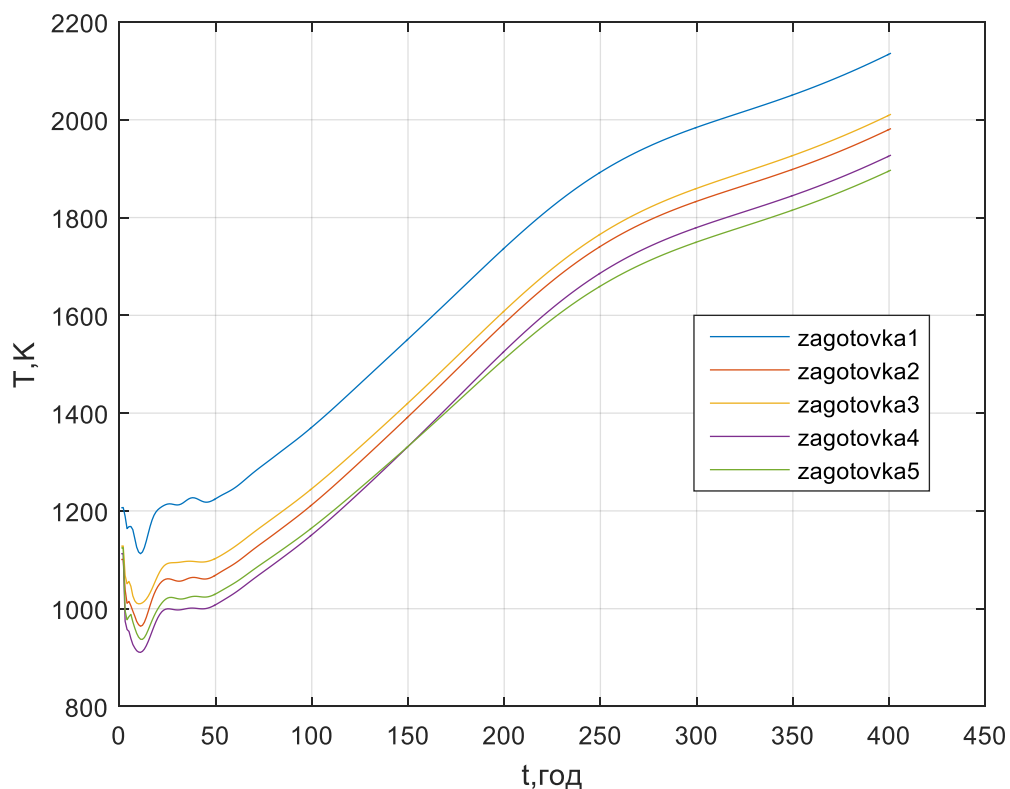


Рис. 2.7. Графік зміни температури заготовок при витраті природного газу $57 \text{ м}^3/\text{год}$ та температурі повітря 273 К .

Зображений графік відображає зміну температури заготовок залежно від витрати природного газу та початкової температури повітря на вході. У порівнянні з першим дослідженням температура заготовок впродовж усього процесу горіння значно зростає.

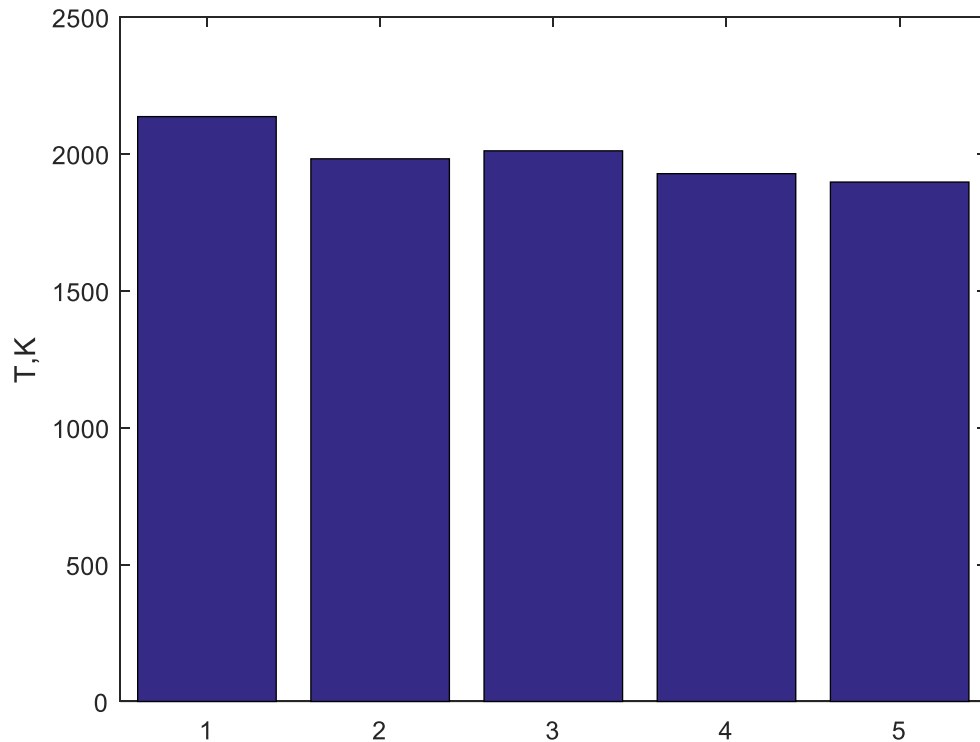


Рис. 2.8. Діаграма кінцевих температур заготовок при витраті природного газу 57 м³/год та температурі повітря 273 К.

Дана діаграма демонструє різницю кінцевих температур заготовок наприкінці процесу горіння в печі при витраті природного газу 57 м³/год та температурі повітря 273 К. Найвища температура у першій заготовці – 2136 К. Тобто порівняно з першим дослідженням температура зросла на 254 К. Різниця температур першої та останньої заготовки (кінцева температура 1897 К) сягає 239 К. Отже, різниця температур теж зростає. Кінцева температура другої заготовки становить 1982 К, третьої – 2011 К, четвертої – 1928 К.

Таким чином, при зростанні витрати природного газу на 7 м³/год температура заготовок порівняно з першим дослідженням зросла на 254 К, що вже негативно впливає на якість самого процесу випалювання, адже значно зростає температурний діапазон.

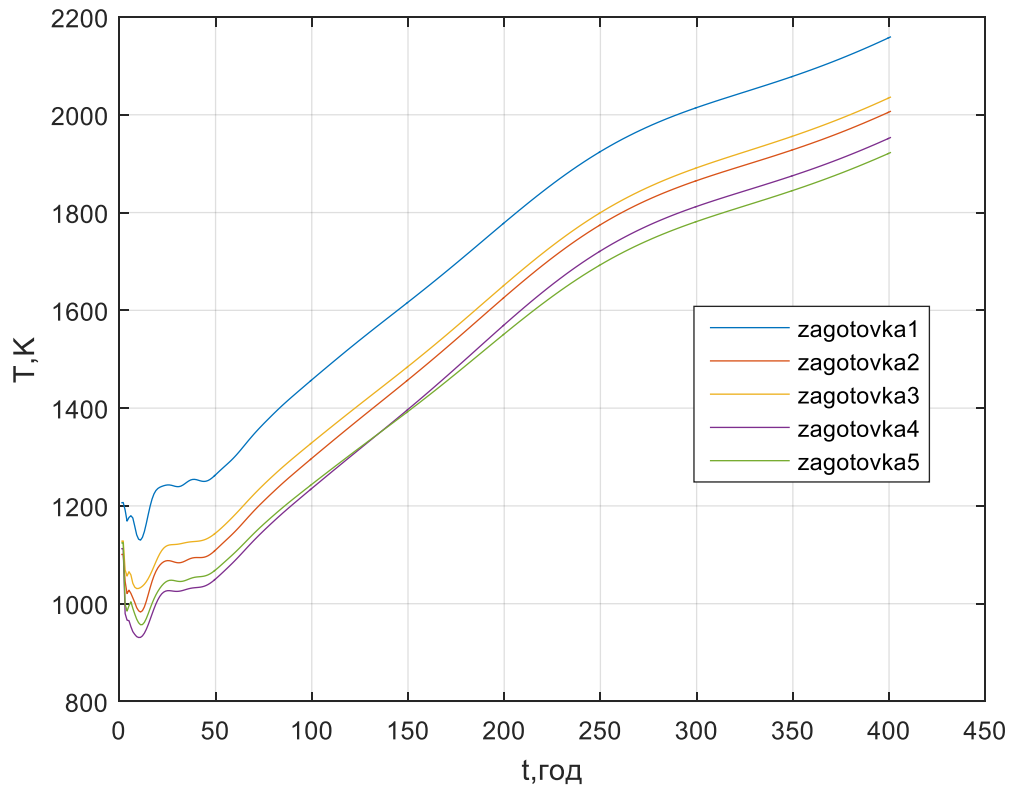


Рис. 2.9. Графік зміни температури заготовок при витраті природного газу $57 \text{ м}^3/\text{год}$ та температурі повітря 283 К .

Зображений графік відображає зміну температури заготовок залежно від витрати природного газу та початкової температури повітря на вході. При збільшенні початкової температури повітря на 10 К спостерігається незначне підвищення температури заготовок.

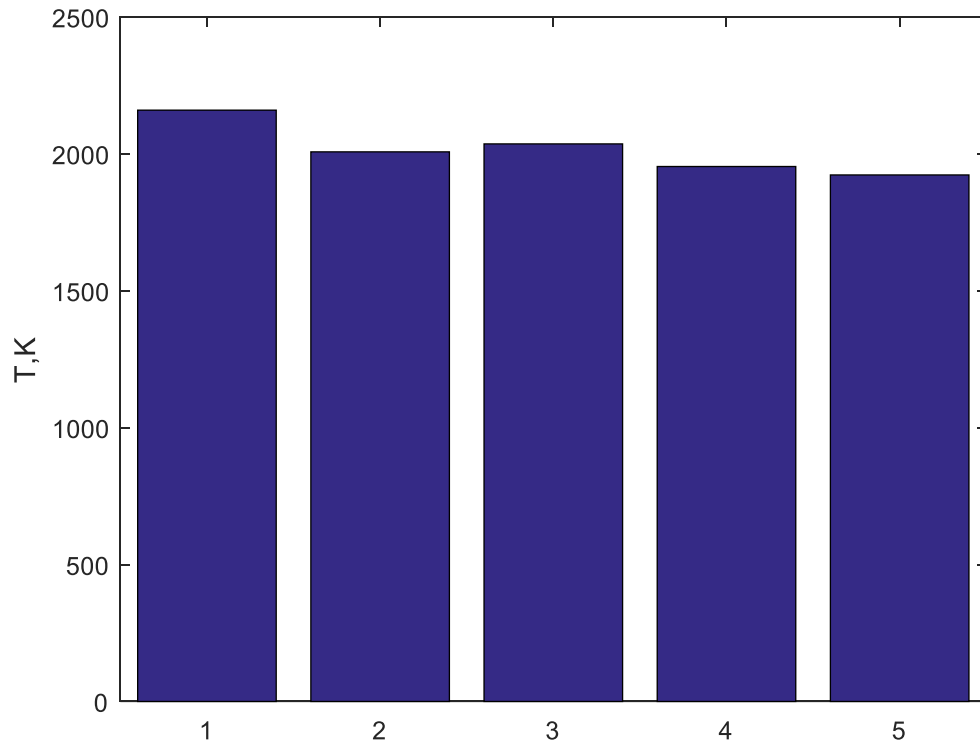


Рис. 2.10. Діаграма кінцевих температур заготовок при витраті природного газу 57 м³/год та температурі повітря 283 К.

Дана діаграма демонструє різницю кінцевих температур заготовок наприкінці процесу горіння в печі при витраті природного газу 57 м³/год та температурі повітря 283 К. Найвища температура у першій заготовці – 2159 К. Тобто порівняно з останнім дослідженням (при умовах витрати природного газу 57 м³/год та температури повітря 273 К) температура зросла на 23 К. Різниця температур першої та останньої заготовки (кінцева температура 1923 К) сягає 236 К. Отже, різниця температур теж зростає. Кінцева температура другої заготовки становить 2007 К, третьої – 2036 К, четвертої – 1954 К.

Таким чином, при зростанні початкової температури повітря на 10 К температура заготовок порівняно з минулим дослідженням зросла на 23 К.

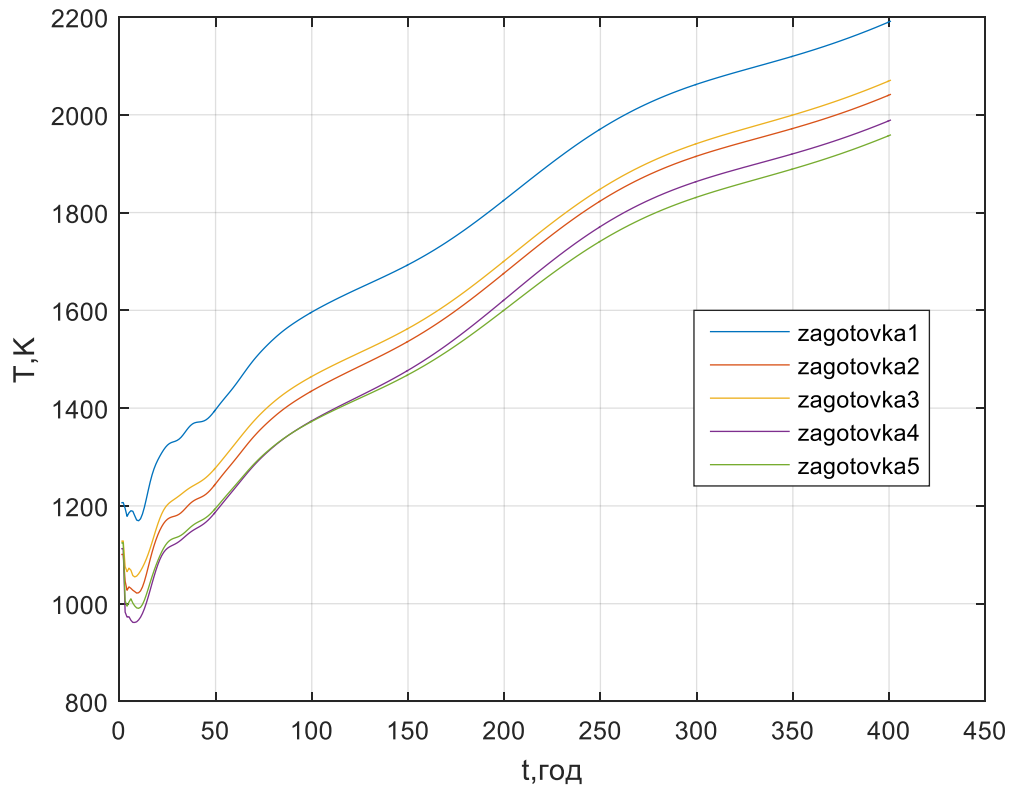


Рис. 2.11. Графік зміни температури заготовок при витраті природного газу $57 \text{ м}^3/\text{год}$ та температурі повітря 293 К .

Зображений графік відображає зміну температури заготовок залежно від витрати природного газу та початкової температури повітря на вході. При збільшенні початкової температури повітря ще на 10 К спостерігається також незначне підвищення температури заготовок.

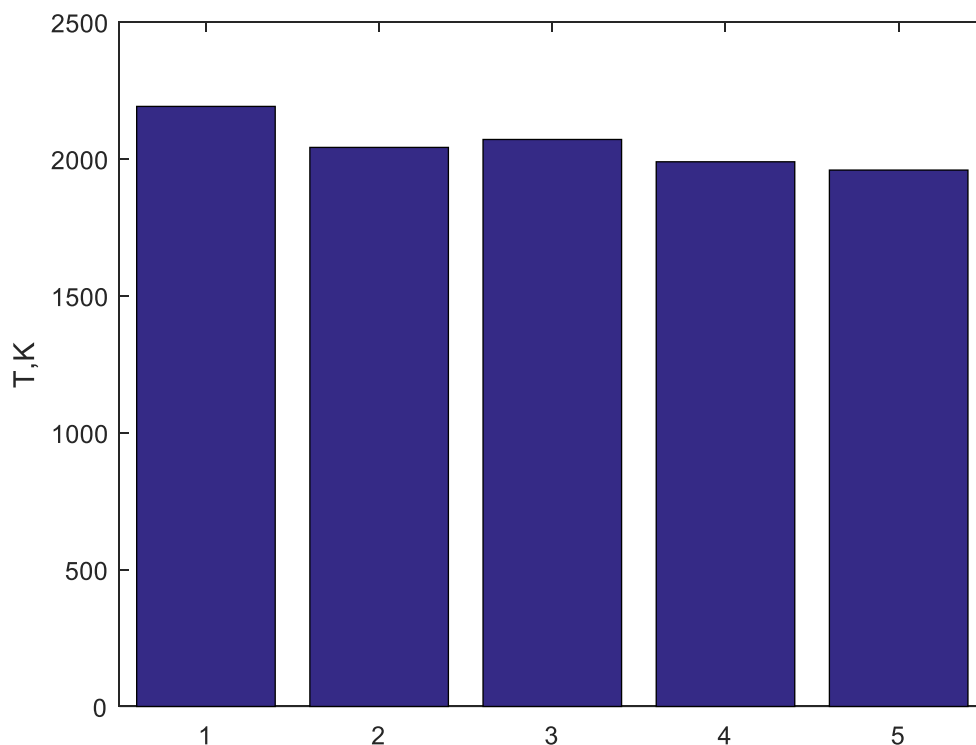


Рис. 2.12. Діаграма кінцевих температур заготовок при витраті природного газу 57 м³/год та температурі повітря 293 К.

Дана діаграма демонструє різницю кінцевих температур заготовок наприкінці процесу горіння в печі при витраті природного газу 57 м³/год та температурі повітря 293 К. Найвища температура у першій заготовці – 2191 К. Тобто порівняно з останнім дослідженням (при умовах витрати природного газу 57 м³/год та температури повітря 283 К) температура зросла на 32 К. Різниця температур першої та останньої заготовки (кінцева температура 1959 К) сягає 232 К. Отже, різниця температур теж зростає. Кінцева температура другої заготовки становить 2042 К, третьої – 2071 К, четвертої – 1989 К.

Таким чином, при зростанні початкової температури повітря на 20 К температура заготовок порівняно з першим дослідженням зросла на 55 К.

Проаналізувавши дане дослідження, можна зробити висновок, що найкращими умовами для якісного перебігу процесу горіння є витрата природного газу 50 м³/год та початкова температура повітря 273 К. В усіх

наступних випадках спостерігається значне підвищення температури заготовок, що негативно відображується на процесі. Підвищення витрати природного газу на 7 м³/год призводить до збільшення температури заготовок порівняно з першим дослідженням на 254 К. З іншого боку, підвищення початкової температури повітря на 20 К зумовлює зріст температури заготовок на 55 К, тобто незначно впливає на сам процес горіння.

2.5. Висновки до розділу.

Зважаючи на складний процес теплообміну, гідродинамічні процеси при горінні природного газу, великі розміри і ін., багатоканальні печі є досить складним об'єктом для математичного моделювання фізичних полів, що протікають під час процесу випалювання. Це в основному і визначає те, що кількість робіт присвячених вирішенню цієї проблеми в літературних джерелах є дуже обмеженою.

У печах випалювання відбувається процес турбулентного горіння природного газу на етапі «камера під вогнем» без попереднього змішування з окислювачем і, тому може бути описаний схожими математичними моделями, розробленими для іншого промислового устаткування.

Виконавши аналіз проведеного дослідження, можна зробити висновок, що найкращими умовами для якісного перебігу процесу горіння є витрата природного газу 50 м³/год та початкова температура повітря 273 К. В усіх наступних випадках спостерігається значне підвищення температури заготовок, що негативно відображується на процесі. Підвищення витрати природного газу на 7 м³/год призводить до збільшення температури заготовок порівняно з першим дослідженням на 254 К. З іншого боку, підвищення початкової температури повітря на 20 К зумовлює зріст температури заготовок на 55 К, тобто незначно впливає на сам процес горіння.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		48

3.СИСТЕМИ КЕРУВАННЯМ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЮВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ.

3.1.Аналіз існуючих систем керування.

Процес випалювання вуглецевих виробів у печі надзвичайно енергоємний, а існуючі способи керування процесом не дозволяють суттєво знизити непродуктивні витрати палива.

Мінімізація ж енерговитрат забезпечує стабільну якість кінцевої продукції (міцність, термічна і хімічна стійкість, висока електропровідність продукції) та інші техніко-економічні показники процесу випалювання (таких як тривалість кампанії, собівартість виробництва тощо).

Для вирішення проблеми ефективності виробництва і низької точності регулювання температури традиційної закритої дифузійної печі, у роботі [16] представлена система контролю температури даної печі. Система використовує ПІД-каскадний алгоритм управління з оцінкою попередньої компенсації для досягнення контролю температури печі і забезпечення однорідності і стабільності температури, щоб забезпечити рівномірність дифузії легуючої домішки. Результати моделювання перевіряють ефективність алгоритму управління, а практичні експерименти доводять доцільність системи контролю температури.

Недоліком даної системи є значна різниця точок температурного поля випалювальних виробів. Причинами, що викликають відмінність температурних кривих, можуть бути вплив повітряної маси на вхід печі, а також перепади температури (на початку процесу температура становить 500 °С, а потім – 800 °С, після стабільної температури при 800 °С знову виникають температурні коливання, що викликає флуктуацію повітря).

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		49

У роботі [17] представлена модель нагрівальної печі у процесі безперервного випалювання для використання при проектуванні систем самонастроювання. З перших принципів впливає спрощена математична модель. Параметри моделі рекурсивно оцінюються за допомогою алгоритму, який називається рекурсивною оцінкою параметрів з коефіцієнтом забування змінного вектору (REVVF).

Розроблено алгоритм REVVF для таких випадків, коли деякі знання про мінливість параметрів можна отримати заздалегідь. Представлена тут система управління температурою смуги є ієрархічною. Верхній рівень називається «оптимальним контролем попереднього перегляду», який виконує попередній контроль. Він переглядає наближення зміни налаштування, яке є зміною розміру смуги або еталонної температури, і оптимізує швидкість лінії і траєкторію температури смуги. Далі, нижній рівень називається «контроль відстеження температури», який виконує замкнуте управління, використовуючи вищевказану траєкторію як контрольний об'єкт. На цьому рівні було вперше застосовано узагальнене керування самонастроюванням полюсів; пізніше було введено узагальнене керування самонастройкою. Ці методи контролю застосовувалися з деякими практичними змінами і з вищезазначеним REVVF. Контроль успішно працює на декількох реальних підприємствах.

У статті [18] представлений досвід створення АСУ ТП випалювання електродної продукції. Описано структура і функції системи, що експлуатується на Новочеркаському електродному заводі. Впровадження АСУ ТП дозволило підвищити якість електродної продукції та скоротити витрату палива на процес випалювання. Основними цілями розробки та впровадження відповідної системи управління були наступні:

- значне підвищення точності дотримання режиму нагріву заготовок;
- забезпечення рівномірного розігріву камер печі;
- скорочення витрати дорогого палива;

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		50

- зменшення впливу «людського фактора» на результати технологічного процесу.

Система управління обпалювальної піччю має трьохрівневу ієрархічну структуру.

Нижній рівень системи представлений пристроями польовий автоматики і МРРГ-02. До пристроїв польовий автоматики для кожної з тридцяти камер печі відносяться термопари і перетворювачі сигналу температури, клапани імпульсної подачі газу на пальники, іонізаційні датчики і УЗПФ.

Середній рівень системи управління призначений для перетворення сигналів в цифрову форму, збору даних з пристроїв МРРГ-02 і вироблення керуючих впливів для камер печі. Апаратно середній рівень представлений промисловим контролером, побудованим на базі обладнання фірми Advantech.

Верхній рівень системи управління призначений для подання керуючої і вимірювальної інформації, зберігання історії проведення циклу випалювання і протоколювання його результатів.

Впровадження принципово нового способу спалювання газу дозволило отримати його економію в межах 50-80% в порівнянні з печами, що працюють за старою технологією. крім того, впровадження АСУ ТП випалювання електродної продукції дозволило дотримуватися графіка підйому температури при випалюванні заготовок з точністю ± 2 °С; вести електронну паспортизацію електродної продукції на етапі випалювання.

Однак дана система має низку недоліків, а саме не використання при управлінні подачею газу таких технологічних параметрів, як розрідження в хвостовій (останньої в системі вогню) камері, температура газів, що відходять, тиск в магістралі подачі природного газу на рампу.

3.2. Функціональна схема автоматизації процесу випалювання вуглецевих виробів.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		51

Схема автоматичного контролю одержання стиролу включає в себе ряд контурів контролю і сигналізації.

До контурів контролю входять контури контролю витрати, тиску та температури.

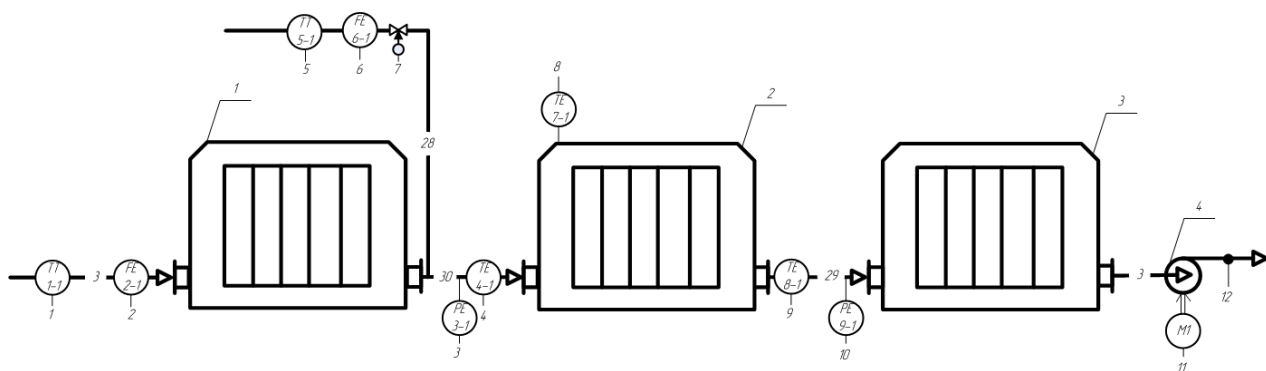


Рис.3.1. Функціональна схема автоматизації процесу.

Контур 1 здійснює контроль температури повітря на вході до камери охолодження, контур оснащений технологічною сигналізацією, що складається з термоперетворювача опору типу ТСМУ-1187 з уніфікованим вихідним сигналом (1-1); автоматичного показувального і реєструвального вторинного приладу з вмонтованим пристроєм, що має функцію сигналізації (1-2).

Контур 2 застосовують для контролю витрати повітря на вході до камери охолодження, який включає витратомір – діафрагма камерна (2-1); тензоперетворювач тиску з квадратичною функцією перетворення (2-2); автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад з вмонтованим пристроєм, що має функцію сигналізації (2-3).

Контур 3 розроблено для контролю та регулювання тиску повітрягазової суміші на виході з камери охолодження, який включає високотемпературний оптичний датчик Wave-Phire (3-1); прилад вторинний пневматичний, показувальний, реєструвальний зі станцією керування та з вмонтованим пристроєм, що має функцію сигналізації(3-2).

Контур 4 здійснює контроль температури повітряногазової суміші на виході з камери охолодження, контур оснащений технологічною сигналізацією, що складається з термоелектричним перетворювачем типу НСХ А-1 ТВР-3488 з уніфікованим вихідним сигналом (4-1); автоматичного показувального і реєструвального вторинного приладу з вмонтованим пристроєм, що має функцію сигналізації (4-2).

Контур 5 розроблено для контролю та регулювання температури природного газу на вході до камери горіння, контур оснащений технологічною сигналізацією та містить термоперетворювач опору типу ТСМУ-1187 з уніфікованим вихідним сигналом (5-1); автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад з вмонтованим пристроєм, що має функцію сигналізації(5-2).

Контур 6 здійснює контроль витрати природного газу на вході до камери горіння та включає витратомір – діафрагма камерна (6-1); тензоперетворювач тиску з квадратичною функцією перетворення (6-2); регулятор мікропроцесорний восьмиканальний. Забезпечує сигналізацію та контроль (за допомогою датчиків з уніфікованим вихідним сигналом (6-3).

Контур 7 здійснює контроль температури повітряногазової суміші у камері охолодження, контур оснащений технологічною сигналізацією, що складається з термоелектричним перетворювачем типу НСХ А-1 ТВР-3488 з уніфікованим вихідним сигналом (7-1); автоматичного показувального і реєструвального вторинного приладу з вмонтованим пристроєм, що має функцію сигналізації (7-2).

Контур 8 здійснює контроль температури димових газів на виході з камери охолодження, контур оснащений технологічною сигналізацією, що складається з термоелектричним перетворювачем типу НСХ А-1 ТВР-3488 з уніфікованим вихідним сигналом (8-1); автоматичного показувального і реєструвального вторинного приладу з вмонтованим пристроєм, що має функцію сигналізації (8-2).

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		53

Контур 9 розроблено для контролю та регулювання тиску повітряногазової суміші на виході з камери охолодження, який включає високотемпературний оптичний датчик Wave-Phire (9-1); регулятор співвідношення пневматичний пропорційно-інтегральний (система СТАРТ) (9-2); перетворювач пневмоелектричний (9-3); прилад вторинний пневматичний, показувальний, реєструвальний зі станцією керування та з вмонтованим пристроєм, що має функцію сигналізації(9-4).

3.1. Синтез системи керування.

Провівши ідентифікацію даних за допомогою інтерактивного інструменту візуального моделювання *ident* (Matlab), отримали передавальні функції п'яти заготовок.

Перша заготовка:

$$W_1(s) = \frac{0.0039s^3 + 0.2423s^2 + 10.8363s + 86.4782}{0.00011s^3 + 0.0131s^2 + 0.3913s + 1}.$$

Друга заготовка:

$$W_2(s) = \frac{0.0026s^3 + 0.1630s^2 + 7.7887s + 79.6139}{0.00007s^3 + 0.0098s^2 + 0.3419s + 1}.$$

Третя заготовка:

$$W_3(s) = \frac{0.00105s^3 + 0.0816s^2 + 2.0047s + 17.1697}{0.00003s^3 + 0.0038s^2 + 0.0962s + 1}.$$

Четверта заготовка:

$$W_4(s) = \frac{0.001s^3 + 0.0416s^2 + 1.9567s + 15.4362}{0.00003s^3 + 0.0024s^2 + 0.07861s + 1}.$$

П'ята заготовка:

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		54

$$W_5(s) = \frac{0.00098s^3 + 0.0387s^2 + 1.8943s + 13.7683}{0.0003s^3 + 0.0019s^2 + 0.0391s + 1} .$$

Для подальшого дослідження системи керування було обрано ПІД-регулятор.

ПІД-регулятор подібний до системи із трьох паралельно включених ланок: пропорційної – з коефіцієнтом пропорційності k_p , інтегральної – з k_p/T_u та диференційної – з $k_p T_d$, де k_p – коефіцієнт пропорційності, T_u – час ізодрому, T_d – час диференціювання.

Відповідна передавальна функція ПІД-регулятора запишеться у вигляді

$$W(s) = k_1 + \frac{k_2}{s} + k_3 \cdot s .$$

Спочатку перехідного процесу регулятор поводить себе як П-регулятор, введення похідної для цієї стадії покращує якість перехідного процесу у САК з ПІД-регулятором. У подальшому по мірі затухання перехідного процесу, вплив похідної спадає і основну роль починає відігравати інтегральна складова (як у ПІ-регуляторі).

Введення у закон інтегральної складової призводить до того, що усталена похибка керування у системі дорівнює нулю, і система відноситься до класу астатичних, що свідчить про ефективність САК.

Створено систему керування з ПІД-регулятором процесом випалювання вуглецевих виробів за допомогою програмних засобів Simulink. Схему роботи системи відображено на рис. 3.2.

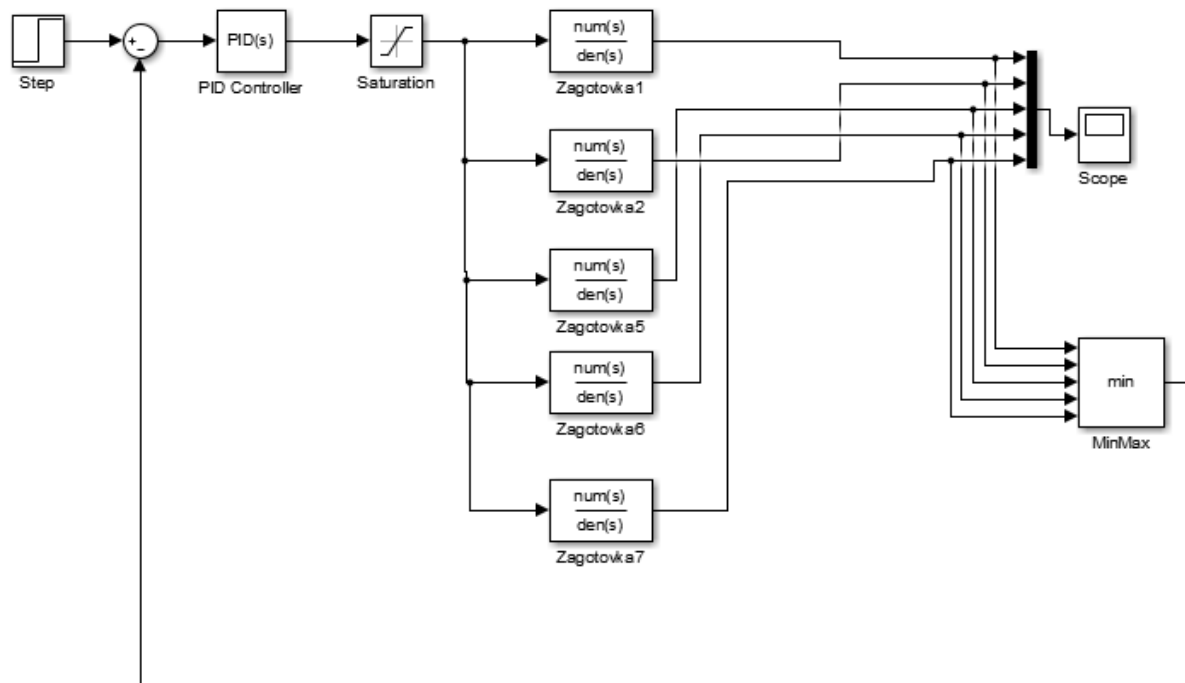


Рис. 3.2. Система керування з ПІД-регулятором зі зворотнім зв'язком по мінімальному значенню

Даний контур з ПІД-регулятором містить суматор, ПІД-регулятор, фізичне обмеження по витраті (витрата природного газу не може перевищувати 100 м³/год), об'єкт керування у вигляді передавальних функцій, блок, що реалізує мінімальне/максимальне значення. Блок обирає мінімальне значення та передає його на суматор з від'ємним значенням, звідти різниця сигналів надходить на ПІД-регулятор.

Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора здійснюється за допомогою вбудованих засобів Simulink, а саме блоку PID Controller. Цей інструмент автоматично робить підбір коефіцієнтів обраного типу регулятора, будує перехідну характеристику, а також показує формулу обраного регулятора.

Основною метою дипломного проекту є дослідження систем керування, що надають можливість підвищити стан керування температурним режимом у печі для отримання стабільно якісної кінцевої продукції. Для обґрунтування застосування тієї чи іншої системи керування потрібно провести порівняння якості перехідних процесів створених систем. Для

подальшого дослідження оберемо MPC-регулятор (даний блок міститься у бібліотеці Model Predictive Control Toolbox).

Регулятори з прогнозуючою моделлю можуть використовуватися для оптимізації робочих характеристик замкнутої системи з МІМО об'єктами управління за умови дотримання обмежень на вході і на виході. Регулятори з прогнозуючою моделлю можуть передбачати майбутні значення керованих сигналів і відповідно налаштовувати дії, що управляють, тому що регулятори такого типу формують вплив на підставі внутрішньої моделі об'єкта управління. Здатність моделювання процесів взаємодії часто дозволяє регуляторам з прогнозуючою моделлю перевершувати кілька контурів управління з ПДД-регуляторами, які потребують індивідуального налаштування і застосування інших технік для зменшення взаємовпливу контурів.

Принцип роботи MPC-регулятора:

- для спрощеної моделі об'єкта і початкових умов виконується прогнозування поведінки під дією керуючого сигналу на відрізку часу, що називається горизонтом прогнозу (Prediction Horizon);
- виконується оптимізація керуючого сигналу з врахуванням всього комплексу обмежень, що накладаються на керуючі та регульовальні змінні;
- на відрізку часу, що визначається одним кроком обрахунку та становить фіксовану малу частину горизонту прогнозу, названу горизонтом керування (Control Horizon), реалізується знайдене оптимальне керування;
- по закінченню інтервалу здійснюється вимірювання фактичного стану, який приймається за нові початкові умови;

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		57

- горизонт прогнозу зміщується на крок вперед, і знову повторюються попередні пункти.

Досліджувана система з MPC-регулятором складається з фізичного обмеження по витраті (витрата природного газу не може перевищувати 100 м³/год), об'єкта керування у вигляді передавальних функцій, блока, що реалізує мінімальне/максимальне значення та MPC-регулятора. Дана система зображена на рис. 3.3.

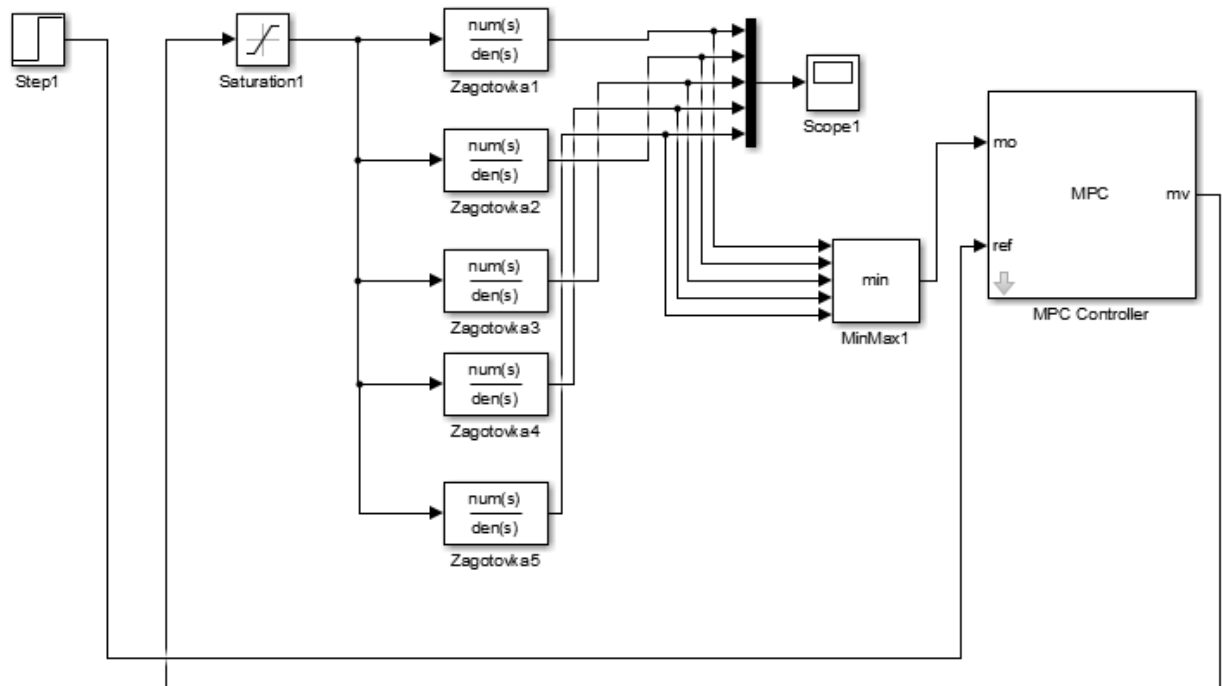


Рис. 3.3. Система керування з MPC-регулятором по мінімальному значенню

Розроблена вище система керування відрізняється від системи керування з ПІД-регулятором лише тим, що реалізована на базі MPC-регулятора.

Наведені вище дві системи керування по мінімальному значенню представляють собою керування SISO об'єктами, де з 5-ти виходів обирається мінімальний. Обрання мінімального сигналу, аргументується, тим

що при випалюванні необхідно, щоб всі заготовки досягли необхідної температури обробки. Зрозуміло, що через конструкційні та технологічні особливості апарату в різний момент часу температура в заготовках різна, відтак забезпечення досягання температури обробки всіма заготовками є важливим завданням.

При аналізі роботи реалізованих системи керування було отримано, що дані системи мають один значний недолік, а саме керування по мінімальному значенні може призвести до розтріскування найгарячіших заготовок при перерегулюванні, через недотримання технологічних обмежень.

Саме тому, пропонується розглянути процес випалювання вуглецевих виробів у вигляді МІМО об'єкта та керувати таким об'єктом за допомогою MPC-регулятора.

Відтак, об'єкт має п'ять виходів, температури в кожній із заготовок, що обробляються та одну керуючу дію – витрату палива. В даному випадку кожна заготовка розглядається як окрема складова одного об'єкта, при цьому керування всіма складовими об'єкта відбувається однією керуючою дією.

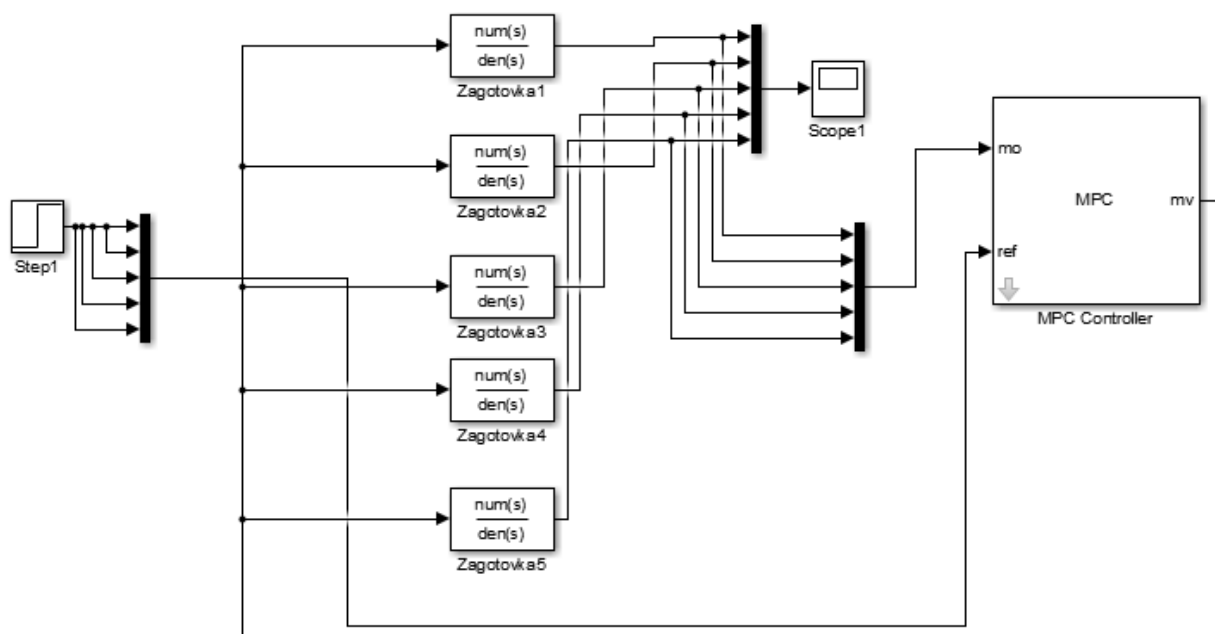


Рис. 3.4. Система керування з MPC-регулятором за п'ятьма виходами

3.4. Дослідження системи керування.

Дослідження систем керування відбувається шляхом порівняння результатів роботи розроблених систем. Оскільки етапові «камера «під вогнем»» передусе етап «нагрівання димовими газами», то початкова температура відмінна від нуля і для кожного з варіантів керування різна. Дослідження проводиться при початковій температурі повітря 273 К.

Результати роботи системи керування на базі ПІД-регулятора наведені на рис. 3.5.

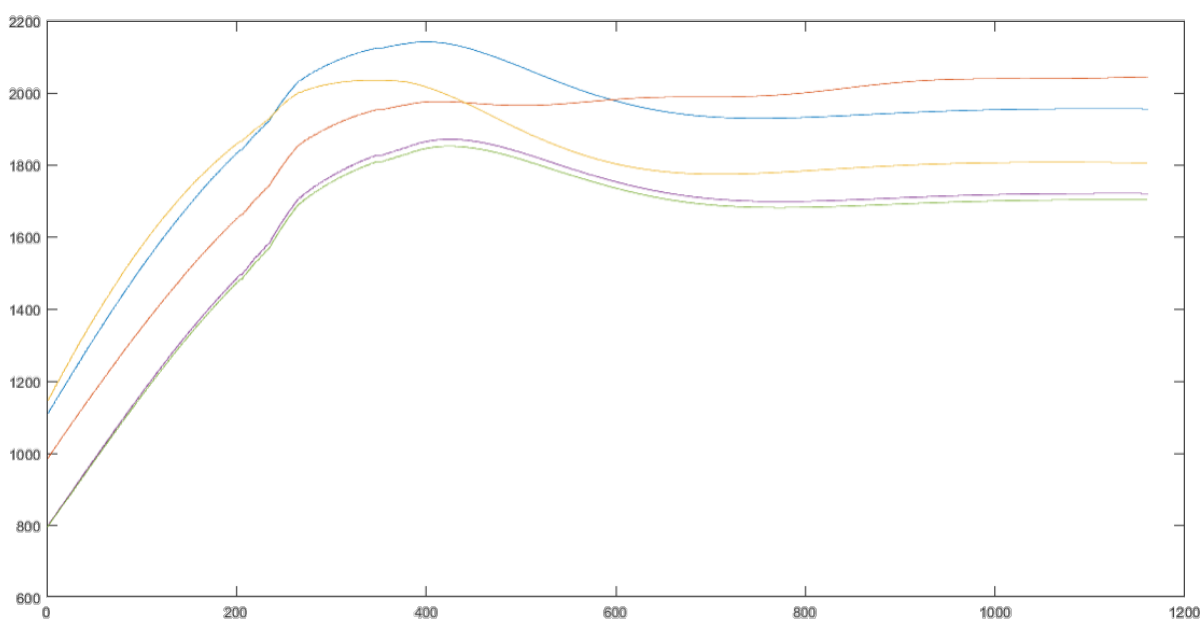


Рис.3.5. Результати роботи системи керування з ПІД-регулятором.

На гістограмі 3.6. наведено кінцеві значення температури по всім заготовкам наприкінці кампанії випалювання. З результатів видно, що найвища температура прослідковується в заготовці 2 та складає 2000 К, а найнижча температура проглядається у заготовці 5 та становить близько 1750 К. Очевидно, що такі перепади температур зумовлені конструкційними особливостями апарату.

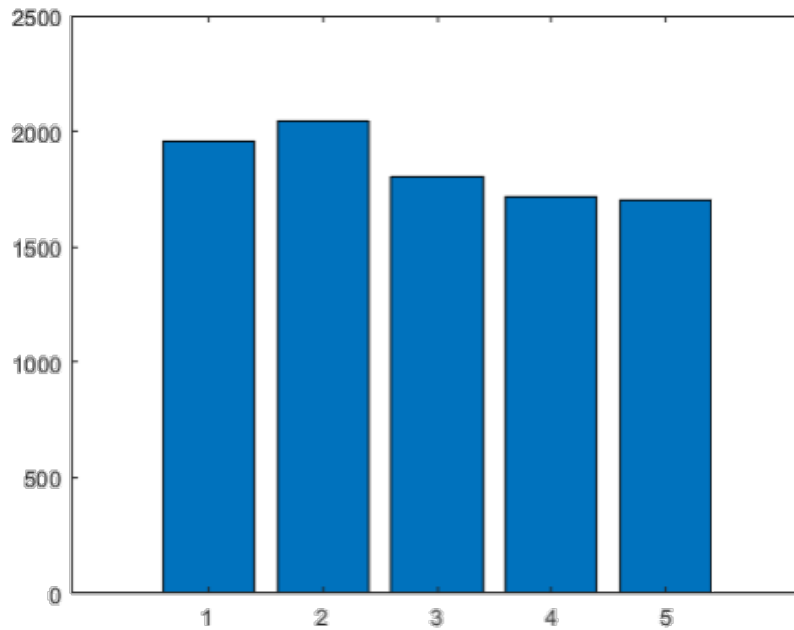


Рис. 3.6. Гістограма кінцевих значень температури по всім заготовкам при роботі системи з ПД-регулятором.

На рис. 3.7 наведено графік максимального перепаду температур по заготовкам. З результатів видно, що на початку прогріву перепад досягає свого максимального значення і в даному випадку становить 360 К, наприкінці складає 255 К.

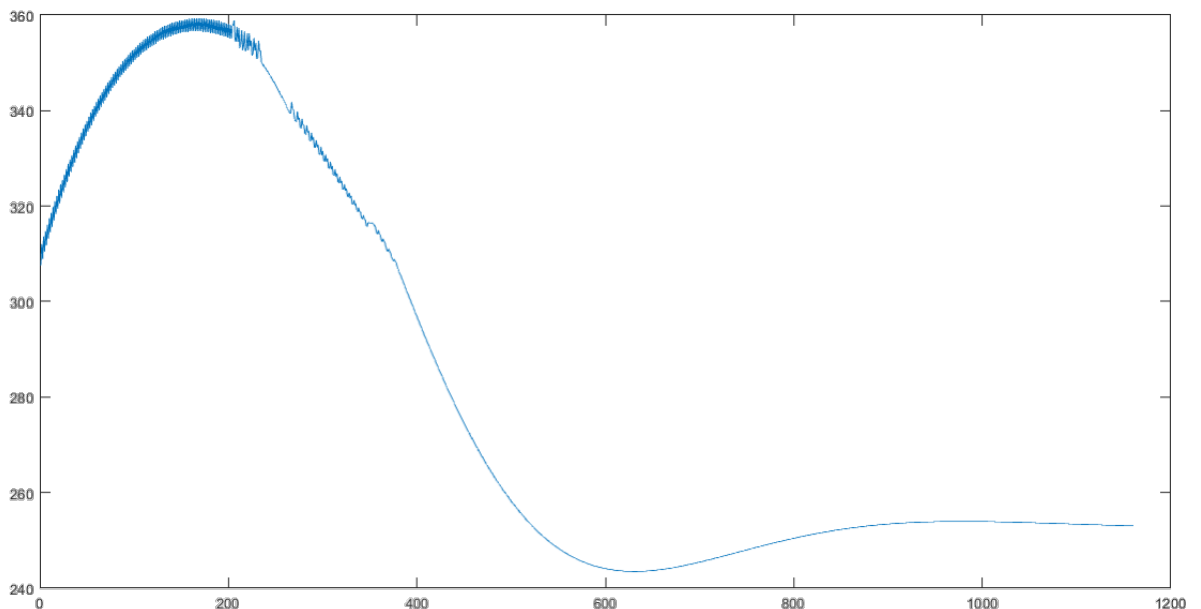


Рис. 3.7. Графік максимального перепаду температур по першій та п'ятій заготовкам.

Результати роботи системи керування на базі МРС-регулятора по мінімальному значенню наведені на рис. 3.8.

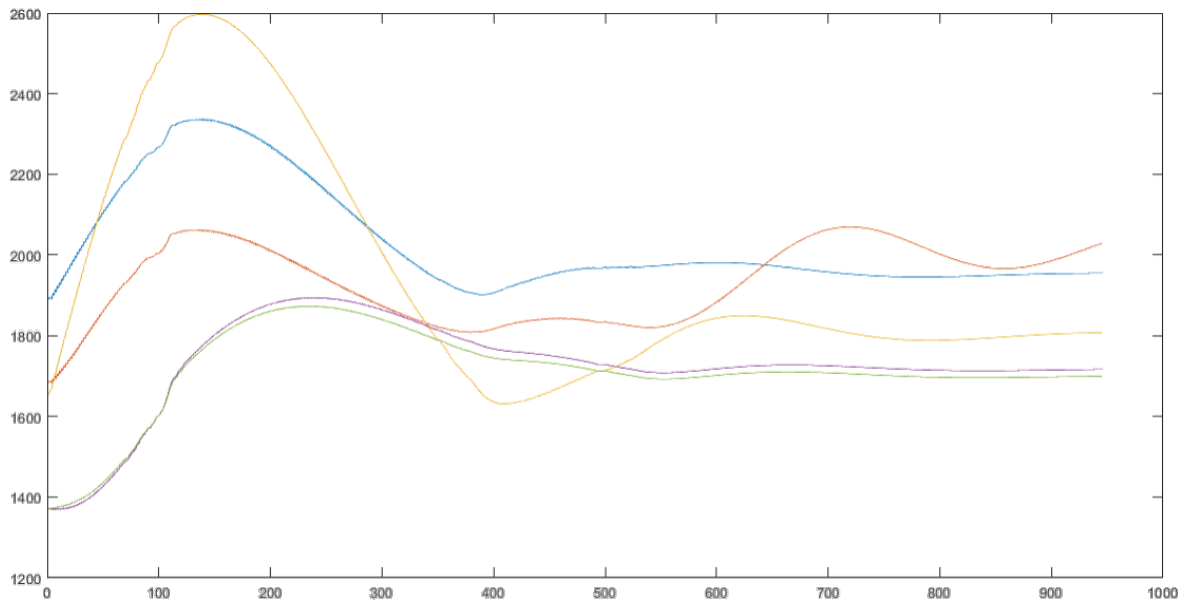


Рис.3.8. Результати роботи системи керування з MPC-регулятором по мінімальному значенню.

На гістограмі 3.9. подано значення кінцевих температур по всім заготовкам наприкінці кампанії випалювання вуглецевих виробів. З результатів видно, що найвища температура прослідковується в заготовці 2 та складає більше 2000 К, а найнижча температура проглядається у заготовці 5 та становить близько 1750 К. Очевидно, що такі перепади температур зумовлені конструкційними особливостями апарату.

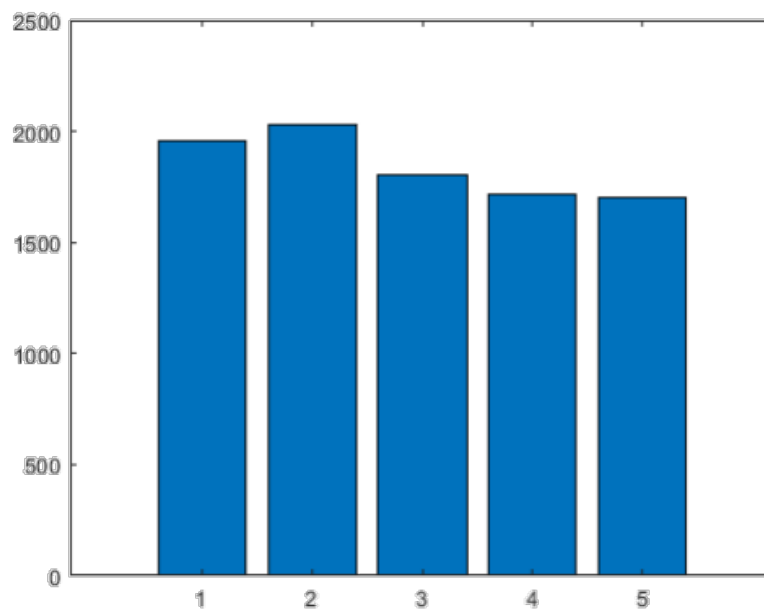


Рис. 3.9. Гістограма кінцевих значень температури по всім заготовкам при роботі системи з MPC-регулятором по мінімальному значенню.

На рис. 3.10. наведено графік максимального перепаду температур по заготовкам. Проаналізувавши результати, можна дійти висновку, що на початку прогріву перепад досягає свого максимального значення і в даному випадку становить 690 К, наприкінці складає близько 300 К.

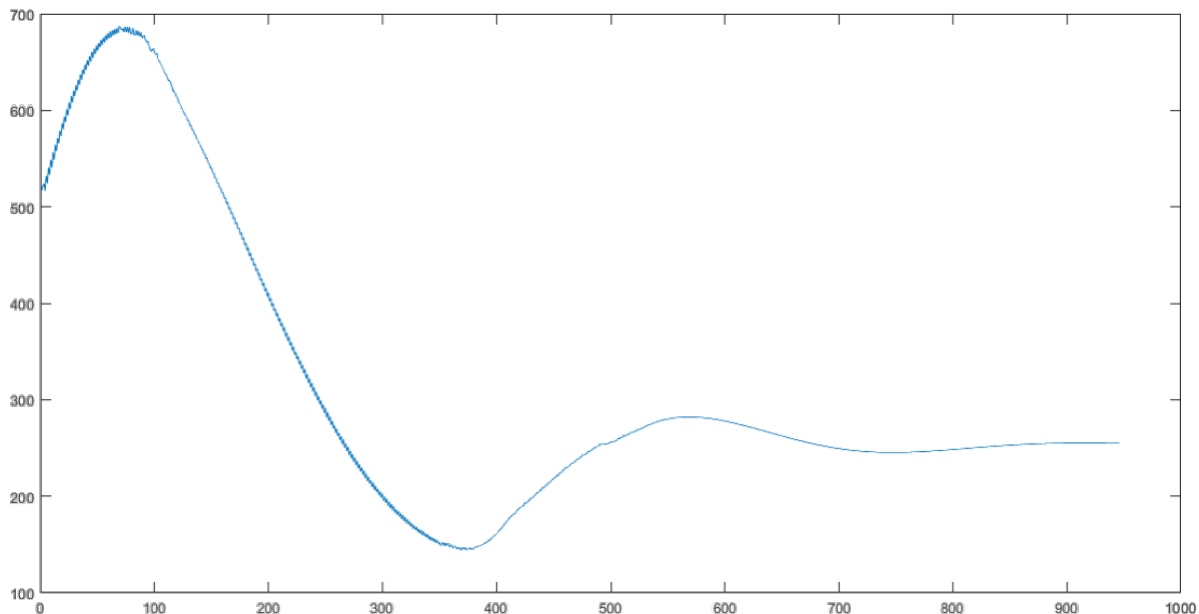


Рис. 3.10. Графік максимального перепаду температур по першій та п'ятій заготовкам.

Результати роботи системи керування на базі МРС-регулятора за п'ятьма виходами наведені на рис. 3.11.

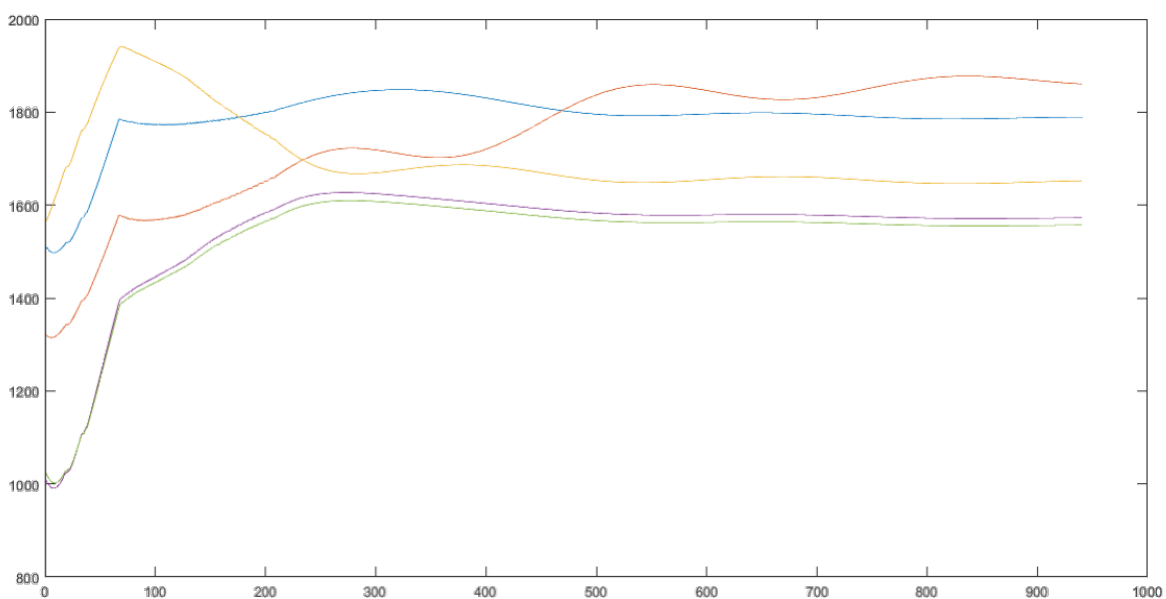


Рис.3.11. Результати роботи системи керування з МРС-регулятором за п'ятьма виходами.

На гістограмі 3.12. подано значення кінцевих температур по всіх заготовкам наприкінці кампанії випалювання вуглецевих виробів. З результатів видно, що найвища температура прослідковується в заготовці 2 та складає близько 1900 К, а найнижча температура проглядається у заготовці 5 та становить 1600 К. Очевидно, що такі перепади температур зумовлені конструкційними особливостями апарату.

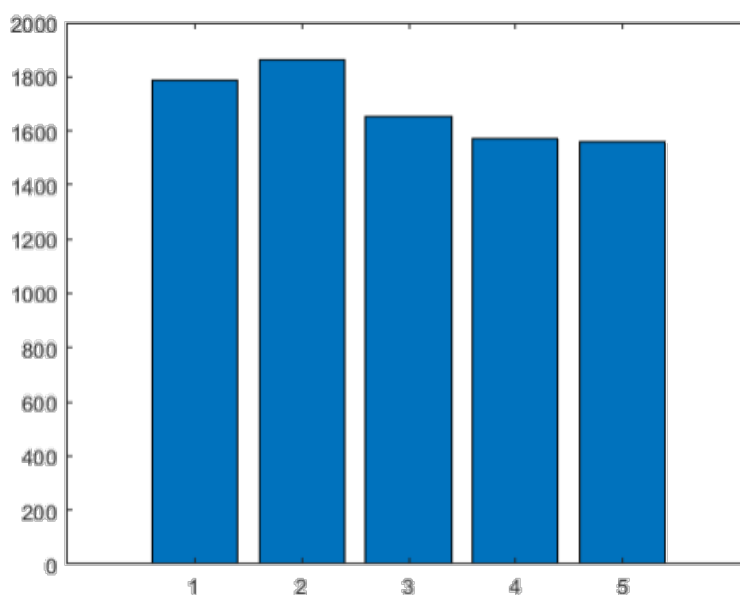


Рис. 3.12. Гістограма кінцевих значень температури по всіх заготовкам при роботі системи з МРС-регулятором за п'ятьма виходами.

На рис. 3.13. наведено графік максимального перепаду температур по заготовкам. Проаналізувавши результати, можна дійти висновку, що на початку прогріву перепад досягає свого максимального значення і в даному випадку становить 500 К, наприкінці складає близько 240 К.

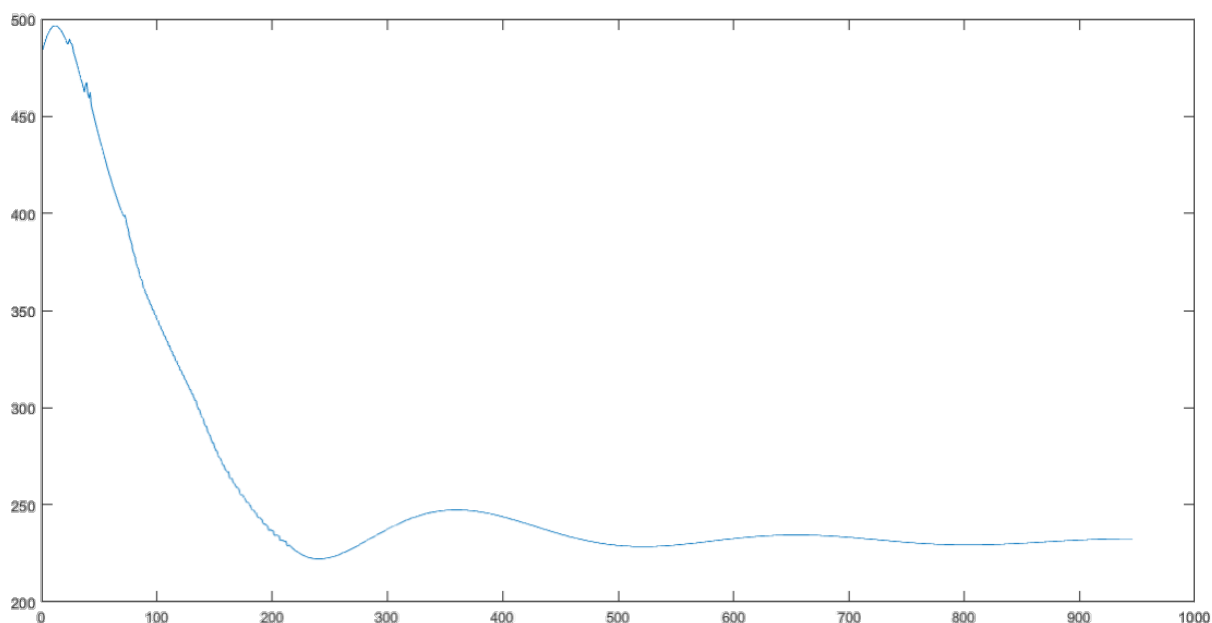


Рис. 3.13. Графік максимального перепаду температур по першій та п'ятій заготовкам.

3.5. Висновки до розділу.

Основною задачею дипломного проекту було дослідження різних систем керування, які дають можливість підвищити стан управління температурним режимом у багатоканальній печі випалювання.

Наведені вище дві системи керування по мінімальному значенню представляють собою керування SISO об'єктами, де з 5-ти виходів обирається мінімальний. Обрання мінімального сигналу, аргументується, тим що при випалюванні необхідно, щоб всі заготовки досягли необхідної температури обробки. Зрозуміло, що через конструкційні та технологічні особливості апарату в різний момент часу температура в заготовках різна, відтак забезпечення досягання температури обробки всіма заготовками є важливим завданням.

При аналізі роботи реалізованих системи керування було отримано, що дані системи мають один значний недолік, а саме керування по мінімальному значенні може призвести до розтріскування найгарячіших заготовок при перерегулюванні, через недотримання технологічних обмежень.

Саме тому, пропонується розглянути процес випалювання вуглецевих виробів у вигляді МІМО об'єкта та керувати таким об'єктом за допомогою МРС-регулятора.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗ ДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.3	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		66

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

1) Відповідно до закону України «Про охорону праці», підприємство зобов'язане забезпечити всім працюючим на ньому безпечні та нешкідливі умови праці і несе відповідальність за шкоду, заподіяну їх здоров'ю та працездатності. Забезпечення безпеки праці реалізується як при проектуванні технологічних процесів, так і при їх впровадженні.

Вірно виконані заходи з охорони праці та навколишнього середовища при незначних додаткових затратах на них, в порівнянні з витратами на будівництво всього об'єкту, надійно захищають його, людей, котрі на ньому працюють, а також підвищують експлуатаційні показники при зменшенні шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Для подальшого вдосконалення умов праці необхідно покращити якість контролю виконанням вимог діючих норм стандартів, правил, інструкцій та інших документів з техніки безпеки, що підлягають виконанню в процесі проектування.

2) Відповідно до теми дипломного проекту «**Автоматизація процесу випалювання вуглецевих виробів**» в даному випадку розглядається процес формування вуглецевих виробів. Він є максимально автоматизованим. Це дозволяє знизити кількість працюючих робітників безпосередньо в цеху ($S = 2700 \text{ м}^2$, $V = 48600 \text{ м}^3$), що, в свою чергу, знижує робочий травматизм.

Контроль параметрів технологічного процесу здійснює оператор, пульт якого знаходиться у виробничому приміщенні площею $S = 40 \text{ м}^2$ та об'ємом $V = 120 \text{ м}^3$.

Шкідливими і небезпечними виробничими факторами при роботі і обслуговуванні обладнання являються:

- ураження електричним струмом;
- виробниче освітлення;
- виробничий шум і вібрації;

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		67

— повітря робочої зони.

Перед початком роботи необхідно перевірити:

— робоче місце, яке утримується в чистоті та порядку;

— справність обладнання та його механізмів;

— наявність та справність огорожень;

— справність електрообладнання, відсутність пошкоджених зовнішніх проводів;

— наявність та справність заземлення обладнання;

— справність витяжної вентиляції, підключеної до установки;

— справну роботу аварійної кнопки, “СТОП” та блокувальних пристроїв.

4.1. Електробезпека.

1. Приміщення операторської з точки зору безпеки враження людини електричним струмом у відповідності з ПУЕ-76 відноситься до класу 1 (без підвищеної безпеки). Умови, що визначають клас даного приміщення – це наявність струмопровідних підлог, перекриттів, наявність електродвигунів.

2. На пульті управління оператора напруга $U = 220/380$ В, частота $f = 50$ Гц. Напруги, що використовуються в мережі: для пристроїв автоматизації та сигналізації; струм – перемінний;

Режим нейтралі – глухо-заземлений.

Тип електромереж - трьохфазна чотирьохпровідникова мережа із глухо-заземленою нейтраллю.

3. Можливі причини ураження людей електричним струмом:

— коротке замикання;

— відсутність або старіння ізоляції;

— неузгодженні включення/відключення обладнання;

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		68

— порушення наряду-допуску до ремонту електромереж.

4. Для забезпечення електробезпечності передбачені організаційні і технічні заходи:

— інструктаж і навчання безпечним методам праці;

— встановлення блокування безпеки та огорожі;

— встановлення плакатів і знаків безпеки;

— недоступність елементів установки, що знаходяться під напругою (кабелі вкладаємо в полівінілхлоридові труби, піддати захисту: недоступність кабелів на висоті $h_{\min} = 2,7-3$ м, застосування огорожувальних пристроїв);

— ізоляція струмопровідних частин пульта керування ($R \geq 0,5$ МОм). Електрична ізоляція – це шар діелектрика або конструкція, виконана з діелектрика, яким покриваються струмопровідні елементи або відділяються від інших конструктивних частин;

— електророзділення мережі за допомогою спеціальних роздільних трансформаторів;

— рубильники включення замкнені в спеціальних шафах, різні кольори пускового та робочого обладнання.

— при роботі з електроінструментом ($u \leq 42\text{В}$), застосовуються індивідуальні засоби захисту, такі як діелектричні рукавички і калоші, гумові килимки, ізольовані підставки.

До обслуговування електрообладнання допускаються особи, що склали кваліфікаційній комісії іспит з ПУЕ електроустановок будь-якого типу, а також пройшли відповідний інструктаж на робочому місці.

Під час роботи лінії забороняється виконувати ремонт, наладку та змащування частин, що рухаються, доторкатись до гарячих та рухомих частин, працювати при відкритих щитках та огороженнях.

В випадку якої-небудь небезпеки або поміченої несправності необхідно негайно зупинити установку натисканням аварійної кнопки “СТОП” та повідомити про це майстра.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		69

В аварійному режимі використовується пристрій занулення і захисне автоматичне відключення, відповідно до ГОСТ 12.1.030-81/91.

Розрахунок занулення приводиться для визначення сили струму та напруги, значення яких повинні бути безпечними для життя людини.

Вихідні дані: $U_{\phi}=220\text{В}$ – напруга фази, $R_0=0.1\text{ Ом}$. – опір заземлення нейтралі, $Z_0=0.2\text{ Ом}$. – опір заземлення корпусу.

Розрахунок:

Струм короткого замикання забезпечує спрацювання захисту:

$$I_3 = U_{\phi} / (R_0 + Z_0) = 220 / 0.3 = 733 \text{ А};$$

Напруга на корпусі:

$$U_k = I_3 \cdot Z_0 = 733 \cdot 0.2 = 146 \text{ В};$$

Так як напруга значна, то необхідно застосовувати нульовий захисний провідник.

Заземлення нейтралі знижує напругу до безпечного значення, у випадку замикання фази на землю:

$$U_k = I_3 \cdot R_0 = 220 \cdot / (0.1 + 100) = 2.2 \text{ В}$$

Застосувавши опір повторного захисного провідника знижуємо у випадку обриву нульового провідника напругу на корпусі по місцю обриву:

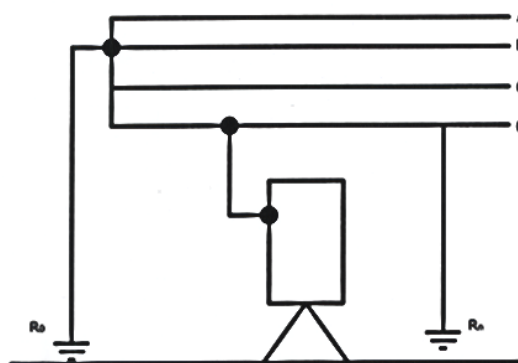


Рис. 4.1. Схема занулення електроустановки в трьохфазній мережі

4.2. Виробниче освітлення.

Виробництво, що розглядається потребує зорової уваги. В операторній використовуються лампи денного світла. В приладах використовується підсвічування шкали.

В цеху використовується змішаний тип освітлення (природне освітлення доповнюється штучним). Проектом передбачене робоче, евакуаційне, аварійне і ремонтне освітлення. Тип джерела світла для системи загального освітлення – лампа LED (виробник – АХІОМАenergy), потужність $W = 10$ Вт, потік $\Phi = 1000$ лм, термін служби – 25000 годин, кількістю 40 шт, так як висота цеху більше 10 метрів і доцільно використовувати цей тип лампи. Передбачається штучне освітлення у всіх приміщеннях і на всіх площадках установки, нормована освітленість повинна становити: комбінованого освітлення – $E_{\text{нор1}}=200$ лк, загального освітлення – $E_{\text{нор2}} = 150$ лк, фактична становить $E_{\text{фак}} = 240$ лк, що відповідає вимогам ДБН В 2.5.28 – 2006.

4.3. Виробничий шум та вібрація.

Джерелами шуму та вібрації в даному виробництві виступають електродвигуни. Шум класифікується як постійний. Рівень шуму – $L=100$ дБ, що не відповідає вимогам.

Оператор, що здійснює спостереження за технологічним процесом, знаходиться в операторній, в цьому приміщенні необхідно забезпечити рівень шуму згідно регламенту. Для зменшення виробничого шуму передбачено проведення наступних заходів:

— операторська повинна бути виконана цегляною кладкою, оштукатуреною з обох сторін ($\Delta L=15$ дБ).

— встановлення екранів, за допомогою футеровки корпусів двигунів і насосів ($\Delta L=15$ дБ).

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.3	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		71

- своєчасне змащування всіх поверхонь, що труться($\Delta L=6$ дБ).
- своєчасний ремонт всіх механічних вузлів за регламентом ($\Delta L=8$ дБ).

Фактичний рівень шуму – $L=60$ дБА, що відповідає вимогам згідно з ДСН 3.3.6.037-99.

Персонал необхідно забезпечити індивідуальними засобами захисту – протишумові навушники ПШН – Б та протишумові вкладиші «Беруши СТ – 1».

Технологічний об'єкт керування витримує рівень вібрації з частотою до 25Гц та з амплітудою не більш ніж 0.1мм.

Вібрації виникають внаслідок неточності установки обертаючих частин, нещільного з'єднання корпусів обертаючих частин до фундаменту.

Заходи проти вібрацій:

- обладнання лінії встановлено на фундаменти, маса яких набагато перевищує масу встановленого обладнання;
- використання гумових прокладок в якості амортизаторів;
- проектування додаткових ребер жорсткості.

Рівень технологічної вібрації у приміщенні не перевищує 90 дБ при частоті 4 Гц, що відповідає ДСН 3.3.6.039 – 99.

Для захисту рук від впливу загальної вібрації передбачене взуття на товстій гумовій підошві, відповідно до ГОСТ 12.4.002-74.

Для контролю рівня шуму і вібрації передбачений прилад ВШВ-003 і шумо-віброзамірний комплекс ШВК-1.

Сумарний час роботи в контакт з вібрацією не перевищує 2/3 робочої зміни. Тривалість неперервної дії вібрації не перевищує 15 – 20 хв. При такому режимі обідня перерва не менше 40 хвилин.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.3	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		72

4.4. Повітря робочої зони.

Робота оператора по обслуговуванню апарата відноситься до категорії легких робіт (категорія 1б) по ГОСТ 12.1.005-88, тому що вона проводиться сидячи, не потребує систематичного фізичного навантаження або підняття ваги.

Енерговитрати людини досягають 150 ккал/год(категорія робіт – легкі фізичні роботи (категорія Іб)).

Згідно з ГОСТ фізичні параметри умов відповідають нормам:

— температура, фактична допустима – 21...23°C (для холодного періоду року), 22...24°C (для теплого періоду року);

— відносна вологість – 40...60% (для холодного й теплого періодів року);

— швидкість руху повітря – 0,1 м/с(для холодного періоду року), 0,2 м/с (для теплого періоду року);

— у холодний період року, нагрівання помешкання відбувається батареями з теплоносієм водою, нагрітою до температури 50...60°C;

— у теплий час року – вентиляцією.

Умови повітря робочої зони відповідають ДСН 3.3.6.042-99.

Місце роботи оператора обладнано замкнутою системою вентиляції і кондиціонування, для яких використовуються осьові вентилятори Ц4-70.

Нижче наведені ГДК шкідливих речовин в повітрі робочої зони за ГОСТ 12.1.005-88/98 (у мг/м³):

Таблиця 4.1. Значення ГДК шкідливих речовин в повітрі робочої зони

Речовина	Значення ГДК, мг/м ³	Клас небезпеки
Аміак	20	IV
Оксид вуглецю	20	IV

Тому застосовується експрес-метод, який дозволяє з достатньою точністю визначати концентрацію шкідливих речовин, безпосередньо, на робочому місці. Суть його полягає в протягуванні певного обсягу повітря через контрольні трубки з індикаторним порошком, який реагує зміною кольору на вміст шкідливих речовин у повітрі. До приладів експрес-методу відносяться газоаналізатори: УГ-2; ГХ-100; ГХ-4 та ін. Метод безперервного автоматичного контролю застосовується на робочих місцях з постійним впливом шкідливих речовин, які можуть викликати серйозні порушення в стані здоров'я людей або привести до аварій за рахунок виникнення вибухонебезпечності та пожежонебезпеки. Контроль проводиться автоматизованими системами із записом змін шкідливостей в повітрі у часі із застосуванням газоаналізаторів: Сирена-2 для аміаку і т.д. У зв'язку з цим, цех поділу повітря постачається устаткуванням приточно-витяжної вентиляції.

Технічні засоби, що забезпечують безпеку органів дихання: респіратор газопилозахисний «Клен - ГП», та респіратор ШБ – 1 «Лепесток – 200».

4.4. Пожежна безпека.

Оскільки в процесі формування вуглецевих виробів приймають участь легкозаймисті речовини (кам'яно-вугільний пек), та відбувається процес прожарювання, то дане виробництво відноситься до категорії Б (вибухопожежонебезпечне). Клас вибухонебезпечної зони 2 (відповідно до ПУЕ).

Виходячи з категорії пожежної безпеки виробництва (категорія Б) визначаємо потрібну ступінь вогнестійкості будівлі – клас 2 (згідно з СНиП2.01.02-85).

На основі вибраної ступені вогнестійкості обираємо найменшу допустиму межу вогненебезпечності основних будівельних конструкцій.

Протипожежні перегородки виконуються з матеріалів, що не горять і мають спиратися на фундаменти, встановлюватися на всю висоту цеху. В залежності від категорії пожежної безпеки та ступені вогнестійкості будівлі

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		74

(А) визначаємо максимально допустиму відстань від найбільш віддаленого робочого місця до найближчого експлуатаційного виходу для об'єму приміщення 48600 м³ - при густині людського потоку в спільному проході до 1 чол/м - найбільш допустима відстань 40 метрів. Кількість евакуаційних виходів - 2. Ширину тамбурів евакуаційних виходів слід приймати більшу, ніж ширина дверних проходів на 0.5(по 0.25м з кожного боку): ширина дверей найменша - 0.8м, найбільша - 2.4м.

Вибираємо тип та кількість первинних засобів пожежогасіння: На 400-500м вуглекислотних вогнегасників - 2 (типу ручних: ВВБ-7, ВВ-8), пінні, хімічні, повітряно-пінні та порошкові вогнегасники - 4шт; бочка з водою та відро, ящики з піском, совкові лопати, протипожежні покривала. Також повинні бути передбачені вогнегасник – САМ-9 з установкою в місцях розположення ємностей та апаратів з ЛЗР, також передбачені щити з протипожежним інвентарем. Вогнегасники та пожежний інвентар мають червоне пофарбування, а бочки з водою та ящики з піском ще й відповідні написи білою фарбою. Пожежний інструмент фарбується в чорний колір. Бочки для зберігання води з метою пожежогасіння встановлюються у виробничому приміщенні. Такі бочки повинні бути укомплектовані пожежним відром місткістю не менше 8л. Ящики з піском місткістю 0,5, 1,0 та 3,0 м³ та повинні бути укомплектовані совковою лопатою. Протипожежні покривала, виготовлені з негорючого теплоізоляційного полотна, грубо бавовняної тканини повинні мати не менш як 2х1м та 2х2 м. Передбачена система виявлення пожежі та її гасіння. Система виявлення пожежі забезпечує відключення системи живлення та кондиціонування повітря.

По попередженню вибухів передбачене герметичне устаткування, автоматичні локальні засоби пожежогасіння. Приміщення відділені від цеху незгораючими перегородками з межею вогнестійкості 0.75 годин.

Це приміщення захищене від атмосферної електрики по категорії-1 згідно з СН-305-77.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		75

ВИСНОВКИ

При виконанні дипломного проекту було розглянуто технологічний процес випалювання вуглецевих виробів. Тема роботи: «Автоматизація процесу випалювання вуглецевих виробів».

В дипломному проекті було виконано ряд задач, на основі чого зроблено висновки до роботи:

1. Відповідно до технологічних вимог на основі опису технологічного процесу, розроблена функціональна схема автоматизації процесу випалювання вуглецевих виробів.

2. Для багатокамерної печі випалювання реалізована математична модель з розподіленими параметрами. Після ідентифікації отримано передатні функції по каналу «витрата палива – температура в заготовках».

3. Проведено дослідження різних режимів роботи печі при різних технологічних параметрах.

4. Синтезовано систему керування з різними типами регуляторів. На основі порівняльного аналізу показників якості перехідних процесів в системах з регуляторами зроблено рекомендації по їх застосуванню.

5. Надано рекомендації з охорони праці у процесі випалювання вуглецевих виробів, що відповідають чинному законодавству України.

					ДІП ЛА52.05.00.000 ПЗДІП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		76

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Красюков А. Ф.* Нефтяной кокс (Производство, свойства) : [изд. 2-е, доп. и перераб.] / А. Ф. Красюков — М. : Химия, 1966. — 277 с.
2. *Привалов В. Е.* Каменноугольный пек / В. Е. Привалов, М. А. Степаненко. — М. :Металлургия, 1981. — 208 с.
3. *Чалых Е. Ф.* Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий / Е. Ф. Чалых. — М. : Metallurgy, 1972. — 432 с.
4. Искусственный графит / [В. С. Островский, Ю. С. Виргильев, В. И. Кости-ков и др.]. — М. : Metallurgy, 1986. — 272 с.
5. Производство электродной продукции / [А. К. Санников, А. Б. Сомов, В. В. Ключников и др.]. — М. : Metallurgy, 1985. — 129 с.
6. *Сухоруков И. Ф.* Температурный график обжига заготовок в многокамер-ных печах /И. Ф. Сухоруков // Цветная металлургия. — 1963. — № 22.
7. Усовершенствование технологии обжига электродных материалов / В. П. Фокин, А. А. Малахов, С. А. Малахов [и др.] // Цветные металлы. — 2002. — № 4. — С. 48—51.
8. *Янко Э. А.* Аноды алюминиевых электролизеров / Э. А. Янко — М. : Изд. дом «Руда и металлы», 2001. — 670 с.
9. *Чалых Е. Ф.* Оборудование электродных заводов / Е. Ф. Чалых. — М. : Ме-таллургия, 1990. — 238 с.
10. Исследование обжига углеграфитовых заготовок / Молокова Т. Л., Хар-лампович Г. Д., Сухоруков И. Ф. // Химия твердого топлива. — 1977. — №6. — С. 114—120.
11. *Малахов С. А.* Совершенствование технологи обжига углеграфитовой продукции в многокамерных печах обжига закрытого типа: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. А. Малахов. — Владикавказ, 2004. — 30 с.
12. *Шибалов С. Н.* Совершенствование тепловых процессов с целью повыше-ния качества обжига заготовок из углеграфитовых материалов: автореф. дис.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		77

на соиск. учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.16.02 «Металлургия черных, цветных и редких металлов» / С. Н. Шибалов. — М., 2004. — 30 с.

13. *Poinsot T.* Theoretical and numerical combustion / T. Poinsot, D. Veynante. — 2nd ed. — Philadelphia : Edwards, 2005. — 522 p.

14. *Magnussen B. F.* On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion / B. F. Magnussen, B. H. Hjertager // In 16th Symp. (Int'l.) on Combustion. The Combustion Institute. — Pittsburgh, 1976 — P. 719—727.

15. Теплообмен в многокамерных печах обжига углеграфитовых изделий / [И. В. Пулинец, Е. Н. Панов, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека и др.]. — М. : Киев НТУУ «КПИ», 2014. — 175 с.

16. The Temperature Control System of Continuous Diffusion Furnace/ [Xianxin Ke, Zhitong Luo, Yujiao Zhu and Yang Liu], 2015.

17. Model-Based Control of Strip Temperature for the Heating Furnace in Continuous Annealing/ [Naoharu Yoshitani, Member, IEEE, and Akihiko Hasegawa]// IEEE Transaction on control system technology, vol. 6, n. 2, march 1998.

18. Система управления процессом обжига электродных материалов / [Станислав Сошкин, Александр Антонян, Геннадий Полторак, Николай Сорокин]// Цветные металлы. 2005. № 10.

					ДП ЛА52.05.00.000 ПЗДП ЛА52.05.00.000 ПЗ	Анк.
Зм.З	Анк.	№ докум.№	Підпис-	Да-		78

Специфікація устаткування, виробів та матеріалів

Додаток 1

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	Кількість, од.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Устаткування та прилади								
2-1	Витрата	Трубопровід, повітря		Трубопровід 3;	Діафрагма камерна, $P_u = 0,6$ МПа, внутрішній діаметр трубопроводів 100 мм, зовнішній діаметр трубопроводу 108 мм, граничнодопустима осн. похибка 1,5 %	ДКС 0,6–100	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ	2
6-1	Витрата	Трубопровід, природний газ		Трубопровід 28;				
2-2 6-2				Місцевий	Вимірювальний тензоперетворювач перепаду тиску з блоком добування квадратного кореня, $\Delta P_{\max} = 0,4$ МПа, температура 5...50 °С, матеріал мембрани – сплав 36НХТЮ, граничнодопустима основна похибка 0,25 %; $I_{\text{вих}} = 0...5$; 0(4)...20 мА, клас точності 0,1	Сапфір 22ДД 2450	ВАТ «Промприлад», м. Івано-Франківськ	2
2-3				Щит керування	Автоматичний показувальний і реєструвальний вторинний прилад з сигналізацією, $I_{\text{вх}}=0...5$ мА, 4...20 мА, клас точності 0,5, температура оточуючого повітря 5...50 °С, відносна вологість 80 % (при 25 °С), граничнодопустима основна похибка 0,25 %	ДИСК-250М	ЗАТ «Промышленная группа „Метран”», м. Челябінськ	1

Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата

ДП ЛА52.05.00.000

Арк.

78

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	Кількість, од.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Устаткування та прилади								
6-3				Щит керування	Регулятор мікропроцесорний восьмиканальний . Забезпечує сигналізацію та контроль (уніфікований вихідний сигнал). вихідні сигнали: <i>аналогові:</i> 0...5 мА, 0...20 мА, 4...20 мА, 0...10 В; <i>дискретні:</i> через транзистор – до 40 В, 100 мА; через реле – до 220В, 8 А. Основна зведена похибка вимірювання $\pm 0,2\%$. Інтерфейс RS-485	МТР-44	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ	1
1-1 5-1	Температура	Трубопровід, повітрягазова суміш		Трубопровід 30;	Термоперетворювач опору мідний з уніфікованих вихідним сигналом, НСХ 50М, ДВ (-50)...250 °С, $P_{\max} = 0,63$ МПа, довжина монтажної частини 120...2000 мм, клас допуску В; $I_{\text{вих}}=4...20$ мА	ТСМУ-1187	НВО «Електротермія», Приладобудівний з-д, м. Луцьк	2
4-1	Температура	Трубопровід, повітря		Трубопровід 3;	Термоелектричний перетворювач, НСХ А-1, діапазон вимірювання 0...2200 (2500) °С, захисна арматура – оксид берилію, довжина монтажної частини 500 мм; інерційність 30 с; клас допуску 2	ТВР-3488	НВО «Електротермія», Приладобудівний з-д, м. Луцьк	3
7-1	Температура	Камера печі, паливо	Камера печі;					
8-1	Температура	Трубопровід, димові гази	Трубопровід 29;					

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.05.00.000

Арк.

79

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	Кількість, од.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Устаткування та прилади								
3-1	Тиск	Трубопровід, повітрягазова суміш		Трубопровід 30;	Високотемпературний оптичний датчик. Діапазон вимірювання абсолютного тиску 1-25 бар, діапазон робочих температур - 40...1000°C, вологість 0-100%, до електромагнітних коливань не чутливий.	Wave-Phire	«ЭЛ-СКАДА» Центральний офіс, г. Пермь	2
9-1	Тиск	Трубопровід, димові гази		Трубопровід 29;				
9-2				Щит керування	Регулятор співвідношення пневматичний пропорційно-інтегральний (система СТАРТ); витрата повітря живлення 5 л/хв, $P_{вих} = 20...100$ кПа	ПР3.33-М1	АТ «Тизприбор», м. Москва	1
9-3				Щит керування	Перетворювач пневмоелектричний, $P_{вих} = 20...100$ кПа; $I_{вих} = 0...5$ (0...20 мА, 4...20 мА); граничнодопустима основна зведена похибка $\pm 0,5$; $P_{max} = 400$ кПа; $P_{жив} = 140$ кПа; діапазон робочих температур 5...50 °С; монтаж на Din-рейку; індикація вимірюваного параметра; інтерфейс RS-485	МТМ 4000PI-Д3	ТОВ НВП «Мікротерм», м. Сіверодонецьк	1

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.05.00.000

Арк.

80

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	Кількість, од.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Устаткування та прилади								
3-2 4-2 7-3 8-3 9-4				Щит керування	Автоматичний показувальний і ресструвальний вторинний прилад з пристроєм сигналізації, $I_{вх}=0...5$ мА, $4...20$ мА, НСХ перетворювачів: термоелектричних: В, К, L, S, А-1; опору: 50П, 100П, 50М, 100М; вихідні сигнали: $I_{вих}=4...20$ мА, $P_{вих}=20...100$ Кпа;	ДИСК-250М	ЗАТ «Промышленная группа „Метран”», м. Челябинськ	5
10-1	Тиск			Місцевий	Вимірювальний тензоперетворювач надлишкового тиску, $P_{max} = 1$ МПа, матеріал мембрани – сплав 36НХТЮ, граничнодопустима основна похибка 0,5 %; $I_{вих} = 0...5$ мА	«Сапфир-22ДИ», мод.2150	ВО «Геофізприлад», м. Івано-Франківськ	1
10-2				Щит керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; вхідні сигнали: 0...75 мВ, 0...200 мВ, 0...2 В, 0...10 В, 0...5 мА, 4...20 мА; виходи: 1 аналоговий і 2 дискретні; НСХ перетворювачів: термоелектричних – А-1, В, К, L, S, опору – 50П, 100П, 50М, 100М; граничнодопустима основна зведена похибка 0,2 %;	ІТМ-11	ВАТ «Підприємство “МІКРОЛ”», м. Івано-Франківськ	1

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.05.00.000

Арк.

81

					цифрова індикація			
--	--	--	--	--	-------------------	--	--	--

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	Кількість, од.
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Електроапарати

SB1 SB2				Щит керування	Пост управління кнопковий, кількість елементів управління – 2; номінальна напруга ізоляції (за змінного струму частотою 50/60 Гц) 660 В, номінальний тепловий струм 10 А; температура довкілля від (-40) °С до 40 °С, відносна вологість повітря 98 %, комутаційна зносостійкість 1 000 000 циклів	ПКУ 15-21-131 УЗ	ЗАТ «Променергоавтоматика», м. Київ	2
МП1				Місцевий	Пускач магнітний безконтактний нереверсивний з тепловим реле РТТ-326 136-160А, кнопками «ПУСК» і «СТОП» для керування трифазними асинхронними електродвигунами з короткозамкнутим ротором номінальний робочий струм 160 А; додаткові контакти: 2 н. р. і 2 н. з.; номінальна робоча	ПМ12-160210 У2 В	ВАТ «Кашинский завод электроаппаратуры», м. Москва	1

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.05.00.000

Арк.

82

					напруга 220, 380, 660 В, номінальна потужність 45 кВт; можуть застосовуватись у схе- мах з мікропроцесорною тех- нікою			
--	--	--	--	--	--	--	--	--

Позиція на схемі	Назва параметра	Середовище, місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва, технічна характеристика	Тип, марка моделі	Завод-виробник	Кількість, од.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Електроапарати								
SA1				Місцевий	Кнопка запобіжного вимикання; номінальна робоча напруга: змінна (частота 50/60 Гц) 660 В, постійна – 440 В, номінальний тепловий струм – 10 А	КМЕ-5111 УЗ	ТОВ «Кам'янець-Подільський електромеханічний завод» м. Кам'янець-Подільський	1
KM1				Місцевий	Контактор електромагнітний; номінальний струм контактів головного кола 250 А (50 Гц), номінальна напруга 400 В; додаткові контакти: 3 н. р. і 3 н. з.;	КТ-5032Б	ВО «Електроприбор», м. Чербоксари	1
HL1.. HL13				Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна із жовтим індикатором $U_{жив} = 220$ В, 50/60 Гц, $d = 27$ мм, сила світла 20 мКд	СКЛ-11-Ж-2-220	ВАТ «Кашинский завод электроаппаратуры», м. Москва	13
HL14, HL16				Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна із зеленим індикатором («ПУСК»), $U_{жив} = 220$ В, 50/60 Гц, $d = 27$ мм, сила світла 20 мКд	СКЛ-11-3-2-220	ВАТ «Кашинский завод электроаппаратуры», м. Москва	2

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДП ЛА52.05.00.000

Арк.

83

HL15, HL17				Щит керування	Лампа сигнальна світлодіодна із червоним індикатором («СТОП»), $U_{жив} = 220$ В, 50/60 Гц, $d = 27$ мм, сила світла 20 мКд	СКЛ-11-К-2-220	ВАТ «Кашинский завод электроаппаратуры», м. Москва	2
---------------	--	--	--	---------------	---	----------------	--	---

					ДП ЛА52.05.00.000	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		84

<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>

ДП ЛА52.05.00.000

Арк.

8