

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

КАФЕДРА ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКИ ТА ГІДРОЕНЕРГЕТИКИ

Кваліфікаційна робота
другий магістерський
(рівень вищої освіти)

Тема комплексної роботи «Дослідження шляхів підвищення енергоефективності камерних печей»

Тема кваліфікаційної роботи «Моделювання температурних полів газів в робочих об'ємах камерних печей»

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1440
спеціальності теплоенергетика
освітньої програми теплоенергетика

Олійник Назар Ігорович



Керівник к.т.н., доц. Карпенко Г.В.



Рецензент Сумін О.О.

Запоріжжя
2021

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Кафедра Теплоенергетики та гідроенергетики
Рівень вищої освіти другий магістерський
Спеціальність 144 Теплоенергетика
Освітня програма Теплоенергетика
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« 10 » грудень 2021 року

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

Олійнику Назару Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

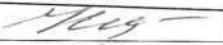
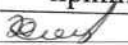

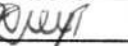
Тема роботи (проекту) «Моделювання температурних полів газів в робочих об'ємах камерних печей»
керівник роботи Карпенко Ганна Володимирівна, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «04» жовтня 2021 року № 1663-с

- 1 Строк подання студентом роботи: 10 грудня 2021 р.
- 2 Вихідні дані до роботи: визначення характеру турбулентного руху в'язкого газу за допомогою RNG k-ε моделі, граничні умови розрахунку, для визначення поля швидкостей використати рівняння Нав'є-Стокса у двомірній постановці.
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз існуючих математичних моделей печей; моделювання циркуляційного руху пічних газів у зоні розташування металевих заготовок; математичне планування експериментів; експериментальні дослідження на нагрівальній установці; промислові випробування на камерній печі.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): чисельне моделювання масових витрат пічних газів у камері печі, принципова схема та загальний вигляд експериментальної нагрівальної установки, динаміка нагріву верхніх та нижніх пластин, результати проведення промислових експериментів на печі відпалу.

5 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Карпенко Г.В.		
2	Карпенко Г.В.		

6 Дата видачі завдання 05 травня 2021 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз існуючих математичних моделей печей	25.06.2021	виконано
2	Моделювання циркуляційного руху пічних газів у зоні розташування металевих заготовок	01.08.2021	виконано
3	Математичне планування експериментів	01.10.2021	виконано
4	Експериментальні дослідження на нагрівальній установці	05.11.2021	виконано
5	Промислові випробування на камерній печі	01.12.2021	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи згідно нормативним вимогам	10.12.2021	виконано

Студент


(підпис)

Н.І.Олійник
(ініціали та прізвище)


Керівник роботи (проекту)


(підпис)

Г.В.Карпенко
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер


(підпис)

С.Є. ЧИЖОВ
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Н.І. Олійник «Моделювання температурних полів газів в робочих об'ємах камерних печей».

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 144 – Теплоенергетика, науковий керівник к.т.н., доцент Карпенко Г.В. Запорізький національний університет, Інженерний навчально-науковий інститут ім.Ю.М.Потебні, кафедра теплоенергетики та гідроенергетики, 2021.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена моделюванню температурних полів газів в робочих об'ємах камерних печей. Виконано чисельне моделювання масових витрат пiчних газів у камері реальної промислової печі. Проведені експериментальні дослідження на нагрівальній установці за умови створення електричного поля у її робочому просторі. Виконано розрахункову та промислову оцінки щодо доцільності подальшого використання результатів дослідження.

Ключові слова: математична модель, тепломасообмін, камерна піч, енергоефективність, електричне поле.

ABSTRACT

N.I.Oliinyk Design of gas temperature pattern cubic capacity of chamber stoves".

Qualifying final work for obtaining a master's degree in the specialty 144 - Thermal Power Engineering, Supervisor Ph.D., Associate Professor Karpenko G.V. Zaporizhzhya National University, Engineering Educational and Scientific Institute named after Y.M. Potebny, Department of Thermal Power Engineering and Hydro Power Engineering, 2021.

The qualification work of the master is devoted to the modeling of temperature fields of gases in the working volumes of chamber furnaces. Numerical simulation of mass consumption of furnace gases in the chamber of a real industrial furnace was performed. Experimental studies on the heating plant were conducted provided that the electric field is created in its operating space. The calculation and industrial assessment on the expediency of further use of the results of the study were performed.

Keywords: mathematical model, heat-mass exchange, chamber furnace, energy efficiency, electric field.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ГАЗІВ В РОБОЧИХ ОБ'ЄМАХ КАМЕРНИХ ПЕЧЕЙ	10
1.1 Аналіз існуючих математичних моделей печей.....	15
1.2 Моделювання циркуляційного руху пічних газів у зоні розташування металевих заготовок	26
1.3 Математичне планування експериментів.....	44
1.4 Експериментальна установка для проведення досліджень впливу електричного поля на теплові потоки.....	48
1.5 Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень.....	53
1.6 Синтез математичної моделі пічної установки з електричним полем..	58
1.7 Висновки до розділу.....	63
2 ПРОМИСЛОВІ ЕКСПЕРИМЕНТИ НА КАМЕРНІЙ ПЕЧІ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ГАЗІВ.....	65
2.1 Результати натурних експериментів на камерній печі за умови застосування електричного поля.....	65
2.2 Система управління тепловими потоками в камерній нагрівальній печі.....	68
2.3 Висновки до розділу.....	71
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	74

ВСТУП

Актуальність роботи. Згідно енергетичної стратегії України до 2035р. пріоритетними напрямками енергозбереження є зниження енергоемності виробництва, скорочення споживання первинних паливно-енергетичних ресурсів за рахунок впровадження новітніх енергоефективних та енергозберігаючих заходів.

Морально і фізично застарілі промислові теплоенергетичні установки мають вкрай низький ККД, що в комплексі із застарілими витратними технологіями не в змозі забезпечувати енергоресурсоефективне виробництво металургійної продукції. Досягнення високого рівня конкурентоспроможності продукції на внутрішньому і зовнішньому ринках вимагає у кожній галузі промисловості цілеспрямованої роботи над підвищенням рівня енергоефективності її виробництва при одночасному покращенні якості. В умовах зниження економічної ефективності енергоемних теплотехнологічних процесів особливо гостро стала проблема заощадження всіх енергоресурсів і, в першу чергу, природного газу. Одними з найбільш значних споживачів такого палива в металургії та машинобудуванні є термічні й нагрівальні печі.

Важлива роль в створенні методів розрахунку конструювання та удосконалення нагрівальних печей належить В.Є. Грум-Гржимайло, Н.Ю. Тайцю, В.Й. Губинському, В.Л. Гусовському, В.М. Тимчаку, Ю.Г. Качану та ін, щодо математичного моделювання теплових процесів – Н.М. Фіалко, В.Г. Лісієнку, Б.С. Сороці, М.В. Губинському, О.О. Єрьоміну, М.П. Свинолобову, впровадженні енергозберігаючих технологій використання енергії альтернативних джерел на промислових підприємствах Б.І. Баску, В.О. Габрінцю.

Оскільки у перспективі є маловірогідним зменшення кількості промислових об'єктів, що розглядаються, для вітчизняної промисловості інноваційні напрацювання щодо підвищення енергоефективності зазначених

теплових агрегатів набувають першочергового значення. Незважаючи на те, що питання можливості вдосконалення нагрівальних печей вивчаються вітчизняними і зарубіжними вченими протягом багатьох десятиліть, існує значний розрив між обсягами проведених наукових досліджень і практичними показниками щодо їх роботи. Навіть за можливості швидкої окупності заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності таких печей, їх впровадження відбувається лише в поодиноких випадках.

На даний час існує чимало можливих рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності газових нагрівальних об'єктів, але більшість з них потребує значних капіталовкладень. Основною причиною цього є те, що при вирішенні зазначеної проблеми практично не досліджувалися і не використовувалися можливості корегування напрямку теплових потоків всередині печі з метою передачі продуктами горіння максимально можливої кількості теплоти безпосередньо металу, що нагрівається. То ж вивчення необхідності і можливості створення способів щодо такого корегування є зараз першочерговим завданням задля суттєвого покращення роботи печей зазначеного типу, що дозволить впроваджувати енергозберігаючі заходи на зазначених об'єктах і підвищити економічну ефективність енергоємних галузей вітчизняної промисловості.

Мета роботи □ моделювання температурних полів газів в робочих об'ємах камерних печей за умови використання електричного поля.

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

- аналіз методів математичного моделювання процесів тепломасообміну у промислових печах;
- чисельне моделювання масових витрат пічних газів у камері печі за умови використання електричного поля;
- проведення експериментальних досліджень на нагрівальній установці для оцінки впливу електричного поля на теплові потоки у її камері;

– розробка математичної моделі щодо розподілу температури в камері нагрівальної установки з урахуванням впливу створеного в ній електричного поля;

– проведення натурних експериментів на камерній печі за умови застосування електричного поля.

Об'єкт дослідження – камерна нагрівальна піч.

Методи та засоби дослідження. У ході виконання магістерської роботи було використано статистичні методи аналізу з використанням програми STATISTICA 10, безкоштовна версія програмного продукту Ansys для студентів.

Наукова новизна отриманих результатів. Створення додаткового впливу на температурні поля газів у робочих просторах камерних печей за рахунок керованих електричних полів

Практична цінність роботи. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень підтверджена можливість корегування теплових потоків у камерних печах електричними методами. За результатами виконаних чисельних розрахунків масової витрати пічних газів у камері печі запропоновано заходи щодо її збільшення у зоні розташування садки.

Апробація роботи. Результати роботи представлені на Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційний розвиток сучасної економіки: нові підходи та актуальні дослідження». Запорізький національний університет. Запоріжжя: ЗНУ, 20-21 квітня 2021 р. та I Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально- економічного розвитку регіонів України» 19-21 жовтня 2021 р.

Структура та обсяг роботи. Магістерська робота включає вступ, два розділи, висновки та перелік джерел посилання з 95 позицій. Загальний обсяг складає 85 сторінок, у тому числі 39 ілюстрації та 2 таблиці.

РОЗДІЛ 1 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ГАЗІВ В РОБОЧИХ ОБ'ЄМАХ КАМЕРНИХ ПЕЧЕЙ

На сьогоднішній день можливі два основні способи дослідження роботи печей з метою виявлення резервів енергозбереження, а саме: виконання дорогих експериментів на реальних об'єктах та проведення обчислювальних досліджень за допомогою математичних моделей [1-15]. Останній з них є менш витратним з огляду на те, що не вимагає установки на об'єкті додаткових вимірювальних приладів та іншого спеціального обладнання.

Математичне моделювання дає змогу:

- виконувати багаторазові іспити моделі, кожен раз повертаючи її у вихідне положення;
- визначити оптимальну конструкцію об'єкта, виключивши необхідність створення його пробних екземплярів;
- проводити експерименти без ризику негативних наслідків для здоров'я людини та без втручання в технологічний процес на підприємстві;
- досліджувати явища та процеси в динаміці, і т.д.

Сучасна теорія печей - це теорія їх конструювання, яка включає в себе три групи об'єктів [16]:

- експлуатаційні та конструктивні параметри печі;
- тепло- і масообмінні процеси;
- показники роботи печі.

До експлуатаційних параметрів відносяться витрата та температура підігріву повітря та палива, розподіл їх за зонами печі, тиск газів та температурний режим у робочій камері установки. А до конструктивних – геометричні параметри камери, її форму, взаємне розміщення пальникових пристроїв та вікон для відведення продуктів згоряння, вид ізоляційних та вогнетривких матеріалів, тип та склад утилізаційних пристроїв.

До другої групи відносяться тепло- і масообмінні процеси, що відбуваються в печі : спалювання палива, рух газів у робочому об'ємі, теплопередачу, окислення та знеуглерожування заготовок і т.д. На тепло- та масообмінні процеси можна впливати змінюючи конструктивні параметри установки та режими її експлуатації, тим самим впливаючи на показники роботи печі, а саме: питому витрату палива, продуктивність, тощо. Виходячи з цього важливо встановити зв'язок між першою та третьою групою з урахуванням тепло- та масообмінних процесів, що протікають у печі.

Метою сучасної теорії конструювання та модернізації печей є забезпечення якісної теплової обробки матеріалів, підвищення енергоекологічної ефективності та ресурсозбереження шляхом управління процесами тепломасоперенесення. На сьогоднішній день розроблено теоретичні положення та методи моделювання роботи сучасних печей з можливістю управління температурним полем, яке формується під дією таких факторів, як умови спалювання палива та режими руху газів у робочому просторі.

З теорії та практики роботи печей [16] витікає принцип локальності зовнішнього теплообміну в паливних печах: нагрівання поверхні матеріалу або футерування на якійсь ділянці печі визначається випромінюванням та конвекцією від газових обсягів, розташованих у безпосередній близькості від цієї поверхні. Якщо взяти до уваги, що в газовій фазі перенесення теплоти випромінюванням в печі на один-два порядку менше в порівнянні з конвективним перенесенням тепла газами, що рухаються, то стає ясно, що управляти температурним полем печі - значить управляти рухом газів, за допомогою якого теплота доставляється до всіх локальних ділянок поверхні металу та футерування.

Зовнішня і внутрішня рециркуляція, регульоване перемішування паливного струменя з повітрям на виході з пальника є керуючими впливами на температурне поле пічних газів. Пульсаційна подача в пальник палива або

повітря, регулювання величини питомої енергії циркуляції газів, реверсних газів, тобто періодична зміна траєкторії руху газів на зворотну по відношенню до садки металу, переміщення факела в робочому просторі печі шляхом коливання пальника та інші способи управління рухом газів та спалюванням палива. Також розроблені теоретичні методи моделювання температурного поля під впливом зазначених керуючих факторів. Математичне моделювання сполучених процесів тепло- та масообміну є інструментом сучасної теорії печей.

В даний час [17] конструювання сучасних печей різної продуктивності та призначення включає передпроектне дослідження, яке полягає в комп'ютерному моделюванні комплексу пов'язаних теплообмінних процесів: циркуляції пічних газів, горіння палива, теплообміну і температурного поля газів у робочому просторі печі. До змінних експлуатаційних та конструктивних параметрів установки при моделюванні відносять: вид палива, геометричні параметри робочого простору, схема циркуляції пічних газів, одинична потужність, кількість та розташування пальних пристроїв, швидкість палива та повітря на виході з пальних каналів, а також взаємне розміщення каналів для введення в піч палива та повітря.

Системи рівнянь, що описують взаємопов'язані фізичні та хімічні процеси в печі, а також алгоритми та комп'ютерні програми служать математичною основою моделювання теплообмінних процесів з урахуванням конструктивних та експлуатаційних параметрів печі. Далі, як приклад представлено опис комплексу математичних моделей, вищезазначених процесів.

У [18,19] для визначення поля швидкостей пічних газів використовується рівняння Нав'є-Стокса для нестисливої рідини, рівняння нерозривності. За допомогою двопараметричної RNG k - ϵ моделі враховується турбулентність руху пічних газів. Визначення температурного поля газів здійснюється шляхом вирішення рівняння енергії з двома вихідними членами, які виражають перенесення теплоти випромінюванням

та виділенням теплоти хімічної реакції горіння палива. Джерело теплоти від випромінювання газів визначається з рівняння перенесення випромінювання в поглинаючому та випромінюючому газі. Селективні властивості газу враховуються за допомогою моделі виваженої суми сірих газів. Розрахунок горіння палива здійснюється за допомогою моделі найпростіших хімічних реакцій. Щільність газу визначається з рівняння стану ідеального газу. Рішення рівнянь руху, турбулентності, енергії та горіння здійснюється з використанням методу контрольного об'єму, а рівняння перенесення випромінювання газу спільно з моделлю виваженої суми сірих газів вирішується з використанням методу дискретних ординат. Рішення всіх рівнянь комплексу моделей здійснюється послідовно на єдиній прямокутній сітці, крім рівняння руху, для котрого вводяться додаткові вузли сітки, у яких визначаються компоненти вектора швидкості. Стійке рішення всіх рівнянь отримують шляхом використання нижньої релаксації. Для рівняння руху критерієм збіжності служить нев'язка рівняння нерозривності для розрахункової області, а рівняння енергії - нев'язка теплового балансу.

Достовірність отриманих результатів математичного моделювання оцінюється за допомогою гідравлічного та вогневого моделювання печей.

В Інституті газу НАНУ розроблені наукові основи екологічно чистого спалювання природного газу та комп'ютерні програми розрахунку низько- та супернизькоемісійних пальникових пристроїв та топок [20,21]. Їх створення базується на комбінації прийомів, включаючи багатоетапне спалювання, неадіабатичну рециркуляцію продуктів горіння.

Математичні моделі та комп'ютерні програми складають комплекси окремих методик:

1. Розроблено спрощений механізм горіння природного газу (Reduced Chemical Kinetic Mechanism), адаптований до детальних механізмів Міллер-Боумена та GRI з багатьох сотень рівнянь [23].

2. Зміст оксидів азоту розраховується в рамках моделі з використанням рівнянь глобальної кінетики утворення "термічних" та

"швидких" NO з урахуванням пульсацій температури в турбулентному потоці [65].

3. Розроблено універсальну методику розрахунку радіаційного теплообміну в складних оптичних системах із селективно випромінюючим газовим середовищем за допомогою методу Монте-Карло [24]. Відповідна комп'ютерна програма адаптована на прикладі розрахунків котлів та печей у порівнянні з результатами зарубіжних дослідників.

Комплекс заходів, розроблений у рамках зазначених вище робіт, дозволяє:

- прогнозувати екологічні та енергетичні характеристики експлуатації теплових агрегатів із низькоемісійними камерами спалювання;
- на етапі проектування оптимізувати конструктивні параметри та режими експлуатації паливовикористовувальних установок та пальникових систем заданої потужності;
- розробити серію типорозмірів пальникових систем різної теплової потужності.

Математичне моделювання як інструмент розрахунку печей ґрунтується на одночасному вирішенні рівнянь кінетики горіння з рівняннями перенесення імпульсу, теплоти та маси. На етапі рішення нелінійної системи рівнянь проводиться чисельними методами, що насправді і є комп'ютерним моделюванням.

На сьогоднішній день отримали широке застосування універсальні міжнародно визнані програмні продукти, а підходи до розрахунків топкових агрегатів отримали назву моделювання CFD (Computational Fluid Dynamics) [25]. CFD моделювання загалом - побудова мереж, у вузлах яких виконується чисельне рішення систем рівнянь з урахуванням відповідних граничних умов.

В Інституті газу НАНУ [62-63] успішно використовуються такі сучасні програмні продукти, як PHOENIX і ANSYS. Наприклад, для розрахунку процесів перенесення використовують різні модифікації моделей

турбулентності (звичайна, RNG, Realizable k- ϵ - моделі). Різні моделі горіння, серед яких повинна бути обрана найбільш адекватна, перш за все, визначаються як моделі з необмеженою швидкістю (FastChemistryApproach - FaCA) або з кінцевою швидкістю (FiniteChemistryApproach - FiCA). Поширені моделі горіння, в яких швидкість турбулентного горіння пов'язується з турбулентністю при використанні простих хімічних реакцій: наприклад, при розрахунках спалювання природного газу в програмному продукті PHOENIX враховуються лише дві реакції (модель Сполдінга-Магнуссена), руйнування вихорів (Eddy Break Up EBU) Eddy Dissipation) [26-28].

1.1 Аналіз існуючих математичних моделей печей

З урахуванням вищезазначеного стає очевидним, що одним з першочергових завдань підвищення енергоефективності камерних газових печей є створення адекватних математичних моделей, що містять у явному вигляді всі необхідні для визначення енергетичних показників технологічні величини і конструктивні параметри аналізованих об'єктів, такі як витрата палива, його теплота згоряння, розміри металу, що нагрівається, та інші. Це дасть змогу обчислювальними методами вирішувати такі завдання:

- конструктивна та технологічна оптимізація за вказаним критерієм ефективності;
- оцінка теплового навантаження печі за зонами;
- розподіл температурного поля всередині камери;
- визначення доцільності змін напряму теплового потоку в обсязі печі і т.д.

Розглянемо існуючі математичні моделі вказаних печей та проаналізуємо можливість їх застосування для вирішення сформульованих завдань.

В даний час досить відома математична модель нагрівання масивного тіла з урахуванням теплопровідності випромінюванням та конвекцією [28]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}; \quad (1.1)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = \sigma_1 \{ [u_1(\tau)]^4 - [T(0, \tau)]^4 \} + \alpha_1 [u_1(\tau) - T(0, \tau)]; \quad (1.2)$$

$$\lambda \frac{\partial T(s, \tau)}{\partial x} = \sigma_2 \{ [u_2(\tau)]^4 - [T(s, \tau)]^4 \} + \alpha_2 [u_2(\tau) - T(s, \tau)]; \quad (1.3)$$

$$T(X, U) = T_0(X), \quad (1.4)$$

де $T(x, \tau)$, $0 < x < s$, $0 < \tau < \tau_n$ - функція, що характеризує розподіл температури по товщині тіла, що нагрівається в момент часу τ ;

$u_1(\tau), u_2(\tau)$ - функція зміни температури в нижніх (1.1) та верхніх (1.2) зонах печі;

a, λ - коефіцієнти температуро- та теплопровідності матеріалу відповідно;

σ_1 і σ_2 - коефіцієнти променистого теплообміну внизу та зверху камери печі;

α_1 і α_2 - коефіцієнти конвективного теплообміну також зверху та знизу.

Математична модель [28] дозволяє описати аналізований процес тільки всередині тіл і припускає, що всі параметри зовнішнього теплообміну, у тому числі температура середовища, що гріє, відомі. Вона може бути уточнена за рахунок урахування залежності теплофізичних властивостей матеріалу від температури. Врахувати зміну зазначених вище характеристик і параметрів печі в такій моделі проблематично. При розв'язанні задач оптимізації режимів нагріву за витратою енергоносія виникають також складнощі, пов'язані з підбором його витрати по зонах, що реалізує обрану функцію $u(l)$ -температуру по довжині зон печі. Таке завдання є зворотним розрахунком

зовнішнього теплообміну і має ряд специфічних труднощів, пов'язаних з її некоректністю [29].

У математичній моделі прохідної печі [30] тепловий потік вздовж активного пода установки ставився у вигляді відомої, експериментально отриманої функції. З теплового балансу визначалася витрата палива, при цьому враховувався сумарний тепловий потік на метал, температура димових газів та втрати через футерування. На цій моделі вирішувалося завдання оптимізації зональної витрати газу. Недоліком моделі є необхідність апріорно задаватися функцією теплопоглинання, що обмежує можливості моделювання роботи теплових агрегатів.

В роботі [31] розглядається крайове завдання нестационарного теплоперенесення в режимах конвекції та теплопровідності для замкнутої області. Присутній опис полів: температурного, швидкості, вектора вихору. Проводиться також порівняння розподілів температури в режимах конвективного та кондуктивного теплоперенесення, але параметри камери у явному вигляді не враховуються: відсутня тяга, канали відведення продуктів згоряння та подачі повітря. Процес перенесення тепла описується системою нестационарних рівнянь Нав'є-Стокса для газової та рівнянням теплопровідності для твердої фази з нелінійними граничними умовами.

Для визначення полів течії і температур у газовій фазі в моделі використовувані нестационарні двовимірні рівняння конвекції в наближенні Буссинеска. З нехтуванням в'язкою дисипацією енергії рівняння нерозривності, руху та енергії в газовій фазі ($h_1 \leq y \leq h_1 + h_2, l_1 \leq x \leq l_1 + L; h_1 + h_2 \leq y \leq h_1 + h_2 + h_{um}, l_1 + l_{um} \leq x \leq l_1 + L; h_1 + h_2 + h_{um} \leq y \leq h_1 + H, l_1 \leq x \leq l_1 + L$) представлені наступним чином:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad (1.5)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (1.6)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho \beta g_y (T - T_0), \quad (1.7)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (1.8)$$

а для твердої фази

$(0 \leq y \leq h_1, 0 \leq x \leq 2l_1 + L; h_1 \leq y \leq h_1 + H, 0 \leq x \leq l_1, l_1 + L \leq x \leq 2l_1 + L;$

$h_1 + H \leq y \leq h_1 + H + h_3, 0 \leq x \leq 2l_1 + L$ рівняння тепло-провідності у вигляді:

$$\rho_i C_{pi} \frac{\partial T_i}{\partial t} = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2} \right), \quad i=1,2,3. \quad (1.9)$$

де x, y – координати декартової системи координат;

ρ_i – щільність i -ої підобласті;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;

p – тиск;

β – температурний коефіцієнт об'ємного розширення;

g_y – складова прискорення сили тяжіння у проекції на вісь y ;

C_{pi} – питома теплоємність при постійному тиску i -ої підобласті;

λ_i – коефіцієнт теплопровідності i -ої підобласті;

L – довжина газової порожнини по вісі x ;

t – час;

u, v – складові швидкості в проекції на вісі x, y відповідно;

T_i – температура i -ої підобласті.

В роботі [32] використовуються чисельно-аналітичні методи розрахунку, що є суттєвим недоліком даної математичної моделі, тому що відомо [33], що застосування так званих інженерних методик розрахунку, дають ближчу до нульової похибку проти чисельно-аналітичних. На створення математичної моделі на основі останніх методик знадобиться ще й значно більше часу, ніж за інженерною.

Математична модель методичної печі [34] призначена для розрахунку температури металу на її розвантажувальній стороні. Зональна витрата палива визначається за формулою:

$$B_i = \frac{M_{\text{общи}}}{Q_n^p}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (1.10)$$

де $M_{\text{общи}}$ - загальна теплова потужність по зонах печі, МВт;

Q_n^p - теплота згоряння палива, МДж/м³.

Зв'язок витрати газу з теплоємністю металу встановлюється залежністю:

$$B_i = \frac{i_{ni}(100G - G\delta) - i_{ki}(100G - G\delta) - Q_{\text{усв.FEi}} + Q_{5i}}{Q_n^p \eta_{\text{общи}}}, \quad (1.11)$$

а теплоутримання металу в кінці i -ої зони робочого простору печі обчислюється за формулою:

$$i_{ki} = B_i \frac{Q_n^p \eta_{\text{общи}}}{G(100 - \delta)} + \frac{Q_{\text{усв.FEi}}}{G(100 - \delta)} - \frac{Q_i}{G(100 - \delta)} + i_{ni} \quad (1.12)$$

де $\eta_{\text{общи}}$ - коефіцієнт використання хімічної енергії палива;

G – встановлена продуктивність печі, кг/с;

δ – угар металу, %;

$Q_{усв.FEi}$ - тепло, засвоєне металом від окислення заліза по зонах печі, МВт;

Q_i - загальні втрати тепла i -ої зони робочого простору печі, МВт;

i_{ni} - тепловміст металу на початку i -ої зони робочого простору печі, МДж/м³.

Основними обчислювальними блоками останньої моделі є: розрахунки горіння палива, нагрівання металу та зовнішнього теплообміну у її робочому просторі, складання теплового балансу печі. На рисунку 1.1 представлені складові цих розрахункових блоків.

Модель синтезована на основі відомих інженерних методів розрахунку [35, 36] та дозволяє визначати температуру як на поверхні заготівлі, так і усереднену по зонах печі. Однак визначити напрями потоків теплової енергії тут неможливо, оскільки розрахунок температур проводиться з прив'язкою до віртуальних координат зон печі, а не до реальних об'ємних.

У роботі [37] наводиться математичне моделювання теплообміну в багатозонній методичній печі стану 600 Алчевського металургійного комбінату. При моделюванні теплової роботи печі формулюється завдання сполученого теплообміну, що враховує специфіку конструкції конкретної печі та умови її функціонування, що дозволяє детально досліджувати особливості її теплової роботи у конкретних умовах виробництва. Автори запропонували складну геометрію по кладці розбити на прямокутні розрахункові зони, при цьому зазначено, що необхідно прагнути їх мінімальної кількості при збереженні можливості обліку всіх основних особливостей теплообміну в печі. Алгоритм рішення даної математичної моделі базується на ітераційній схемі розв'язання завдань сполученого променисто-кондуктивного теплообміну.

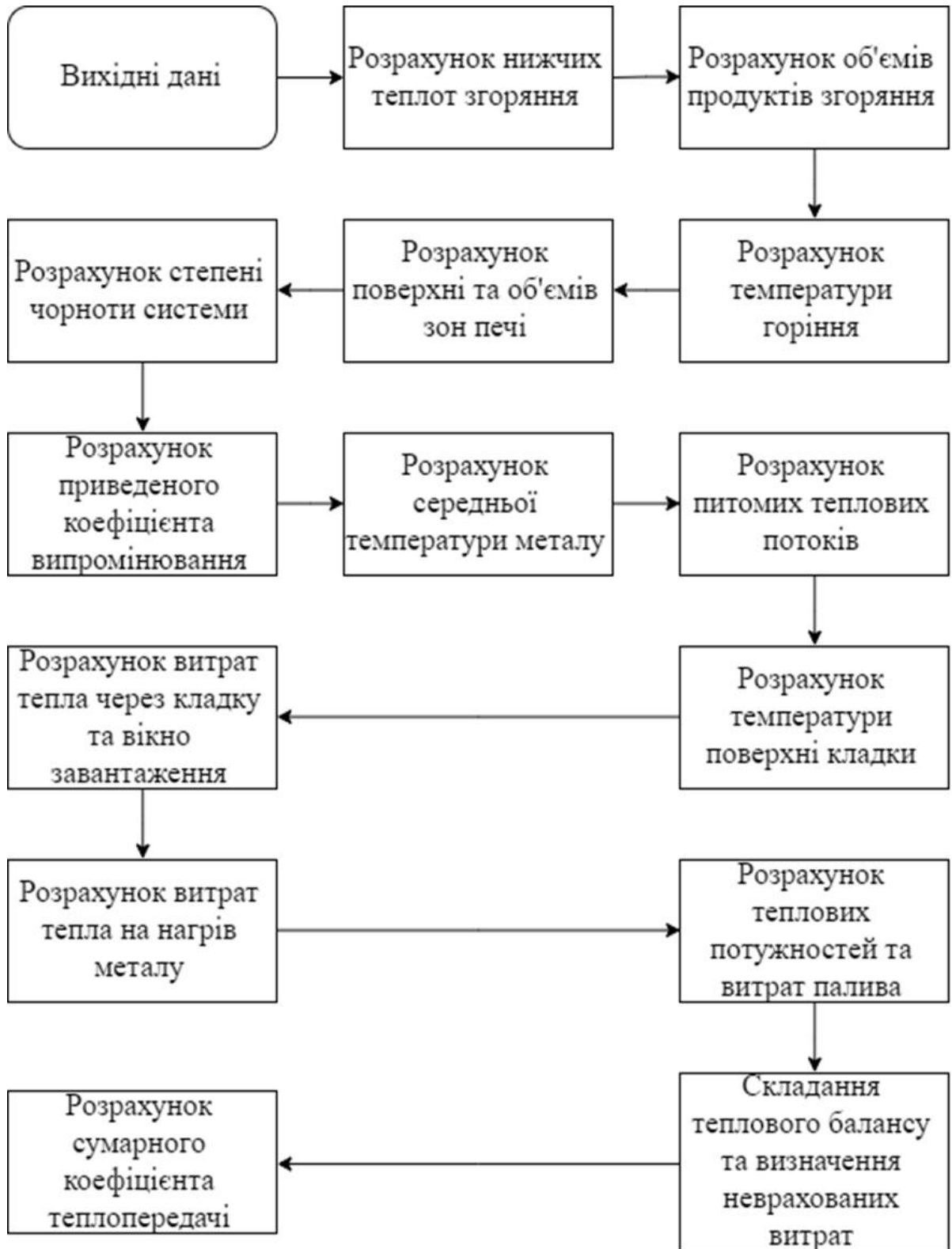


Рисунок 1.1 □ Основні розрахункові блоки математичної моделі

Вказано, що дана математична модель пройшла параметричну ідентифікацію за даними промислового експерименту та розбіжність за значеннями температури має задовільну збіжність. За результатами математичного моделювання запропоновано новий тепловий режим, згідно з яким питома витрата умовного палива може бути знижена на 4,5 кг у.п./т, а коефіцієнт корисної дії збільшено на 4 %.

У роботі [38] наводиться спосіб моделювання складного теплообміну в печі за допомогою зональної методи або, як зазначає автор, метод великої сітки. Ідея зонального методу полягає в розбиття системи, в якій відбувається теплообмін, на об'ємні та поверхневі зони, в межах яких усі теплофізичні показники можна приблизно вважати постійними. Автор роботи вказує, що з позиції точності та швидкодії кількість зон при розрахунку процесів теплообміну в енерготехнологічному агрегаті має становити близько 300. Однак, як зазначає автор, при використанні цього методу виникає проблема при розрахунку випромінювання поверхневими зонами.

Використання резольвентного зонального методу замість класичного дозволяє виключити потоки ефективного випромінювання, а облік відбивання здійснюється шляхом розрахунку дозволяючих узагальнених кутових коефіцієнтів випромінювання. Також автором зазначено, що спрощені інженерні розрахунки, що застосовуються при конструюванні печей, зазвичай не дозволяють проводити деталізовані багатоваріантні розрахунки з вибором оптимальних конструктивних та режимних параметрів з урахуванням не тільки інтегральних, але і локальних характеристик тепломасообміну (теплові потоки, температури, швидкості).

А це виключає можливість детального аналізу таких найважливіших показників теплової роботи, як гнучка змінна продуктивність (темп), стійкість кладки, якість нагріву, довжина та місцеперебування факела, розміщення нагрівальних елементів, оптимальні траєкторії нагріву для АСУТП, місця встановлення датчиків, динаміка пусків та зупинок. Саме ці показники визначають на сучасному рівні можливість оптимізації теплової

роботи та конструкцій тепло агрегату. Автор також зазначає, що найпередовіші методи розрахунку та моделювання процесів тепломасообміну в печах засновані на застосуванні систем САПР та комп'ютерного аналізу.

У роботі [39] показано, що одним з основних напрямів розвитку методів математичного моделювання складних теплофізичних процесів в цей час є розробка та застосування потужних програмних комплексів як основи для вирішення широкого кола завдань. Детерміновані математичні моделі теплофізичних процесів, що протікають у промислових печах, давно і широко використовуються дослідниками та проєктувальник для вдосконалення конструкцій та режимів роботи промислових печей. При цьому найбільш важливими практичними завданнями їх удосконалення є зменшення угару металу в печах, економія палива та зниження утворюються при горінні парникових газів.

Однак якість цих моделей не можна вважати задовольними з погляду можливості надійного вирішення багатьох практичних завдань, головним чином математичного опису руху газів у робочих камерах печей. Тим часом як зазначають автори, без вирішення завдань цього типу неможливо з достатньою точністю та вірогідністю описати процеси конвективного перенесення теплоти та маси, які відіграють важливу роль у формуванні поля температури та поля концентрацій компонентів газового середовища. Вказана обставина обумовлена надзвичайною складністю процесу турбулентного руху газу в камерах за наявності процесів горіння та теплообміну.

Автори зазначають, що інженерні розрахунки можуть бути використані лише для отримання орієнтовних даних, в той час, як останні досягнення нового напрямку науки, званого у закордонній літературі обчислювальною гідродинамікою (CFD), дозволяють суттєво підвищити якість аналізованих математичних моделей коштом детального опису газодинаміки робочого процесу печі. Фактично створюється новий математичний інструмент для

інженерів-дослідників та конструкторів, що працює у галузі промислової теплоенергетики, металургійної теплотехніки та ін. Проаналізувавши закордонну літературу, автори зазначають, що будь-яка серйозна реконструкція металургійної печі містить у собі як необхідний етап розробки математичної моделі з урахуванням будь-якого програмно-обчислювального комплексу.

У роботі [40] наводиться опис моделювання процесу нагрівання зливка в багатозонній печі. Автори пропонують комп'ютерне моделювання, засноване на спільному застосуванні теорії клітинних автоматів та звичайно-різницевих методів. Для визначення температурного поля злитка в процесі ступінчастого нагріву використовували різницеву апроксимацію рівняння теплопровідності. Як програмне обчислювального комплексу автори використали Delphi. Проте слід зазначити, що було зроблено спрощення – пічний простір заповнено повітрям, моделювання виконано для перших 4400 секунд процесу нагрівання, а кінцевим підсумком роботи стало визначення температурних напруг, що виникають у злитку за цей проміжок часу, при цьому кінцевий стан зливка (розподіл температури по злитку в кінці нагрівання) не було розраховано.

У роботі [41] ті ж автори використовують клітинно-автоматне моделювання у програмному комплексі Delphi власної розробки, призначеного для моделювання процесів нагрівання та окалино утворення в злитках, що рухаються у багатозонних печах. Температурне поле нагрівального середовища описується у вигляді набору теплових зон із зазначенням їх температури та протяжності, тобто, по суті, автори спочатку виключили у запропонованій методиці моделювання облік технічних та конструкційних параметрів зон печі (потужність та розташування пальників, гідродинаміка та променистий теплообмін, геометрія робочого простору, заготовок тощо), що фактично зводиться до класичного теплового розрахунку печі, оформленого у вигляді програмного комплексу.

У роботі [42] зазначається, що закордонні фахівці RHI Refractories (Австрія) протягом останніх десятиліть використовують метод кінцевих елементів як ефективний інженерний інструмент у процесі розрахунку розподілу температур у вогнетривкій продукції, що розробляється, і при проєктуванню печей. Як програмний комплекс була використана DIANA, яка дозволяє враховувати гідродинаміку та турбулентність процесів. Однак пряме чисельне рішення та пряме чисельне моделювання цих процесів вимагає такого розбиття на кінцеві елементи, при якому розмір осередки буде менше довжини найменшого турбулентного вихору, а крок за часом менше, ніж масштаб турбулентних флуктуацій. Таким чином, для подібних розрахунків необхідні обчислювальні ресурси, які відсутні в цей час на промисловому ринку. Своєю чергою автори роботи зазначають, що альтернативою може бути моделювання великого вихору (LES), при якому знаходиться рішення тільки для самого великого нестационарного руху, а решта моделюють, при цьому рішення рівнянь Нав'єСтокса з опосередкуванням по Рейнольдсу (RANS), де всі турбулентні фактори впливають на середній потік, моделюють функції параметрів середнього потоку текучого середовища. Однак і такий підхід потребує великого ресурсу часу на розв'язання поставленої задачі.

Враховуючи вищесказане можна дійти невтішного висновку, більшість робіт цього напрямку переважно пов'язані з побудовою спрощених моделей, які лише частково відображають процеси, які у нагрівальних і термічних печах і описують лише їх деякі складові. Такі математичні аналоги не дають повної, об'ємної картини зміни температури та теплового потоку. Зазвичай розглядаються одно-або двомірні стаціонарні поля. Опису ж динамічних процесів у тривимірному просторі поки що не приділялося належної уваги.

Таким чином, відомі моделі, розглянуті в вищенаведених роботах не дають уявлення про розподіл теплових потоків і не дозволяють створити більш досконалі методики проєктування та управління для газових печей, тому це питання потребує подальших досліджень.

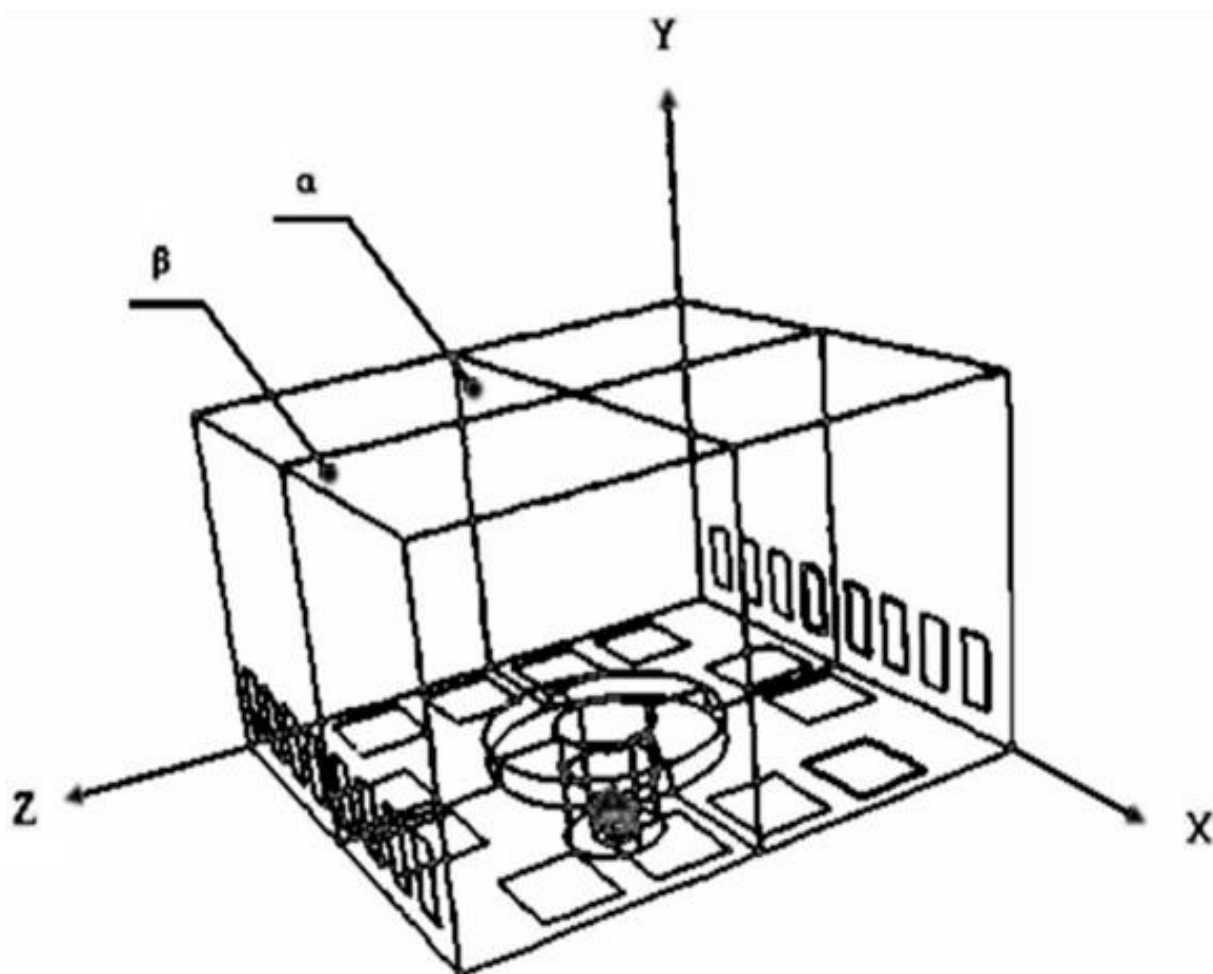
1.2 Моделювання циркуляційного руху пічних газів у зоні розташування металевих заготовок

В роботі [45,46] представлені результати дослідження руху пічних газів у типовому рекуперативному нагрівальному колодязі (РКНК) та в нагрівальному колодязі з кульковими регенераторами (РГНК), вплив динамічних характеристик паливного та повітряного струменя, що витікають з отворів пальника на циркуляцію пічних газів та температурне поле в печі.

Одним із серйозних недоліків рекуперативних нагрівальних колодязів є нерівномірне температурне поле по висоті пічної камери колодязя і, як наслідок, суттєвий перепад температури між головною та донною частиною злитків, що нагріваються. Наявна нерівномірність нагріву металу зумовлює необхідність деякого перегріву злитків та збільшення часу витримки їх у печі перед видачею у прокатку. Це призводить до перевитрати палива на нагрівання, збільшує ймовірність оплавлення перегрітих поверхонь злитків та втрати металу в окалину.

Зміна температурного поля в регенеративному нагрівальному колодязі значною мірою пов'язана зі збільшенням швидкості витікання газоповітряних струменів з пальника. Відомо, наприклад, що в камерних печах однакової конструкції, що мають одну і ту ж теплову потужність, але різну швидкість витікання палива, спостерігався різний характер нерівномірності температурного поля по довжині печі. Вивчення причин цього явища дозволило зробити висновок про вплив питомої енергії циркуляції пічних газів на траєкторію їх руху, на кратність великомасштабної внутрішньої рециркуляції та формування температурного поля.

Рух пічних газів можна вважати симетричним щодо вертикальної площини α , яка проходить через вісь колодязя та паралельна стінам з вікнами для відведення диму в рекуператори (рис.1.2).



α □ вертикальна площина, яка проходить через вісь колодязя,

β □ осьова площина, яка проходить між двома злитками

Рисунок 1.2 □ Загальний вигляд рекуперативного нагрівального колодязя з розміткою розташування злитків на подині та димових вікон у стінах

На рисунку 1.3 представлені траєкторії руху газів в осьовій площині β , яка проходить між двома злитками, встановленими біля стіни колодязя з димовими вікнами (рис. 1.2). Траєкторія потоку газів у площині β (рис.1.3) має форму незамкненої петлі, що свідчить про слабку рециркуляцію газів у даній площині.

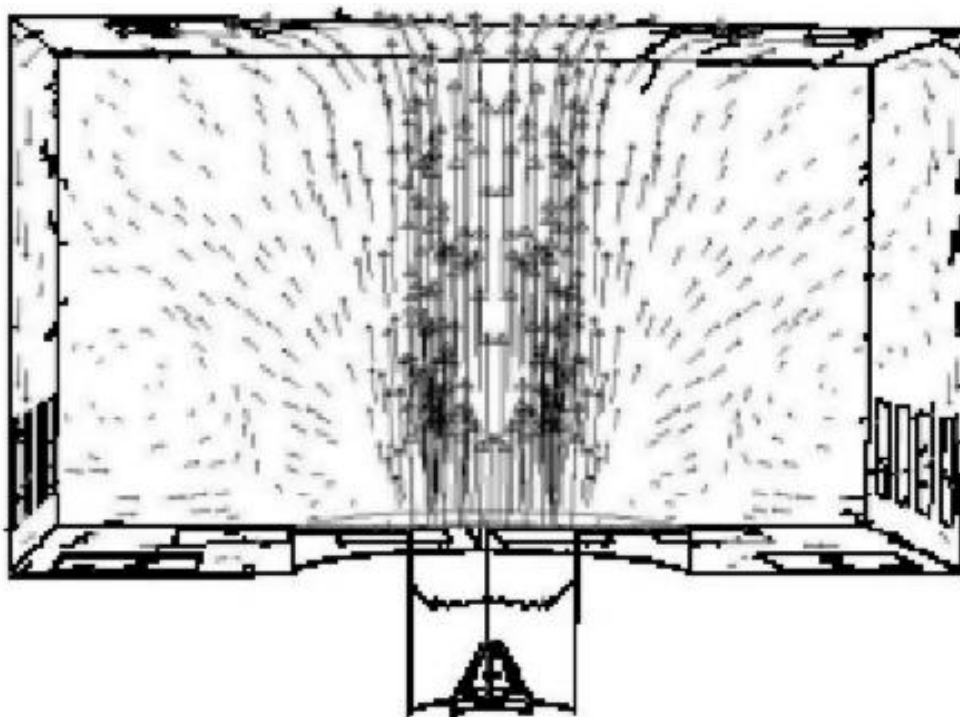


Рисунок 1.3 – Траєкторії руху пічних газів в площині β

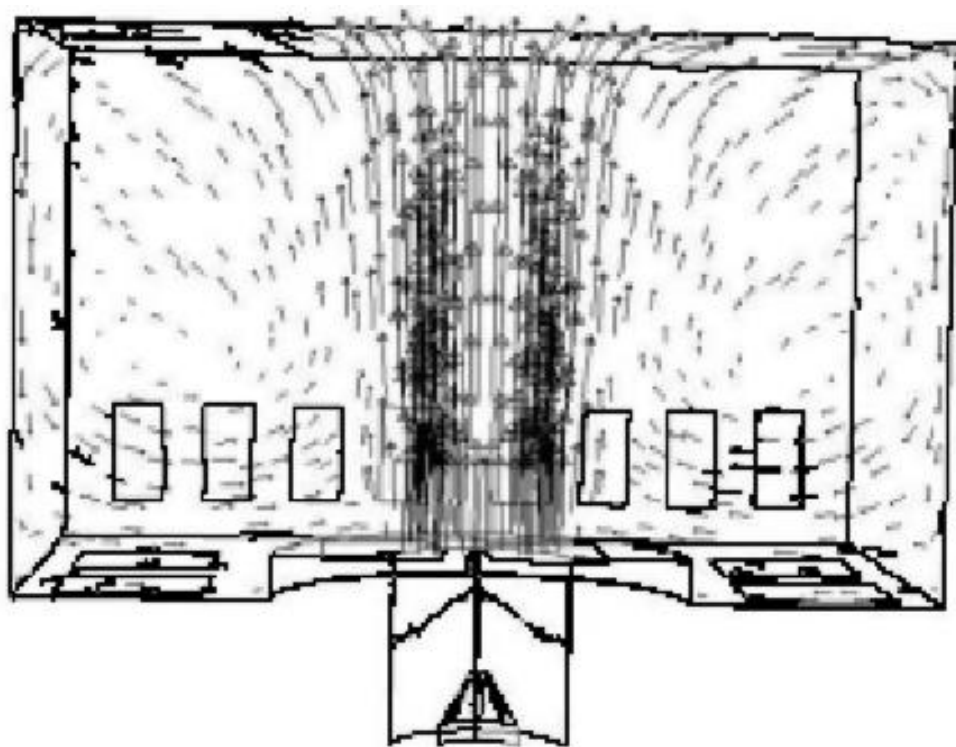


Рисунок 1.4 – Траєкторії руху пічних газів в площині α

У площині α характер руху пічних газів дещо інший. На рисунку 1.4 видно зону великомасштабної рециркуляції пічних газів, що рухаються кільцевою траєкторією від пальника до склепіння печі, від склепіння до глухих стін колодязя і від стін назад до пальника.

Для наближеної оцінки кратності рециркуляції пічних газів половині колодязя, розділеного площиною α , виділені окремі ділянки траєкторії їх руху (рис. 1.3). Два симетричні потоки димових газів, що розходяться до бокових стін з вікнами для відведення диму, проходять три ділянки траєкторії:

- підйом газів від сопла до центру склепіння печі;
- рух газів від центру склепіння до стін з димовими вікнами;
- опускання потоку газів вздовж стін до димових вікон.

Моделювання горіння палива, радіаційно-конвективного теплообміну в печі, циркуляційного руху пічних газів з визначенням кратності великомасштабної внутрішньої рециркуляції дозволяє проектувати камерні печі, що забезпечують нижчу витрату палива та високу якість нагрівання металу.

Визначені при моделюванні концентрації компонентів суміші пічних газів дозволили зробити висновок про те, що в половині обсягу пічної камери колодязя з боку димового каналу горловини знаходяться продукти згорання та паливо. У другій половині об'єму пічної камери, з боку повітряного каналу горловини, циркулюють в основному повітря та продукти згорання. Паливо згоряє практично повністю до виходу пічних газів через димовий канал горловини. При реверсі пічних газів місцезнаходження зон циркуляції змінюється на протилежне.

Більш високий рівень імпульсу паливного та повітряного струменя та питомої енергії циркуляції пічних газів збільшують довжину траєкторії їх руху (дальнобійність) та витратну теплоємність циркулюючих потоків за рахунок залучення до спільного руху по траєкторії рециркуляційних об'ємів газу. Внаслідок цього конвективний розподіл теплоти по зонах пічної камери

стає більш рівномірним, а перепад температури газів за довжиною траєкторії їхнього руху зменшується.

Розташування каналу для відведення димових газів у пальнику нагрівального колодязя створює умови для більш ефективної інжекції газів, що йдуть паливним і повітряним струменями, що витікають з пальника, що також сприяє збільшенню кратності рециркуляції.

Періодичний реверс газів в нагрівальному колодязі сприяє створенню однакових умов нагрівання злитків в обох половинах пічної камери.

За даними математичного моделювання температурного поля перепад температури по висоті пічної камери на рівні головної та донної частини злитків, що нагріваються, в регенеративному нагрівальному колодязі на (40...50) % менше, ніж у рекуперативному (табл. 1.1). Про рівномірне нагрівання злитків свідчить і досвід промислової експлуатації регенеративних нагрівальних колодязів.

Результати вимірювання температури по висоті печі, струмових навантажень при прокатці, мимовільний спуск рідкого шлаку в процесі нагрівання підтвердили вирівнювання температурного поля по висоті РГНК і злитків, що нагріваються в них.

Таблиця 1.1 Динамічні характеристики струменів та експлуатаційні показники РКНК та РГНК

Характеристика показника	Тип нагрівального колодязя		Співвідношення характеристик (показників)
	РГНК	РКНК	
1	2	3	4
Справжня середня швидкість паливного струменя, м/с	56,08	9,86	5,7

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4
Справжня середня швидкість повітряного струменя, м/с	21,62	7,78	2,8
Витратний імпульс паливного струменя, Н	23,85	5,86	4,1
Витратний імпульс повітряного струменя, Н	37,87	13,03	3,0
Витратна кінетична енергія паливного струменя, Вт	668,3	57,74	11,57
Витратна кінетична енергія повітряного струменя, Вт	843	101,43	8,3
Питома енергія циркуляції, Дж/м ³	55,48	7,15	7,76
Кратність рециркуляції	1,84	1,19	1,55
Максимальний перепад температури по висоті робочої камери колодязя на початку/наприкінці нагрівання, °С	87/18	147/37	0,6/0,5
Середньодобове число циклів «посад – видача металу», прим	3,38	3,25	1,04
Максимальна температура підігріву повітря для горіння, °С	1100	600	1,8
Питома витрата палива на нагрів садки, кг у. - без урахування холостого ходу печі - з урахуванням холостого ходу печі	12 23,5	187 28,8	0,67 0,82
Коефіцієнт використання теплоти палива, %	75	50	1,5

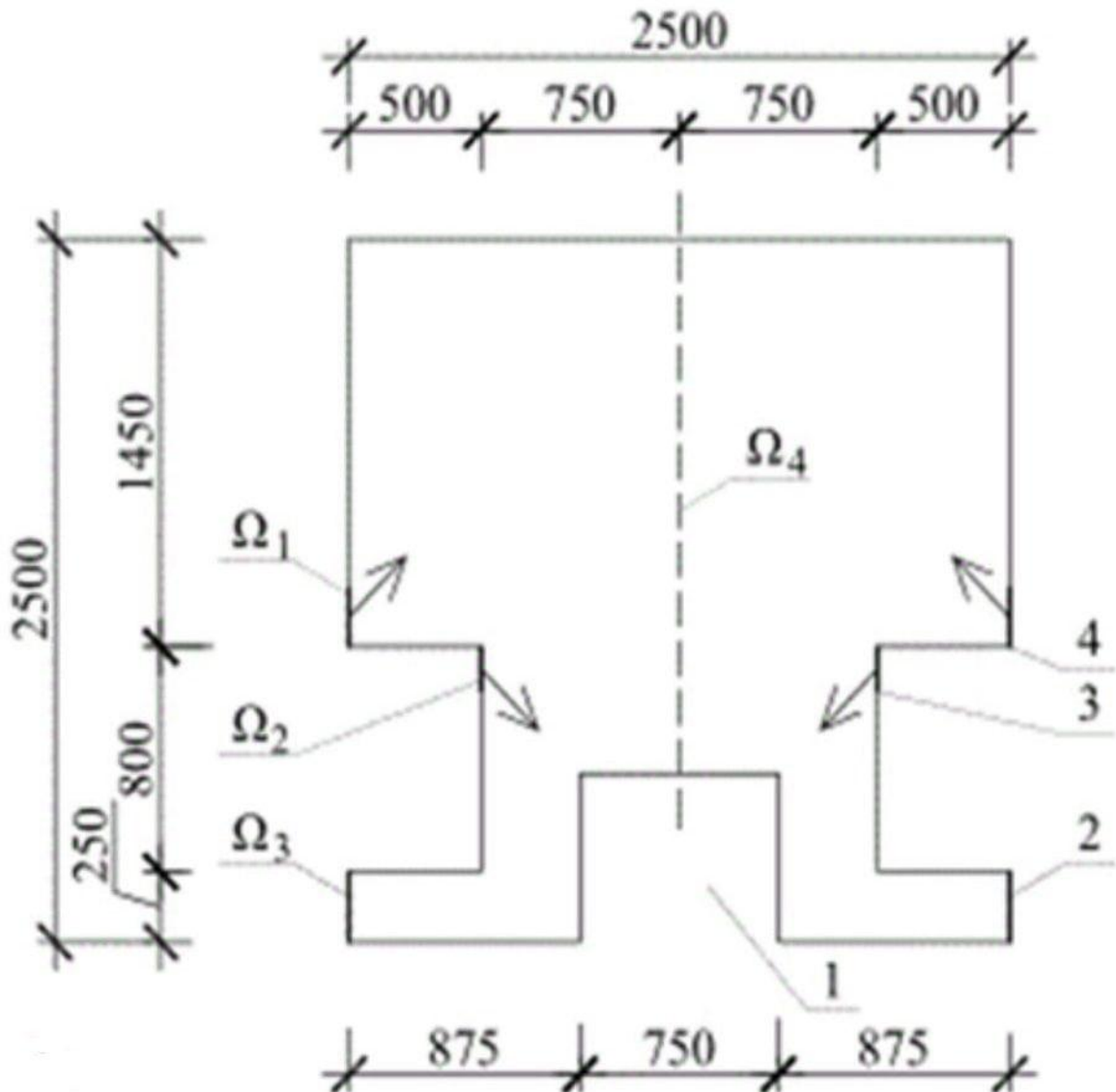
Аналіз проведених у роботах [86 - 88] досліджень показав можливість перерозподілу теплоти у камері печі, але для вибору керуючого впливу на теплові потоки потрібно більш детально з'ясувати фізичний механізм зазначеного процесу. Відомо, що продукти горіння палива іонізуються та мають позитивно й негативно заряджені іони [89 - 93], тому логічно припустити що за рахунок створення просторового електричного поля у камері печі залишки іонізованих часток продуктів у пічних газах будуть рухатися за напрямом прикладеного потенціалу. Оскільки створити математичну модель, яка буде одночасно характеризувати рух пічних газів та електричне поле досить складно, спочатку доцільно підтвердити реальність запропонованого способу управління, використавши у якості іонізованих складових пічних газів направлений у необхідному напрямку тепловий потік від додаткових, менш потужних ніж основні, пальників. А вже потім зробити кількісну оцінку зазначеного способу підвищення енергоефективності на реальних печах.

У зв'язку з цим поставлено задачу виконати чисельне моделювання турбулентного руху продуктів згорання в камерній печі за запропонованою схемою. Отримавши таким чином картину полів швидкостей газів в робочому об'ємі провести аналіз щодо ефективності їх використання у зоні розташування металевих виробів, що нагріваються у печі.

Для вирішення поставленої задачі дослідження були прийняті наступні основні допущення:

- 1) кладка камери печі адіабатна;
- 2) паливо повністю згоряє в пальнику і продукти згорання надходять у камеру з постійною температурою;
- 3) визначення характеру турбулентного руху в'язкого газу за допомогою RNG $k-\epsilon$ моделі, що пропонується для використання, адекватне [94].

Граничні умови. На рисунку 1.5 наведено розрахункову схему камери типової печі, що розглядається у двомірній постановці.



1 – металева заготовка, 2 – димовий канал, 3 – умовний пальник теплової
завіси, 4 – пальниковий пристрій печі

Рисунок 1.5 – Розрахункова схема камери печі

На границях Ω_1 та Ω_2 (вхід моделі) задаються значення компонентів вектору швидкості U_{in} , V_{in} , значення кінетичної енергії турбулентності k_{in} та швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ε_{in} . На границі Ω_3 (вихід моделі) задаються значення градієнтів параметрів $\varphi = \{V, P, k, \varepsilon\}$, де $\partial\varphi/\partial x = 0$.

На границі Ω_4 (вісь симетрії камери) задаються значення градієнтів $\partial\varphi/\partial y = 0$. На всіх інших границях (тверді поверхні) задаються наступні значення швидкостей і тиску $U = V = \partial P/\partial n = 0$, де n – нормаль до поверхні. Для моделі турбулентності використовується стандартна функція стінки [71].

Для визначення поля швидкостей використано рівняння Нав'є-Стокса у двомірній постановці:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = 0; \quad (1.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho UU) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho VU) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t \frac{\partial U}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_t \frac{\partial U}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (1.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho UV) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho VV) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_t \frac{\partial V}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_t \frac{\partial V}{\partial y}\right) - \frac{\partial P}{\partial y}; \quad (1.15)$$

де y, x – координати;

U, V – складові вектора швидкості;

P – тиск;

ρ – щільність;

μ_t – турбулентна динамічна в'язкість.

Для знаходження турбулентної в'язкості використано RNG k - ε модель, згідно з якою вона визначається за формулою:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1.16)$$

де C_μ – константа моделі турбулентності, $C_\mu = 0,09$.

Значення k і ε отримано з рівнянь:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G - \rho \varepsilon; \quad (1.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (1.18)$$

де μ – молекулярна динамічна в'язкість;

G – генерація турбулентної кінетичної енергії;

σ_k – турбулентне число Прандтля для дифузії k ;

σ_ε – турбулентне число Прандтля для дифузії ε ;

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ – константи моделі.

В задачі, що розглядається, турбулентні числа і зазначені константи мають такі значення:

$$\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 1,3; C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92.$$

Для моделювання полів швидкостей газів у камері було використано комплекс програм для чисельного моделювання, які дозволяють розрахувати рух газів з урахуванням турбулентності [71].

На рисунку 1.6 представлені результати моделювання вектору швидкості в центральній частині камерної печі.

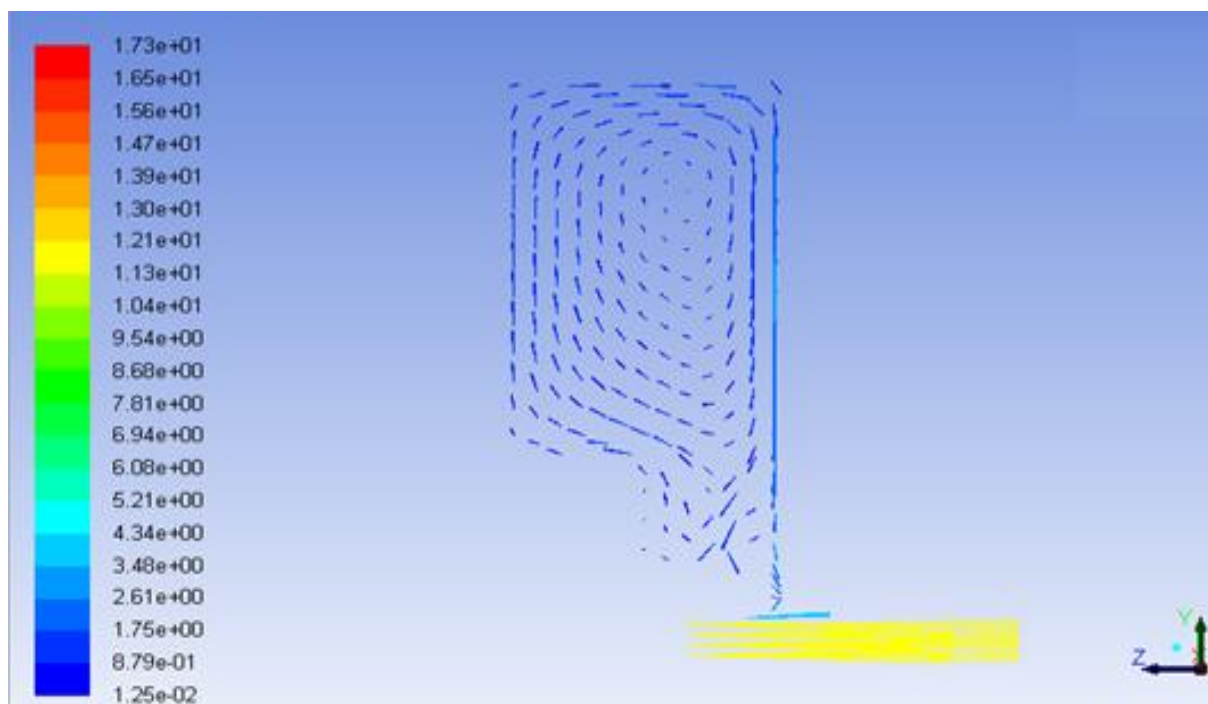


Рисунок 1.6 – Вектор швидкості в центральній частині печі

На рисунку 1.7 представлені результати моделювання вектору швидкості по вісі пальника та вісі димового каналу.

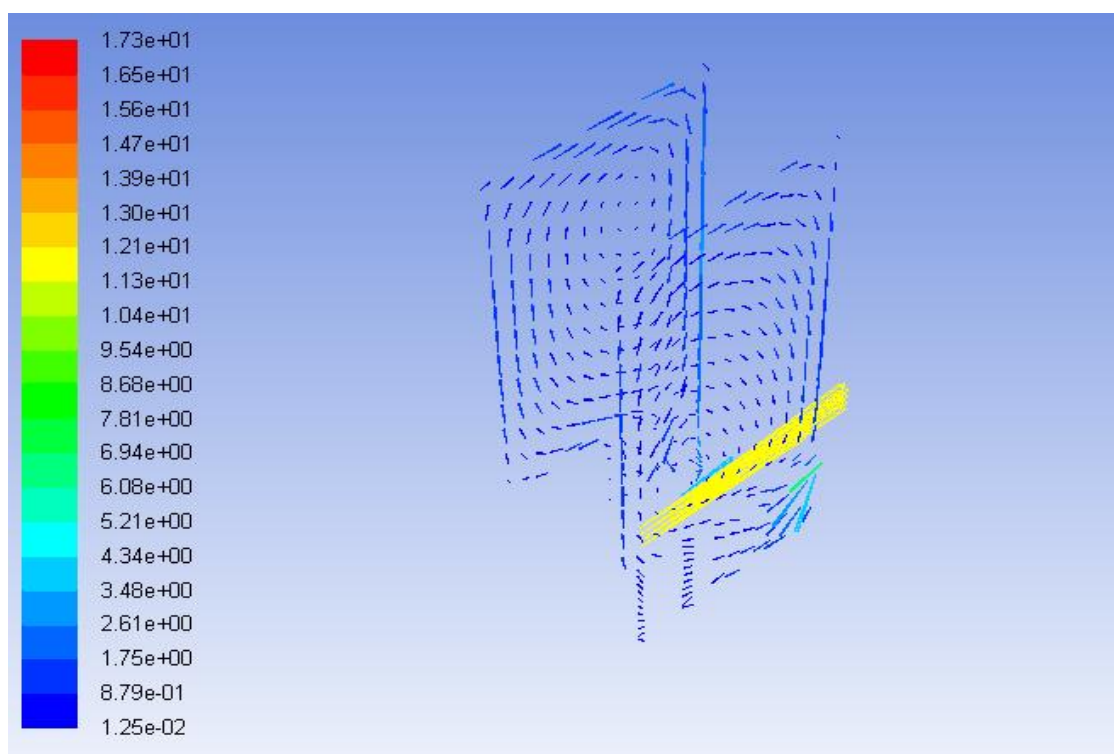


Рисунок 1.7 – Вектор швидкості по вісі пальника та вісі димового каналу

На рисунку 1.8 представлені результати моделювання ліній току пічних газів у робочому об'ємі печі.

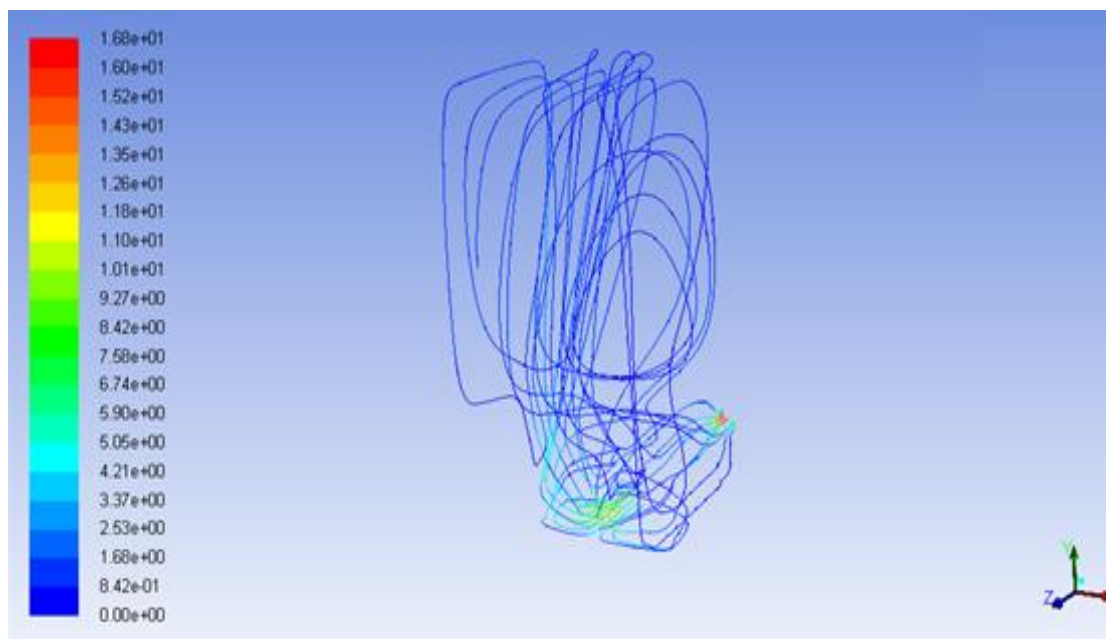


Рисунок 1.9 – Лінії току пічних газів у робочому об'ємі печі

На рисунку 1.10 представлені результати моделювання полів температур в центральній частині печі.

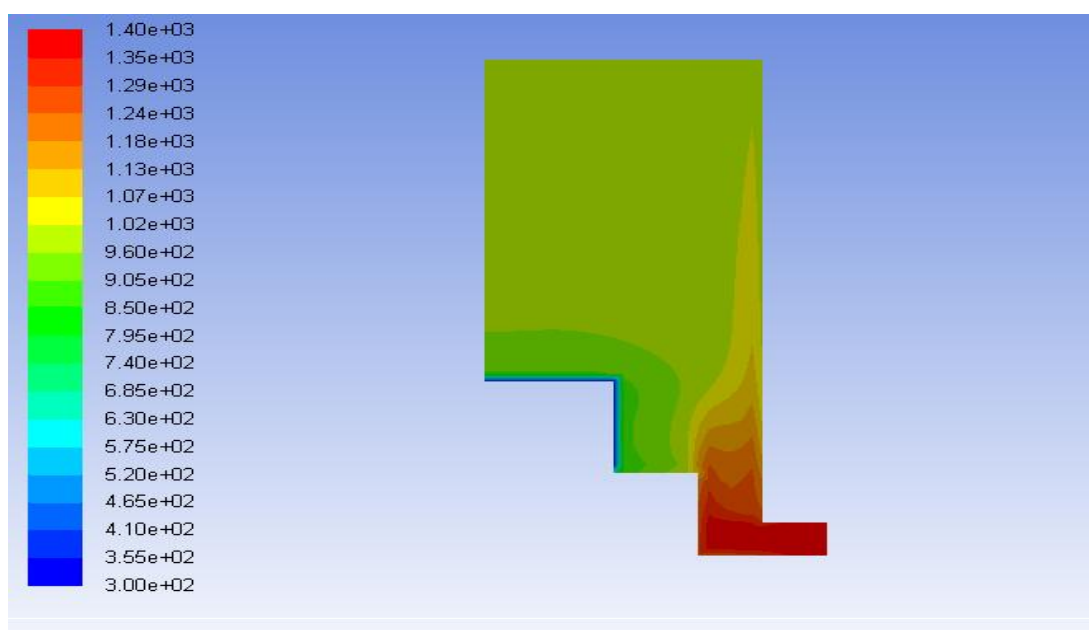


Рисунок 1.10 – Поля температур в центральній частині печі

На рисунку 1.11 представлені результати моделювання полів температур по вісі пальника та вісі димового каналу.

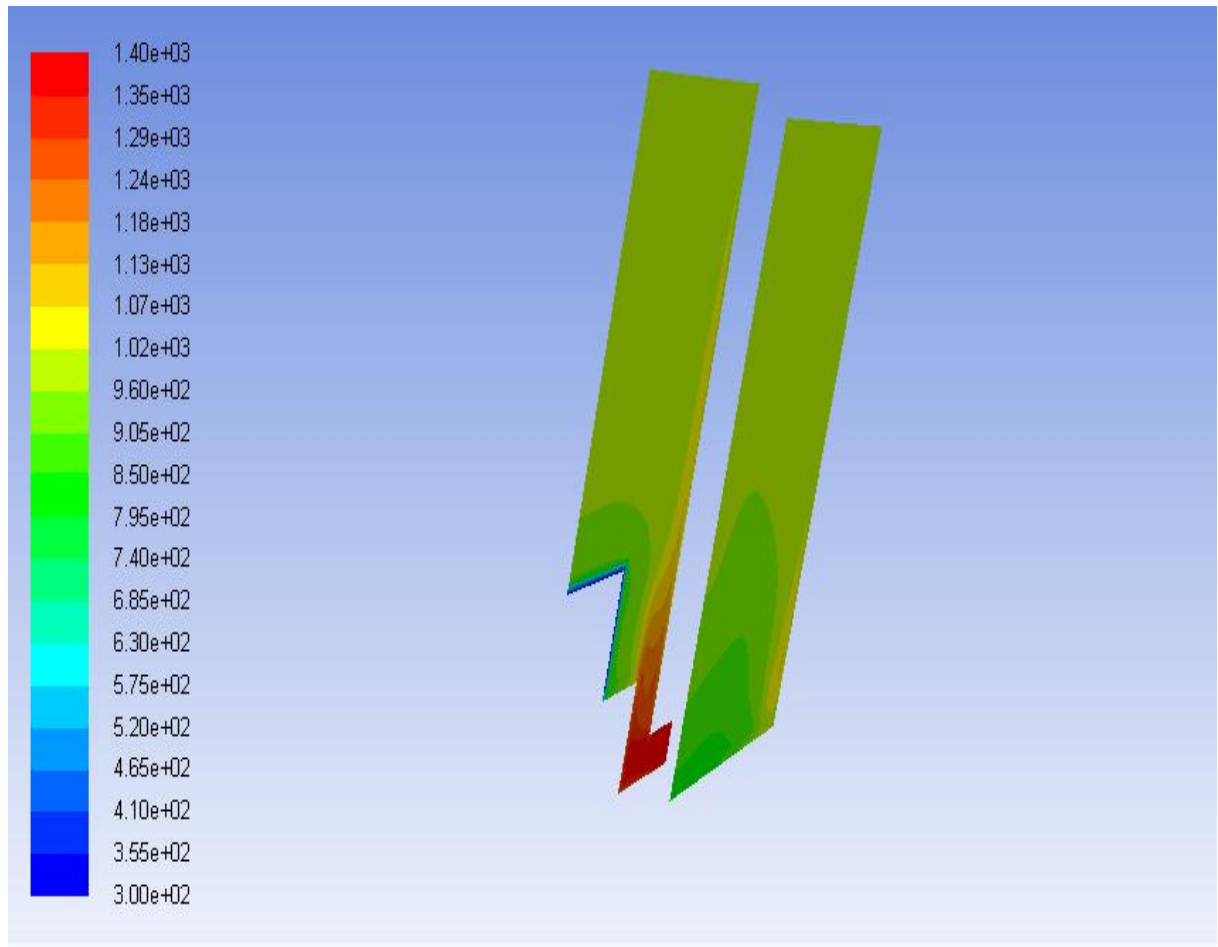


Рисунок 1.11 – Поля температур по вісі пальника та вісі димового каналу

У якості прикладу на рисунках 1.12 □ 1.15 представлені результати зазначених розрахунків моделювання при швидкості газової струї на виході з сопла пальника $w_T = 50$ м/с та $w_T = 100$ м/с.

Приведена лише половина розрізу робочого простору печі, тому що розв'язувалась симетрична задача [71]. Використаний комплекс програм для математичного моделювання дозволив кількісно дослідити циркуляцію газів у печі, що розглядається.

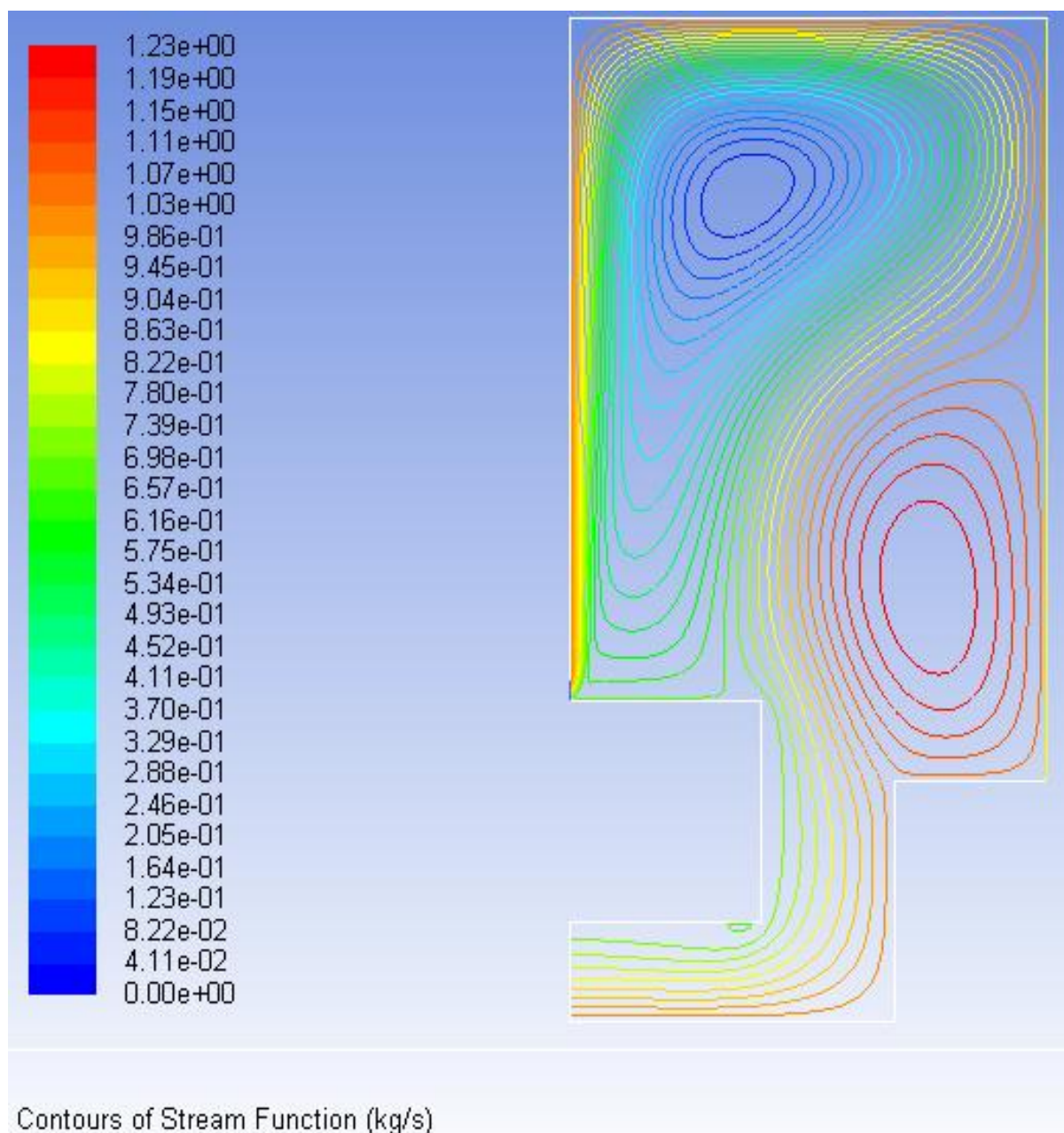


Рисунок 1.12 – Моделювання масових витрат пічних газів при швидкості газової струї на виході з сопла пальника $w_T = 50$ м/с без теплового бар'єру

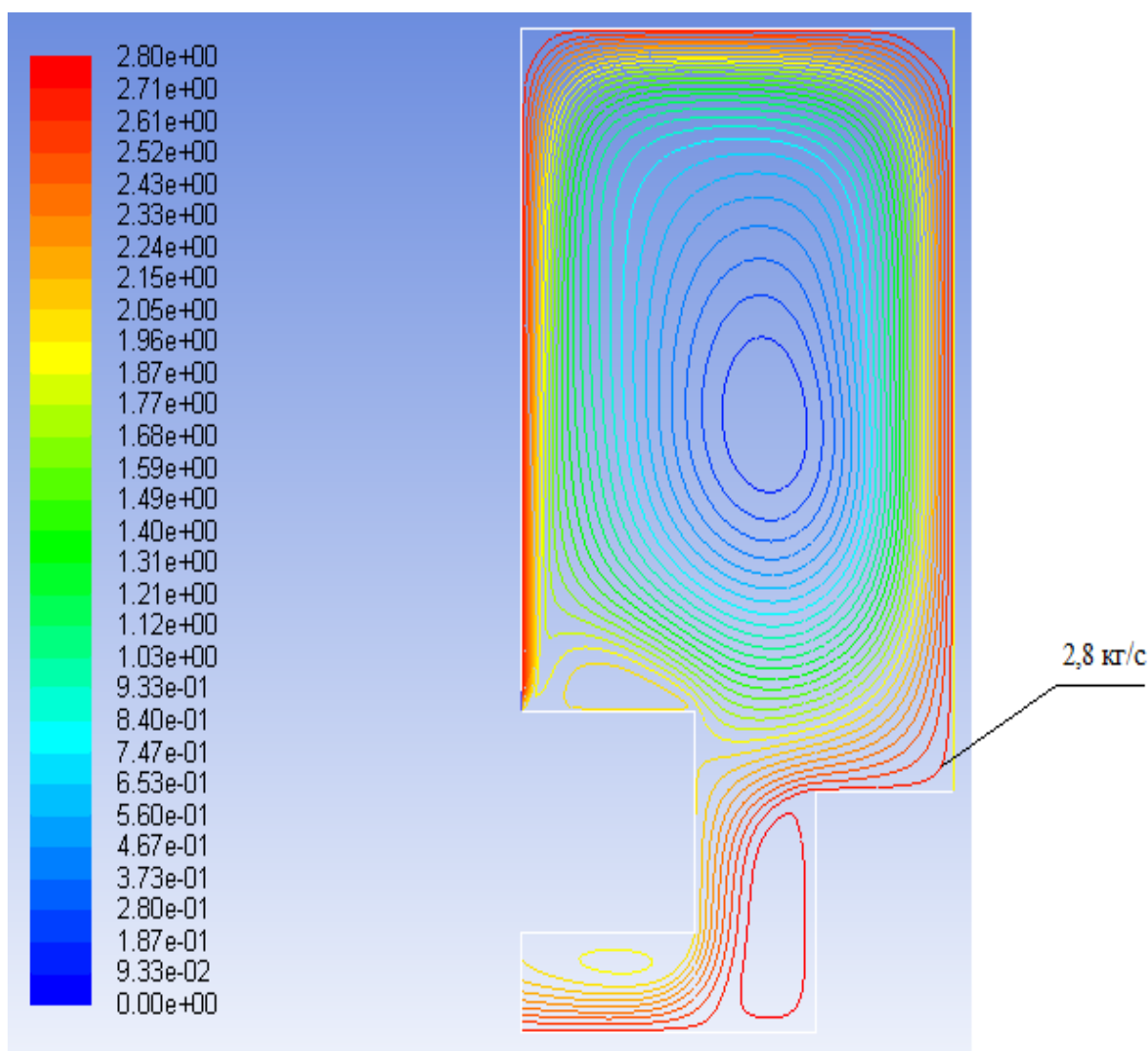


Рисунок 1.13 – Моделювання масових витрат пічних газів при швидкості газової струї на виході з сопла пальника $w_r = 100 \text{ м/с}$ без теплового бар'єру

Аналіз одержаних результатів показав, що основна кількість теплоти нагріває верхню частину печі і лише потім опускається вниз камери, де газовий потік у димовому каналі має рівномірну щільність і у незначній кількості контактує з металом. При цьому більша його частина просто видаляється з камери, не віддавши теплоти виробам, що нагріваються. Це призводить до перевитрати первинного енергоресурсу та зменшення енергетичної ефективності печі у цілому.

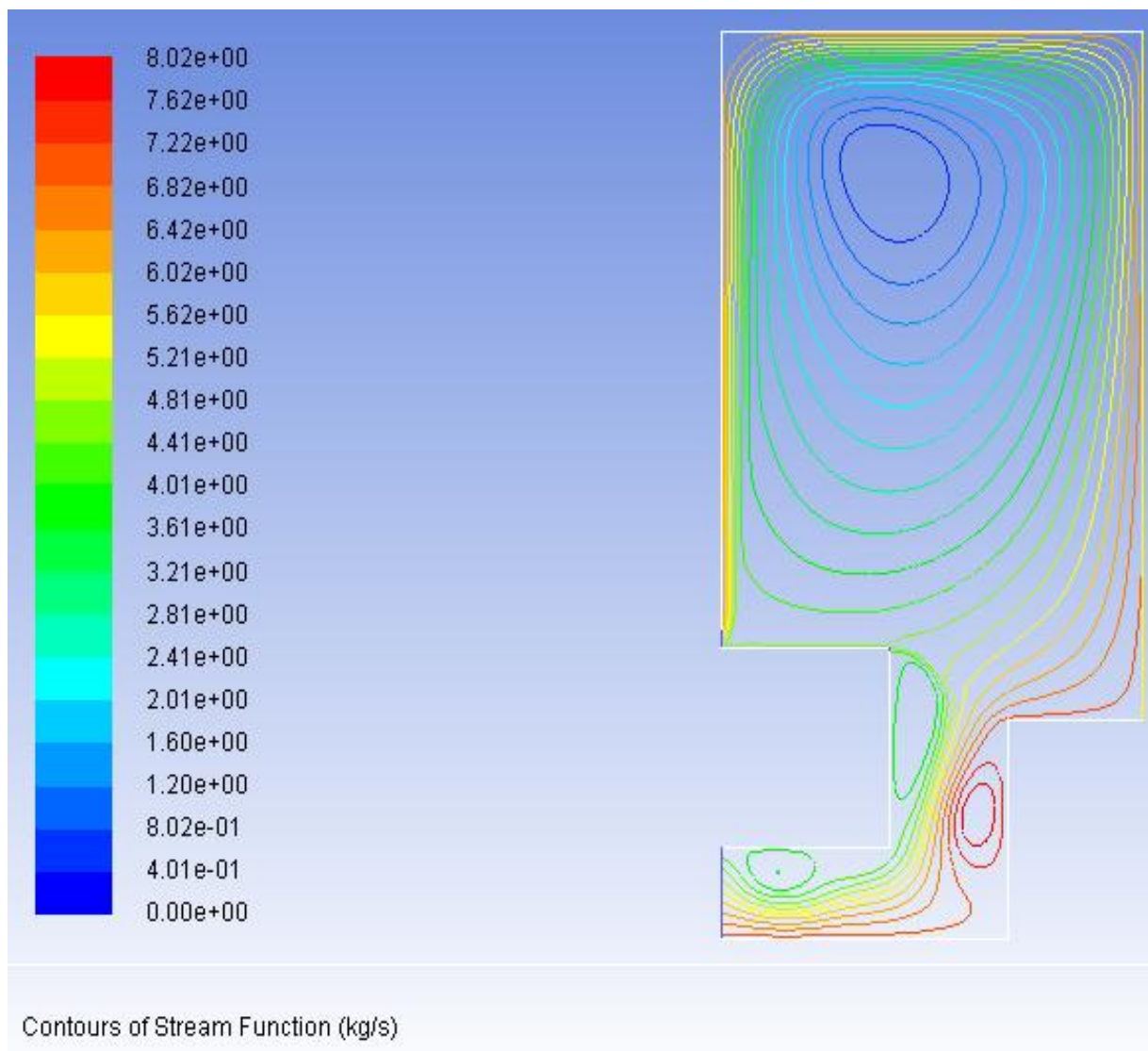


Рисунок 1.14 – Моделювання масових витрат пічних газів при швидкості газової струї на виході з сопла пальника $w_r = 50$ м/с з тепловим бар'єром

Аналіз результатів, одержаних за умови створення додаткового штучного теплового бар'єру показав, що масові витрати пічних газів у місці розташування садки з металом збільшується. Як видно з рисунку 1.15 створюються додаткові циркуляції пічних газів, що перешкоджають тепловому потоку відразу направлятися до димових вікон, чим і створюється більша їх щільність біля садки. Це дійсно може забезпечити більш ефективне використання теплоти у місці розташування металу та економію витрати палива і високу рівномірність нагрівання.

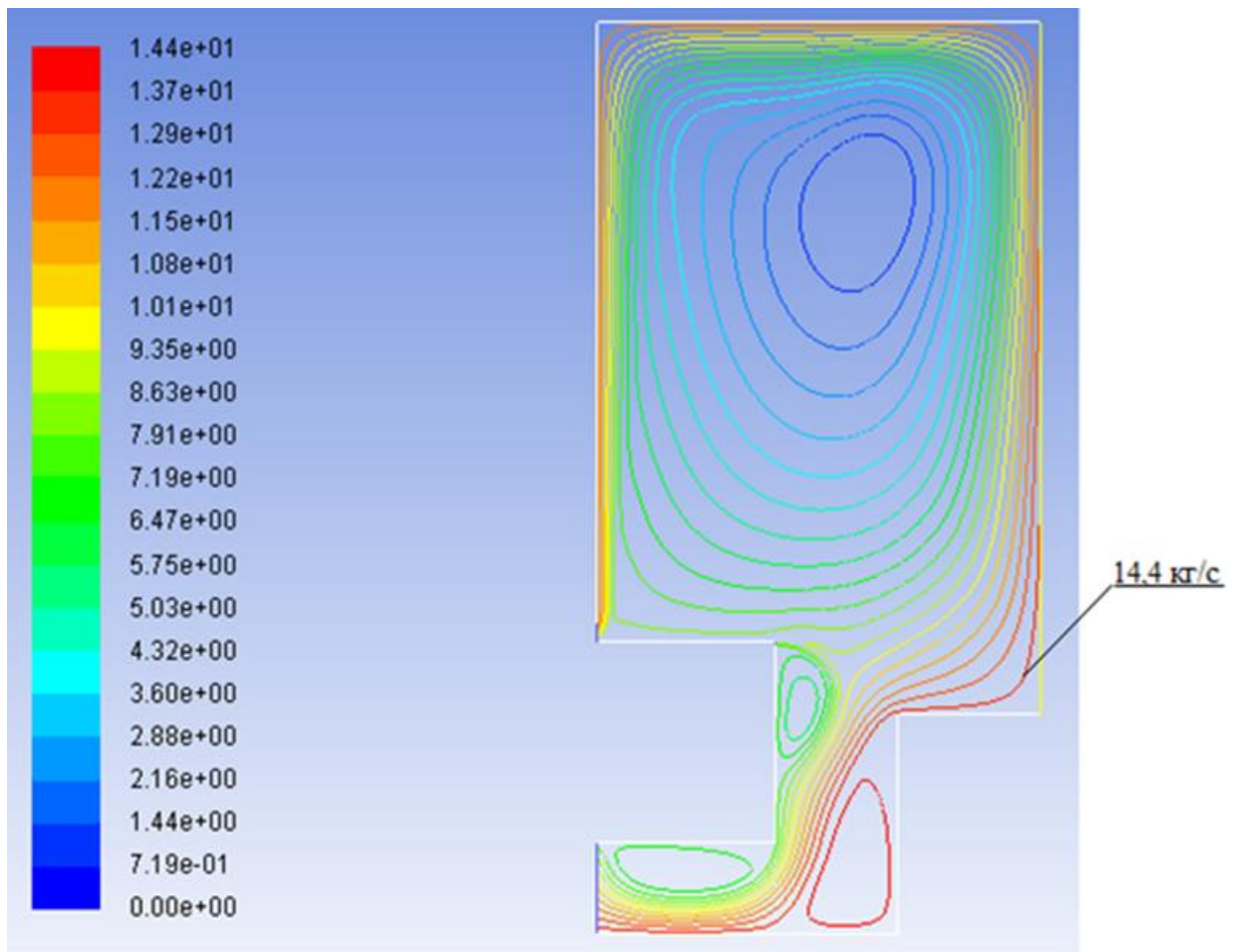


Рисунок 1.15 – Моделювання масових витрат пічних газів при швидкості газової струї на виході з сопла пальника $w_T = 100$ м/с з тепловим бар'єром

На рисунку 1.16 наведені, отримані в результаті проведених числових експериментів, масові обсяги пічних газів поблизу садки з металом при швидкостях газової струї на виході з сопла пальника 50 і 100 м/с при різних відсотках їх витрат на тепловий бар'єр у порівнянні з обсягами поблизу пальника.

Для уникнення струминного нагріву, який може порушити технологію термічної обробки металу та вплинути на його якість, на рисунку 1.16 прийнято максимальні витрати пічних газів на теплову завісу у порівнянні з їх кількістю поблизу пальника – 10 %. Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновок, що навіть невеликий зазначений відсоток достатній для значного зростання швидкості пічних газів у зоні розташування металу.

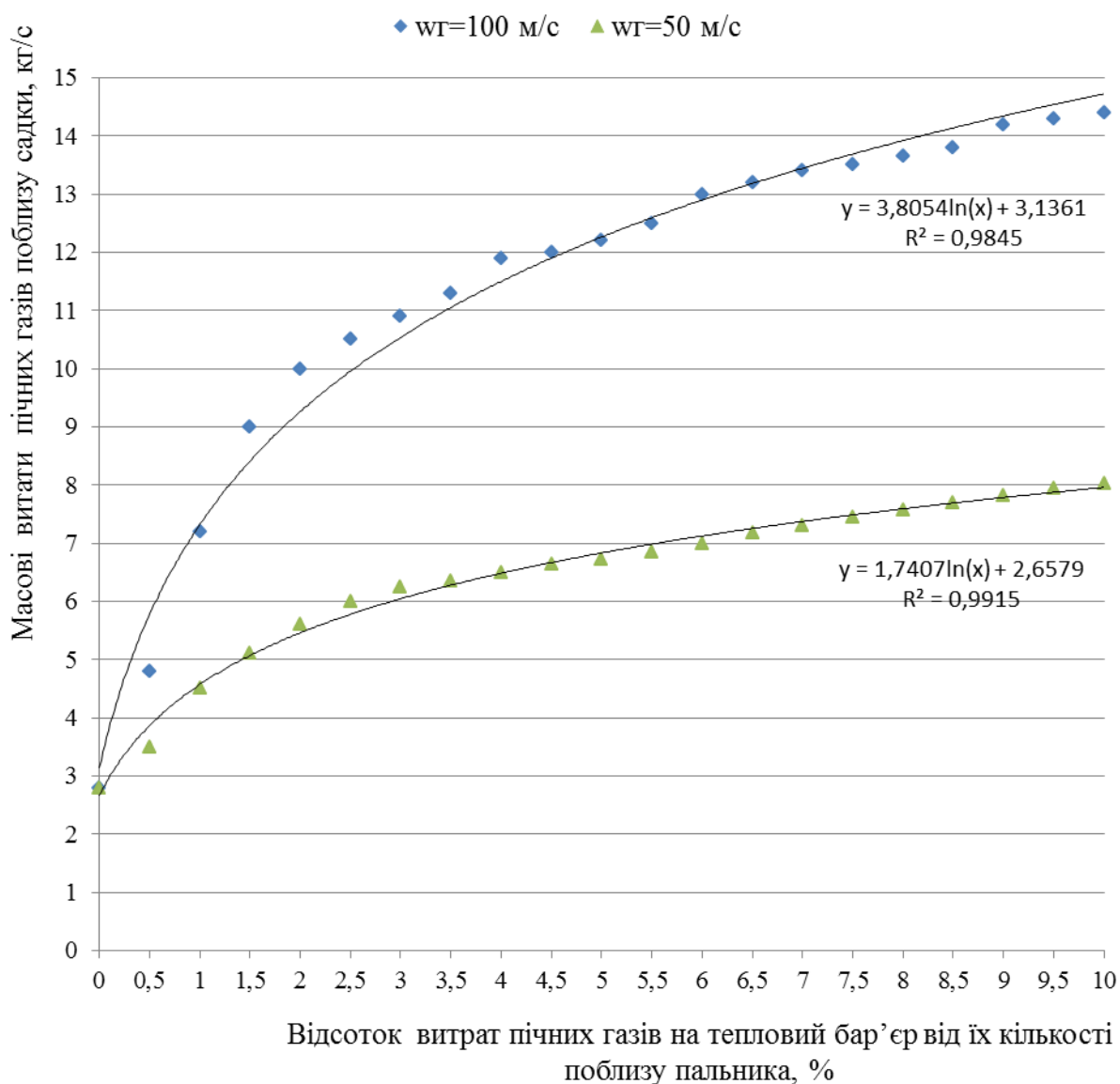


Рисунок 1.16 – Залежність масової витрати пічних газів у місці розташування металевих виробів від відсотка їх витрат на тепловий бар'єр

Таким чином, з метою більш ефективного використання теплової енергії у робочому просторі печі необхідно впровадження інноваційних способів управління тепловими потоками. То ж науковий інтерес викликає ідея створення теплової завіси у камері реально діючої печі задля збільшення масових витрат пічних газів у зоні розташування садки з металом шляхом руху іонізованих часток продуктів згоряння у необхідному напрямку під дією електричного поля.

1.3 Математичне планування експериментів

На теперішній час є доволі багато підходів для вирішення складних наукових задач, і в більшості випадків, вони вимагають підтвердження теоретичних досліджень експериментальними методами. Однак, проведення експериментів пов'язане з неабиякими фінансовими затратами та часто потребують тривалого часу. Наприклад, процес нагріву та охолодження камерної печі є довготривалим, тому при підготовці до проведення експерименту, необхідно скористатися математичним апаратом, направленим на зменшення кількості експериментів без втрачання якості та достовірності результату. Саме математичне планування спрямоване на розв'язання цієї задачі [47-62].

Відповідно до поставлених у роботі завдань і проведених теоретичних досліджень, наукову зацікавленість представляє з'ясування взаємозв'язків температури досліджуваного об'єкта (пластини, садки) та напруженості застосованого електричного поля, віддаленості об'єкту від іншого електроду (пальника), кутом нахилу пластини чи садки. Слід відзначити, що для перевірки теоретичних досліджень саме вищезазначені фактори були обрані як предикторні змінні.

Такі фактори, як зміна розміщення пальника, конфігурація теплового агрегату і подібне, не вивчалися із-за причин, які зазначені у попередніх розділах.

Необхідно зазначити, що задля визначення предикторних змінних при проведенні теоретичних досліджень, зіштовхнулися з дилемою. Як відомо, є функціональна лінійна залежність напруженості електричного поля від відстані та напруги. Іншими словами, якщо збільшується відстань, з'являється потреба збільшення напруги, але при цьому ще потрібно утримувати необхідну напруженість. Інакше кажучи, на перший погляд можливо логічно виключити таку змінну, як відстань, для спрощення поставленої задачі. Однак, з іншого боку, це - неоднозначний підхід, тому що

переміщення продуктів згоряння є складним процесом і кількість теплової енергії зменшується на шляху до об'єкту досліджень. Отже, для вирішення задачі необхідно врахувати такий фактор, як віддаленість між електродами.

З математичного погляду на задачу планування експерименту виходили із таких понять : напруженість E впливає на тепломасообмін та відповідно до нашого припущення температура об'єкта підвищується при збільшенні E . Отже, цей показник повинен бути, можливо максимальним $E \rightarrow \max$. Міжелектродна відстань h представляє зацікавленість із енергетичної точки зору, іншими словами, при зменшенні відстані зменшується і прикладена напруга, а це означає, що зменшуються і енерговитрати. Даний показник цікавить тільки з теоретичної точки зору та необхідний для виконання перевірки припущень щодо впливу електричного поля на розподіляння температурних полів у камерній печі. В результаті було вирішено враховувати даний фактор при плануванні проведення експериментальних досліджень. Насправді ж пальник («+» електрод) і садка («-» електрод) розміщені стаціонарно, отже регулювання напруження електричного поля можливе тільки напругою. І, зрештою, також, третій показник, це - кут нахилу пластин α .

Щоб реалізувати поставлену мету необхідно вирішити ряд першочергових задач:

- експериментальним методом на фізичній установці зробити перевірку можливості перерозподілу теплових потоків за допомогою створеного електричним способом теплового бар'єру з іонізованих частинок продуктів горіння;
- зробити дослідження щодо відстані, на якій можуть зберігатися іонізовані частки продуктів горіння та порівняти її з реальними розмірами промислових агрегатів;
- дослідити вплив кутів нахилу заготовок, які нагріваються, на перерозподіл потоку тепла у камері промислової печі.

Експериментальні дослідження проводимо у такій послідовності:

- 1) за умови можливості зміни положення та кута нахилу до поздовжньої вісі нагрівальної камери, розташовуємо пластини-електроди на двох вибраних відстанях від пальника у напрямку переміщення відхідних газів;
- 2) з метою вимірювання температури пластин за допомогою лазерного пірометра (безконтактний прилад), створюємо оглядові віконця необхідного розміру в місцях розташування зазначених пластин;
- 3) зафіксуємо положення верхньої пластини на одній з двох можливих відстаней від поздовжньої вісі камери;
- 4) встановлюємо кут нахилу пластини 0° щодо відношення до поздовжньої вісі камери;
- 5) вимірюємо температуру пластин на початку досліджень;
- 6) підключити пластини-електроди до джерела постійної напруги від 0 до 1000 В;
- 7) виміряти температуру пластин після 20 хвилинного розігріву камери експериментальної установки;
- 8) збільшити напругу до заздалегідь вибраної величини після охолодження кладки установки до вихідного стану;
- 9) повторюємо пункти сім та вісім до максимальної напруги у 1000 В;
- 10) змінюємо положення пластин на інше з можливих та повторюємо пп. 7- 9;
- 11) крок за кроком збільшуємо нахил пластин на завчасно обрану величину до відмітки значення кута нахилу менше 90° ;
- 12) при кожному збільшенні кута нахилу пластин повторюємо пункти 7- 9;
- 13) відключаємо верхні пластини та підключаємо більш віддалену пару пластин до джерела постійної напруги;

14) повторюємо пункти від 3 до 12;

15) вимикаємо джерело постійної напруги та охолоджуємо експериментальну установку після виконання пп. 11 та 12.

Вищезазначена послідовність дій проведення експериментів виконується за двома видами джерела напруги: на пальнику створюється полярність «-», а на пластині - полярність «+» та навпаки.

Отже, при виконанні досліджень було вибрано декілька параметрів, які можуть вплинути на розподілення температури всередині установки :

E – напруженість електричного поля (В/м),

h – відстань між пластинами-електродами (м),

α – кут нахилу пластин по відношенню до повздовжньої вісі (радіан).

Крім того, враховувалась і полярність напруги, яка подавалась. Діапазон змінення вищезазначених параметрів наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Діапазон можливих значень параметрів, що враховуються в експериментах

Параметр	Мінімальне значення	Максимальне значення
E (В/м)	0	1000
h (м)	0,280	0,500
α (рад)	0	1,57

1.4 Експериментальна установка для проведення досліджень впливу електричного поля на теплові потоки

Задля виконання вищевказаних експериментальних досліджень щодо оцінки впливу електричного поля на перерозподіл потоків тепла у камері нагріву теплоустановки, було розроблено і створено спеціальну пічну установку [82,83], загальний вигляд якої наведений на рисунку 1.18.



Рисунок 1.18 – Загальний вигляд експериментальної установки

Газовий пальник експериментальної дослідної установки показано на рисунку 1.19., а димосос установки на рисунку 1.20, а газовий лічильник на рисунку 1.21.



Рисунок 1.19 – Газовий пальник експериментальної нагрівальної установки



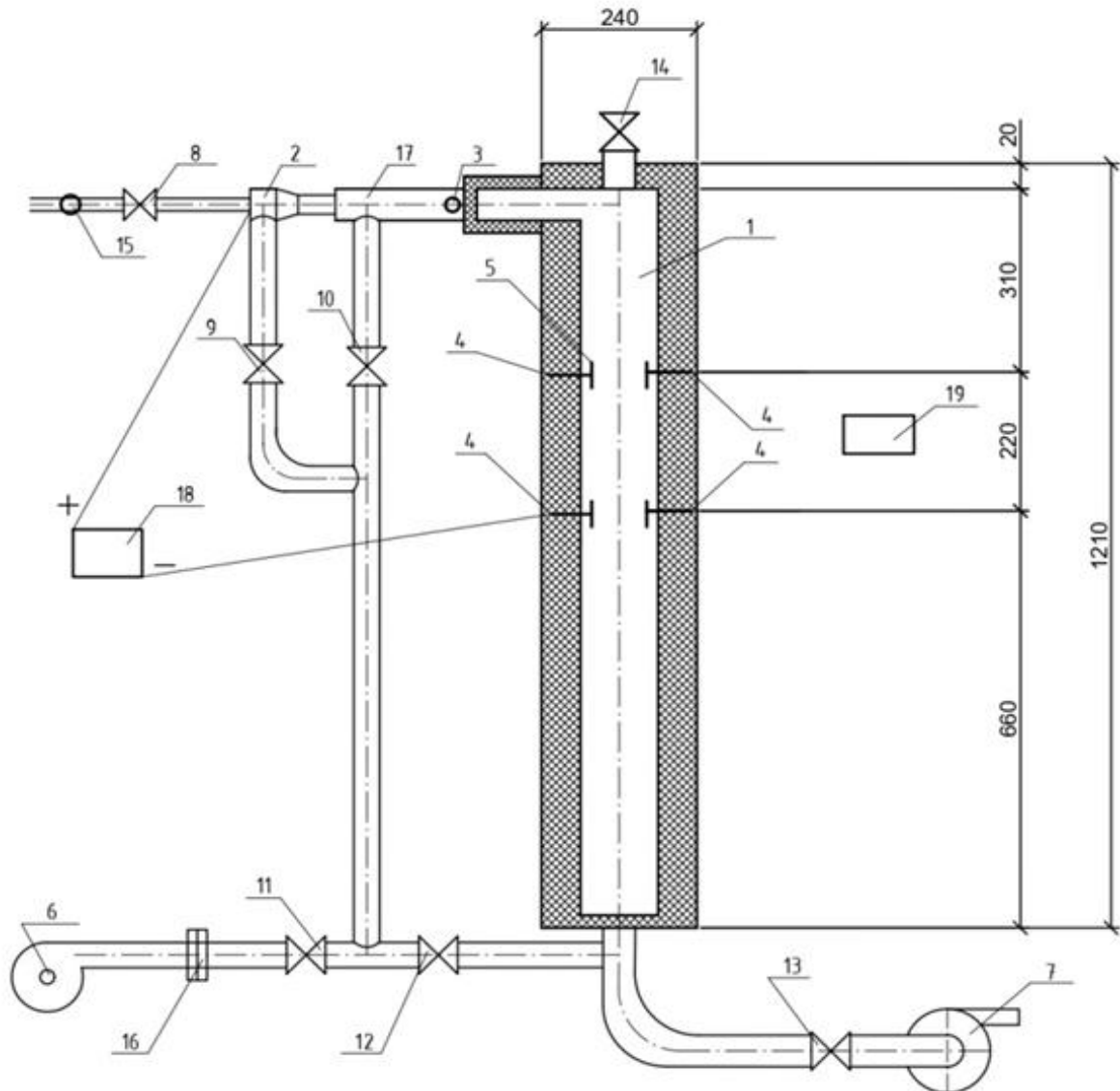
Рисунок 1.20 – Димосос експериментальної нагрівальної установки



Рисунок 1.21 – Газовий лічильник Gallus 2000 G4

Експериментальна нагрівальна установка з робочою камерою з внутрішніх розмірів: $0,192 \times 0,192 \times 1,1$ м. Футеровка енергетичної установки виконана з вогнетривкої цегли. Вимірювання температури проводилося дистанційно, за допомогою спеціальних отворів, які виконані з вогнетривкого скла. Максимальна теплова потужність пальника складала 77 кВт. Вимірювання витрати повітря та природного газу проводилося газовим лічильником Gallus 2000 G4, витрата природного газу - $0,04 \text{ м}^3/\text{хв}$. Дана установка давала можливість зміни напруги у відповідності до необхідної напруженості в діапазоні від 0 до 1000 В [82,83].

Принципову схему експериментальної установки представлено на рисунку 1.22.



1 – камера установки; 2 – газовий пальник; 3 – електроіскровий запальник; 4 – електрод, до якого приєднані пластина; 5 – рухлива пластина, на яку подається напруга; 6 – повітродувка; 7 – димовсмоктувач; 8 – 14 – арматура регулювання згоряння; 15 – лічильник газу; 16 – вимірювальна діафрагма; 17 – додаткова камера; 18 – джерело електричної напруги; 19 – лазерний пірометр.

Рисунок 1.22 – Принципова схема експериментальної нагрівальної установки

Електричний пристрій, який застосовувався при проведенні експериментів показано на рисунку 1.23, а лазерні пірометри для виміру температури пластин на рисунку 1.24.

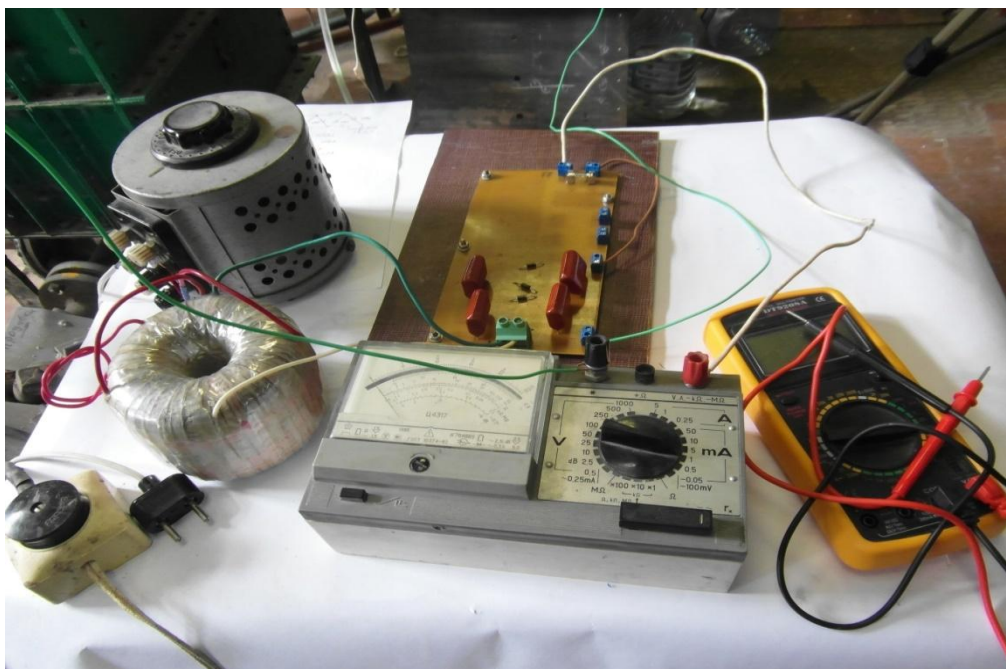


Рисунок 1.23 – Електричний пристрій для проведення експериментів



Рисунок 1.24 – Лазерні пірометри, які були використані при проведенні натурних експериментів

1.5 Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень

Одержані результати проведених експериментальних досліджень дали можливість набрати достатню кількість статистичних даних про залежність температури пластин від величини та полярності напруги, яка на них подавалась, а також визначена динаміка нагріву в конкретних точках робочого простору печі [82,83]. А це дало можливість зробити висновки щодо можливості та ефективності керування потоками тепла електричним полем. Результати досліджень наведено на рис. 1.25 □ 1.32.

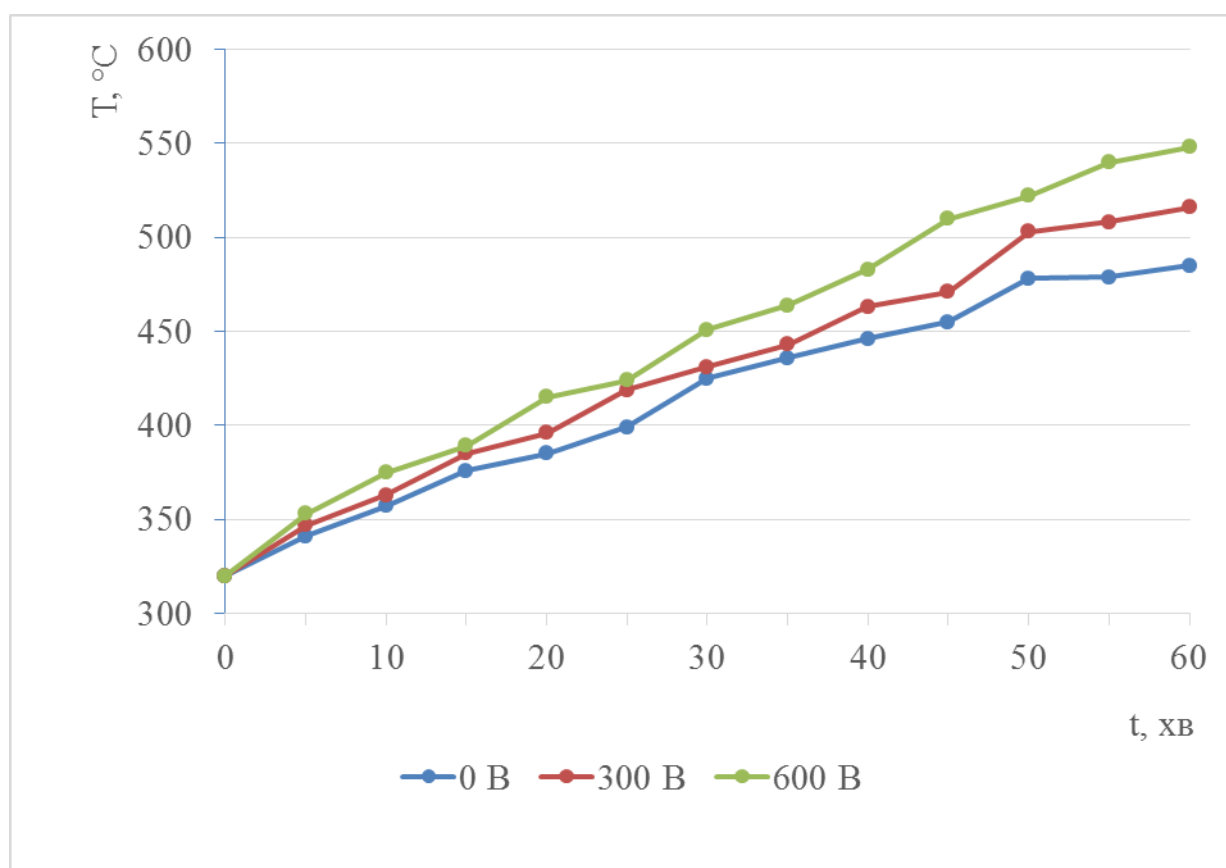


Рисунок 1.25 – Температура верхніх пластин, при подачі на них напруги 0 В, 300 В та 600 В

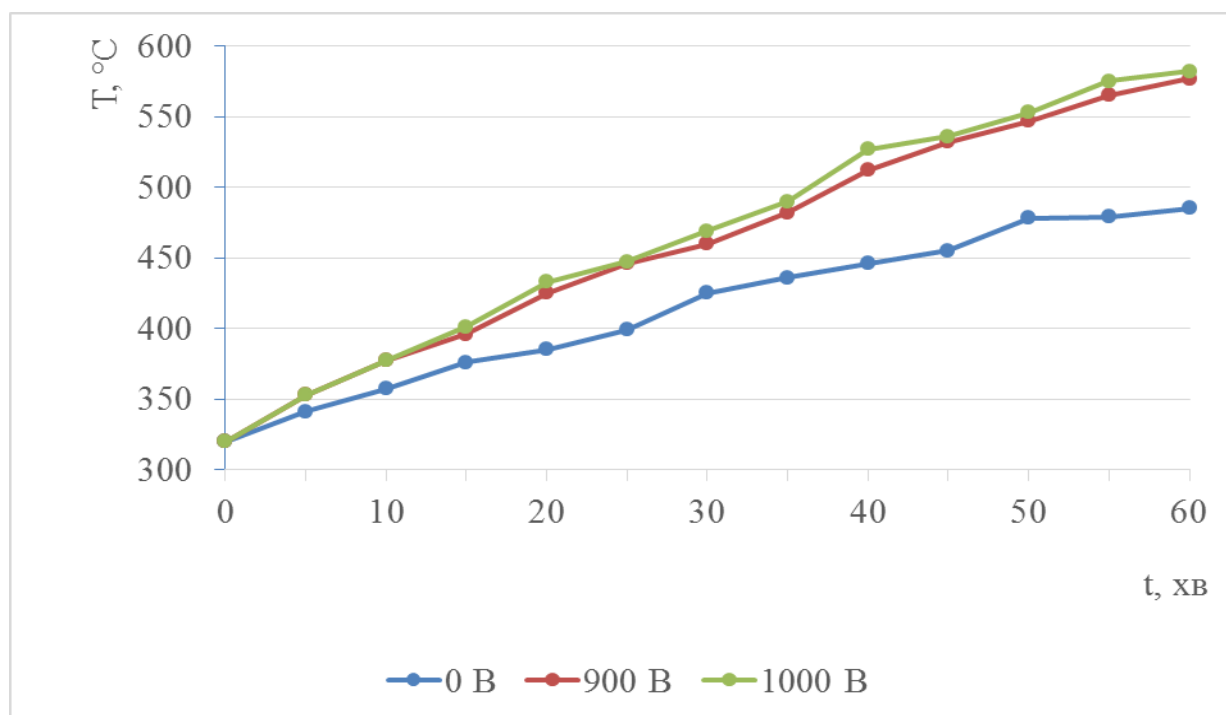


Рисунок 1.26 – Температура верхніх пластин, при подачі них напруги 0 В, 900 В та 1000 В

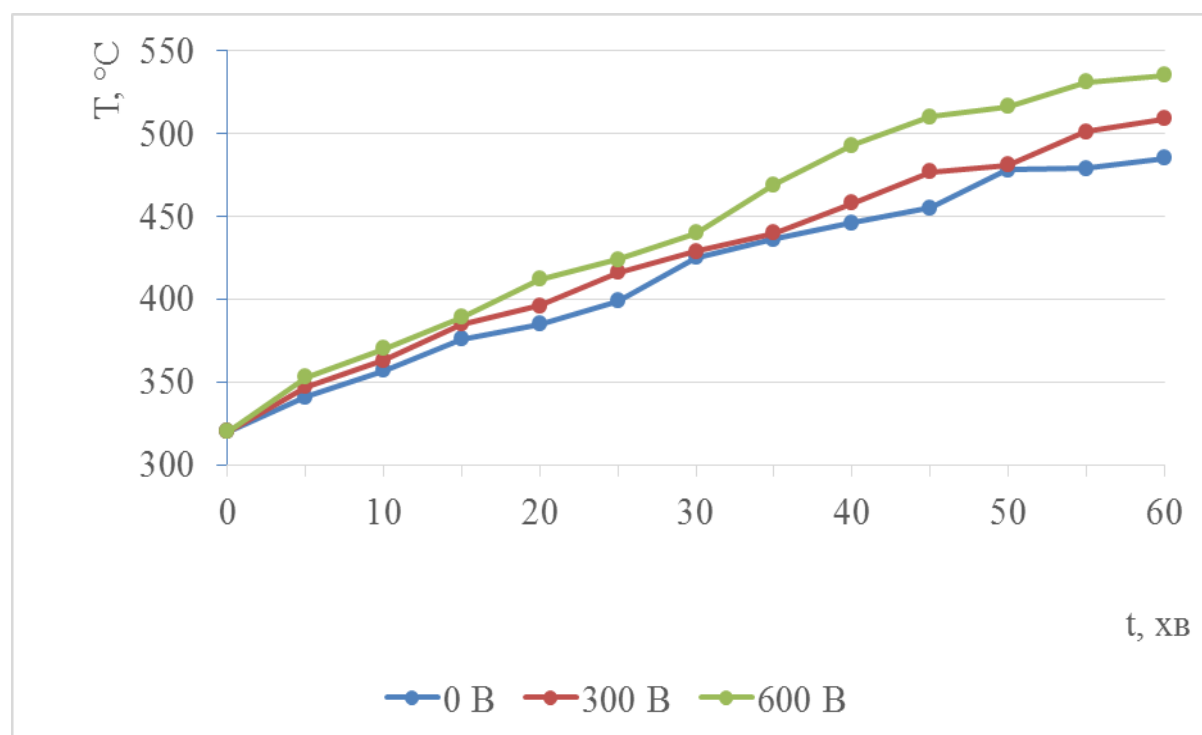


Рисунок 1.27 – Температура нижніх пластин, при подачі напруги 0 В, 300 В та 600 В на верхні пластини

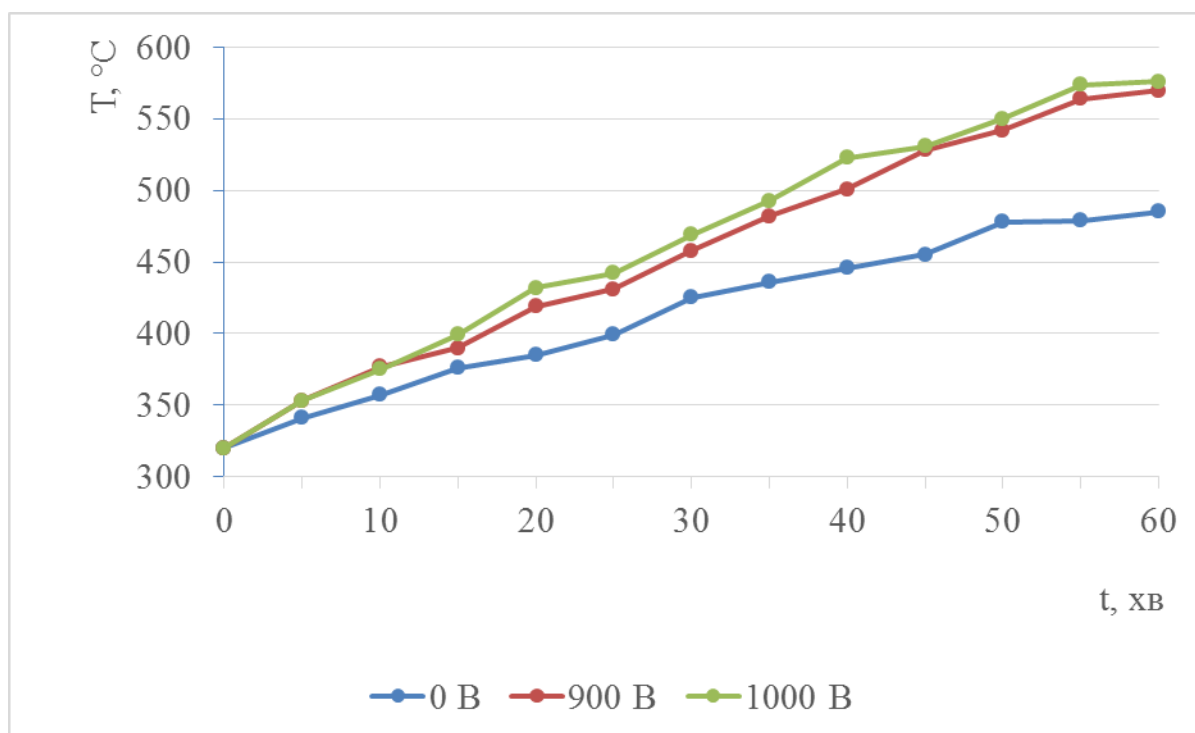


Рисунок 1.28 – Температура нижніх пластин, при подачі напруги 0 В, 900 В та 1000 В на верхні пластини

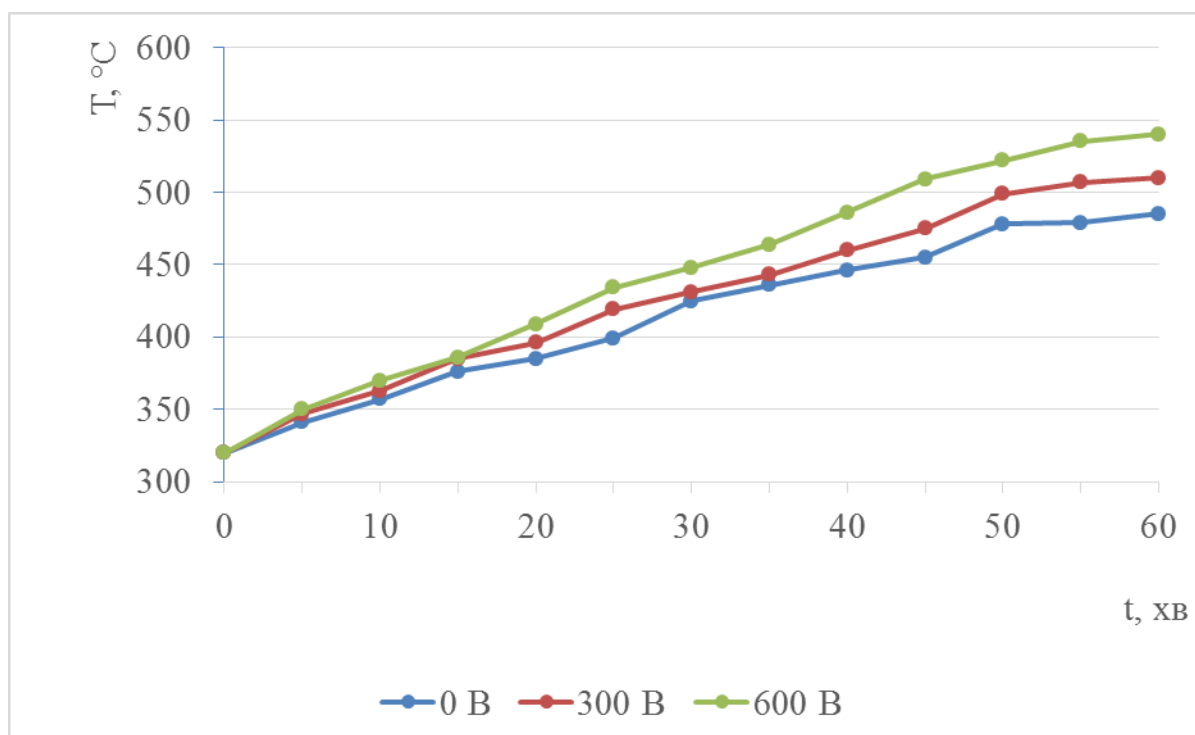


Рисунок 1.29 – Температура верхніх пластин, при подачі напруги 0 В, 300 В та 600 В на нижні пластини

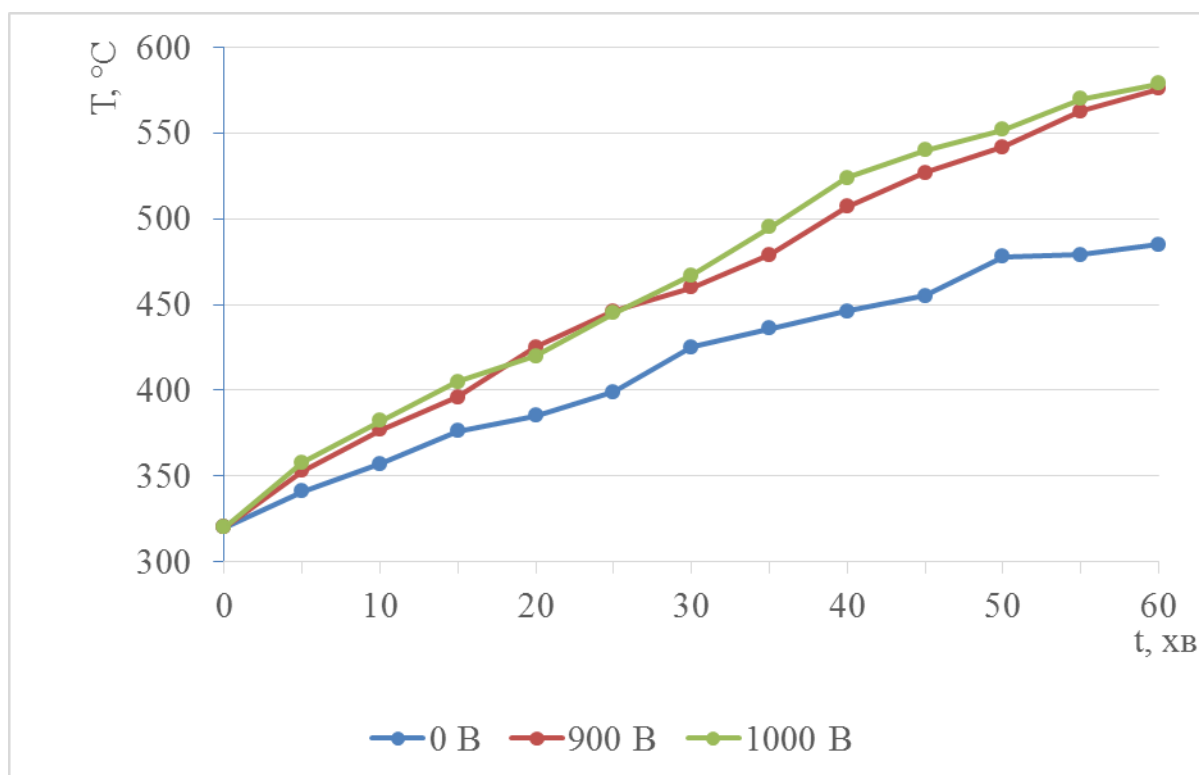


Рисунок 1.30 – Температура верхніх пластин, при подачі напруги 0 В, 900 В та 1000 В на нижні пластини

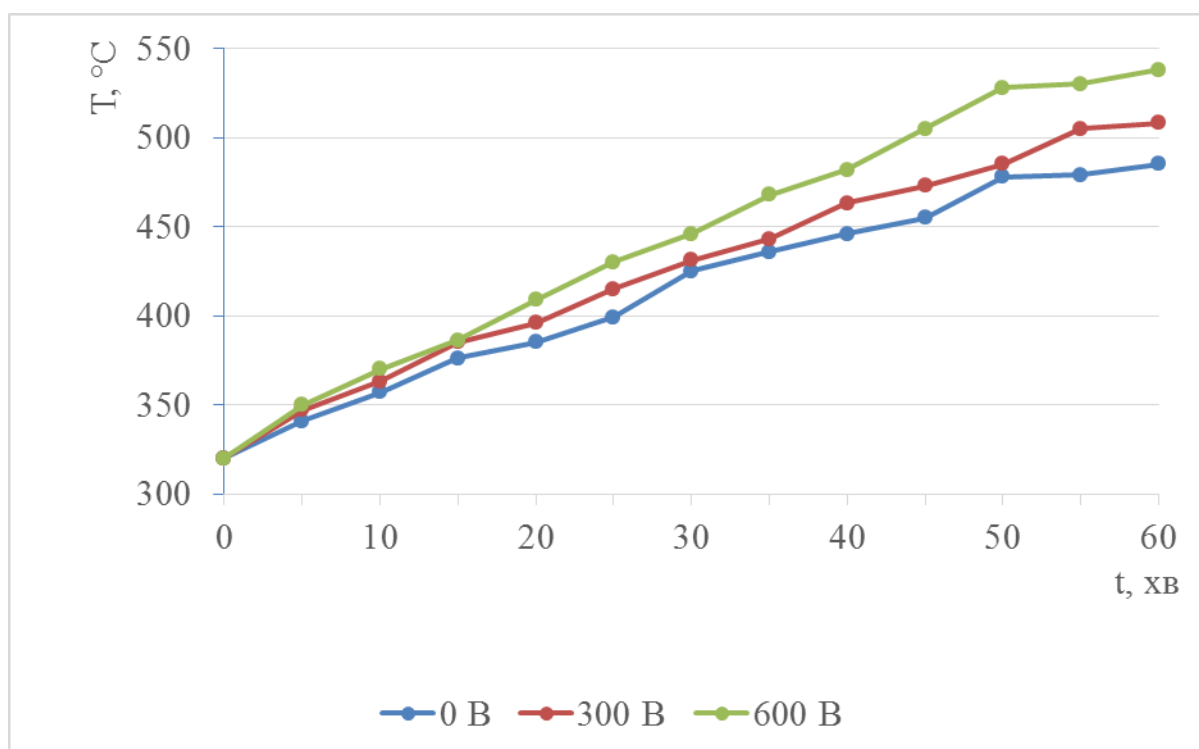


Рисунок 1.31 – Температура нижніх пластин, при подачі напруги на них 0, 300 В та 600 В

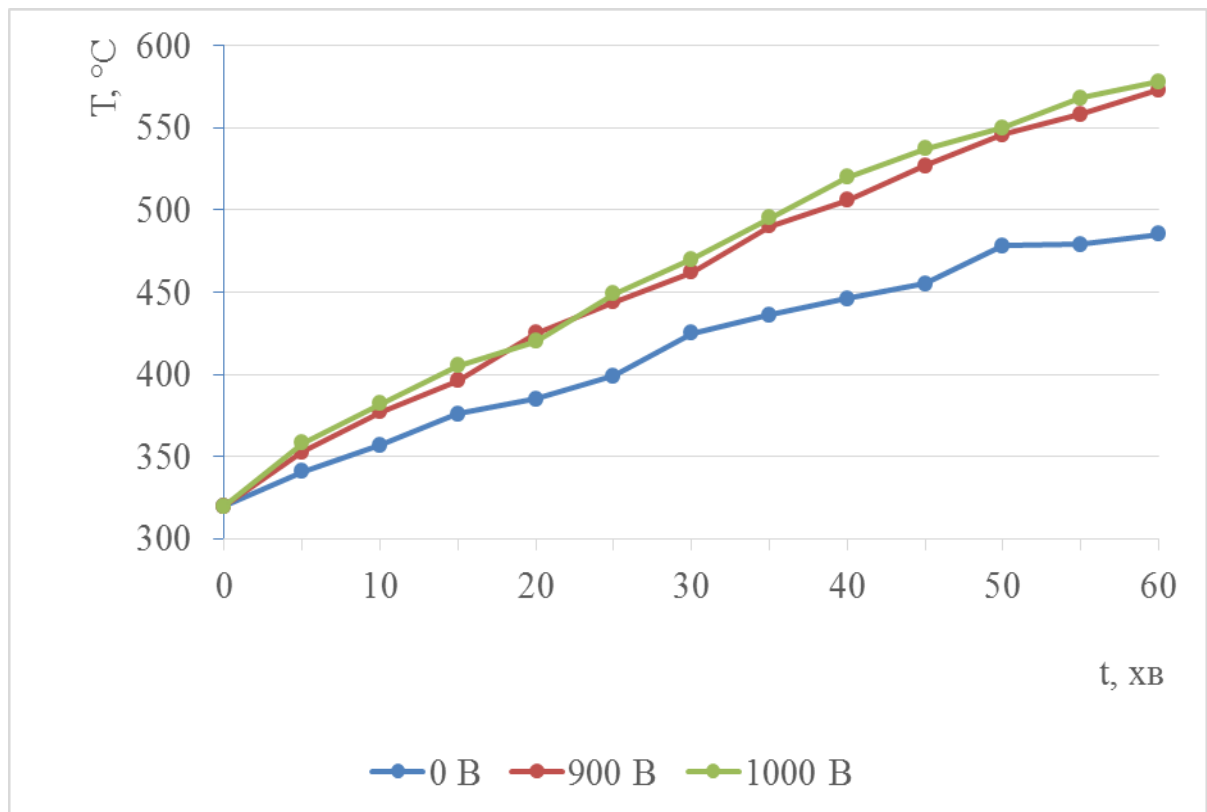


Рисунок 1.32 – Температура нижніх пластин, при подачі напруги на них 0, 900 В та 1000 В

Із вищенаведених графіків бачимо, що температури пластин збільшуються, але проявляється різна динаміка їх нагріву у відповідності з прикладеною напругою. Доволі більший ефект виявляється на верхніх пластинах. Це можна пояснити тим, що при відсутності електричного поля повздовжня швидкість потоку тепла викликана тільки аеродинамічною складовою та буде вищою у верхній частині об'єму печі, а при подальшому проходженні димових газів по камері печі вона буде зменшуватися.

Під дією потенціалу утворюється поперечна електрична сила, яка залежить від його величини і спонукає заряджені частинки відхилитися від заданої траєкторії та перегородити шлях для другої частини потоку. Тобто, ефект цього способу керування тут буде більшим. Можливо допустити, що ефект впливу електричного поля на достатньому рівні буде зберігатися і на більшому розташуванні пластин від пальника при умові забезпечення

необхідної напруженості електричного поля, а це важливо для практичного застосування запропонованого способу.

При проведенні експерименту була підтверджена можливість одержувати очікуваний ефект, якщо змінити відстань між пластинами-електродами та напругу між ними, інакше кажучи напруженість електричного поля. Однак, з технологічної точки зору, зміна відстані між електродами є недоцільною із-за додаткових ускладнень конструкцій нагрівальної установки. Окрім того, в ході проведення експериментальних досліджень, при змінюванні відстані між електродами, були виявлені інші додаткові ефекти при проходженні продуктів згорання, які утруднювали проведення аналізу отриманих результатів. У зв'язку з вищезазначеним, було вирішено використати напругу головним чинником регулювання напруженості електричного поля.

Отже, у такий спосіб, на фізичній моделі експериментально підтверджена можливість перерозподілу потоку тепла електричним способом [82,83]. Іонізовані частки продуктів згорання створюють тепловий бар'єр основному потоку тепла, в результаті останній щільніше прилягає до пластини та набагато більше нагріває її. Кількість заряджених частинок продуктів згорання у тепловому потоці на відстані (0,5...2 м) від пальника є достатньою для отримання зазначеного теплового бар'єра. Для одержання необхідного теплового бар'єру, сукупність заряджених частинок продуктів згорання в потоці тепла на відстані від 0,5 м до 2 м від пальника являє собою достатню їх кількість.

1.6 Синтез математичної моделі пічної установки з електричним полем

З метою одержання повного уявлення щодо впливу електричного поля на теплові процеси у камері теплової установки була розроблена математична модель, за допомогою якої можна визначити температуру нагріву у конкретно заданому місці камери при різних значеннях

електричних і технологічних параметрів [82]. Для цього були виконані необхідні досліди з урахуванням специфіки поставлених завдань, які зазначені у вищевикладених розділах. Для досягнення максимальної точності прогнозу, при цьому враховуючи необхідність мінімізації кількості проведення операцій та збереженні статистичної достовірності результатів і з метою підвищення ефективності експериментальних досліджень було здійснено його планування. Задля розроблення матриці дробного факторного експерименту типу 2^n за відомими методиками [82, 83] було вибрано 3 зазначених раніше параметри ($n = 3$), які можуть впливати на розподіл температури всередині установки.

За результатами проведених згідно складеної задля цього матриці експериментальних досліджень отримана регресійна залежність:

$$T = f(E, h, \alpha) = b_0 + b_1 E + b_2 h + b_3 \alpha + b_4(E \cdot h) + b_5(E \cdot \alpha) + b_6(h \cdot \alpha) + b_7(E \cdot h \cdot \alpha), \quad (1.19)$$

де b_i – коефіцієнти моделі, $i = \overline{0,7}$.

Після математичної обробки результатів досліджень за допомогою програми STATISTICA 10 була отримана регресійна залежність з відповідними коефіцієнтами (1.20).

$$T = f(E, h, \alpha) = 496,1 + 0,089E - 34,81H + 0,02(E \cdot h) \quad (1.20)$$

Графічне зображення множини рішень отриманої регресійної залежності при змінюванні положення пластин h наведено на рисунку 1.33. Графічне зображення множини рішень отриманої регресійної залежності за умови регулювання кута нахилу пластин α наведено на рисунку 1.34.

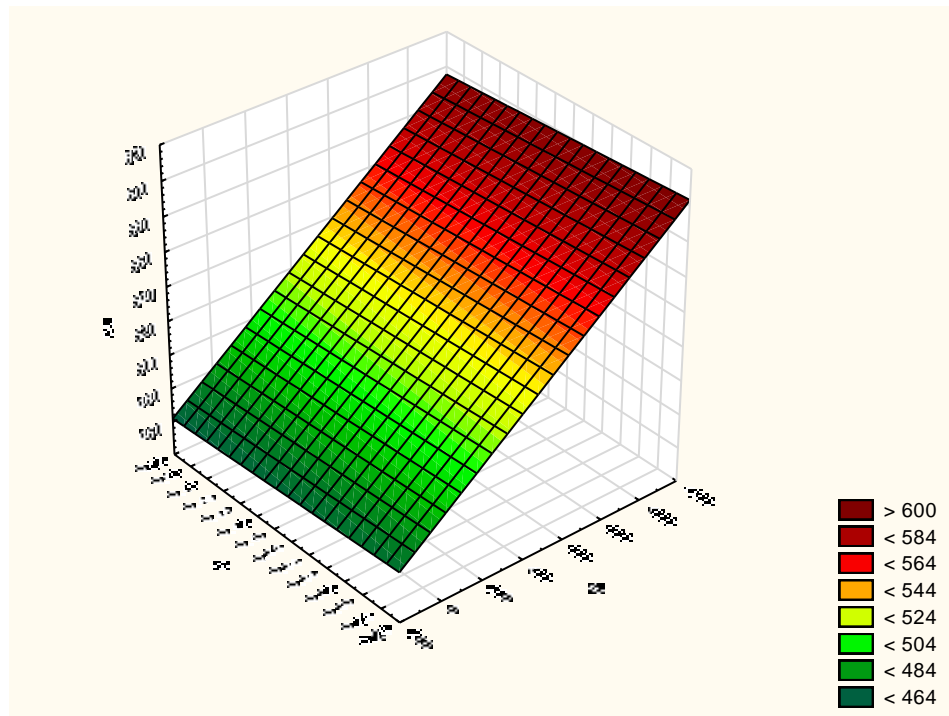


Рисунок 1.33 – Графічне зображення множини рішень регресійної залежності у програмі STATISTICA 10 за умови зміни h

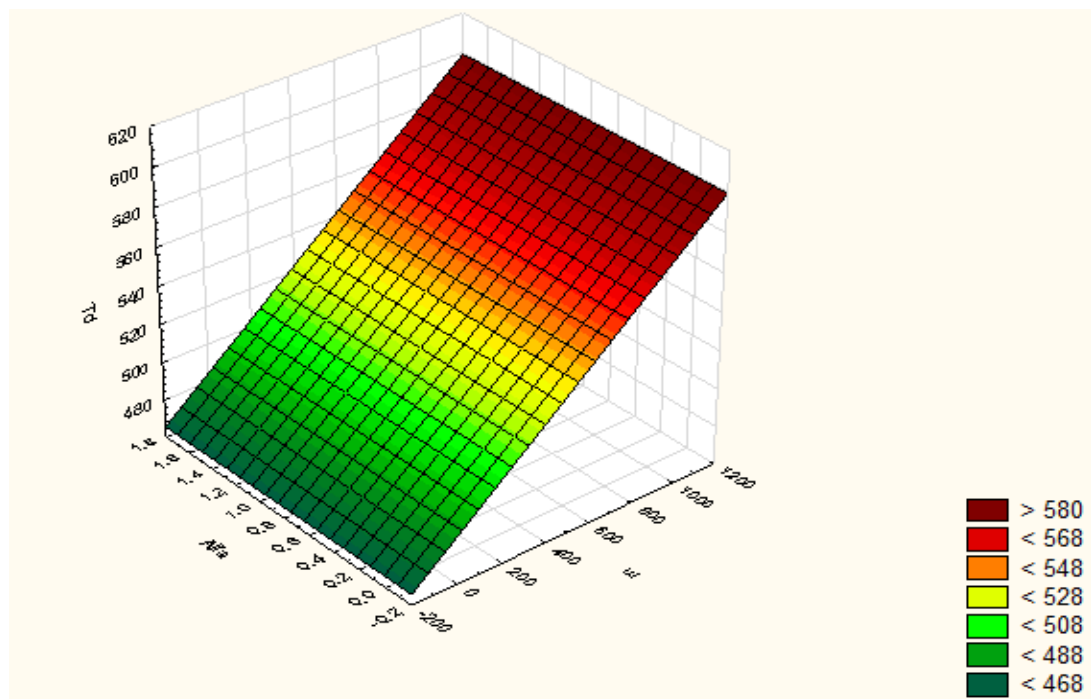


Рисунок 1.34 – Графічне зображення множини рішень регресійної залежності у програмі STATISTICA 10 за умови зміни α

Як бачимо, регулювання кутів нахилу пластин при розподілі температури у камері не має значного впливу. Це припущення доведено за конкретних умов проведених експериментальних досліджень.

Похибка виконання прогнозування температури всередині нагрівальної установки у випадку наявності електричного поля визначалась відповідно до отриманої математичної моделі згідно [92-94]. Відповідність прогнозованої температури пластини T_n дійсній T_∂ отримано у вигляді:

$$T_n = \alpha_0 + \alpha_1 T_\partial, \quad (1.21)$$

$$\text{де } \alpha_0 = \bar{T}_n - r_{T_\partial T_n} \sigma_{T_n} / \sigma_{T_\partial} \bar{T}_\partial; \quad \alpha_1 = r_{T_\partial T_n} \sigma_{T_n} / \sigma_{T_\partial}.$$

$\bar{T}_n, \bar{T}_\partial$ – середні значення прогнозованих і дійсних температур пластини;

$r_{Q_\partial Q_n}$ – коефіцієнт кореляції між ними;

$\sigma_{Q_n}, \sigma_{Q_\partial}$ – середньоквадратичні відхилення,

α_0, α_1 – емпіричні коефіцієнти при розрахунку прогнозованих температур.

Зазначені величини обчислено за формулами:

$$r_{T_n T_\partial} = \frac{\sum_1^N (T_\partial - \bar{T}_\partial) \cdot (T_n - \bar{T}_n)}{N \cdot \sigma_{T_n T_\partial}}; \quad (1.22)$$

$$\sigma_{T_\partial} = \sqrt{\sum_1^N (T_\partial - \bar{T}_\partial)^2 / N - 1}; \quad (1.23)$$

$$\sigma_{T_n} = \sqrt{\sum_1^N (T_n - \bar{T}_n)^2 / N - 1}, \quad (1.24)$$

де N – обсяг статистичної вибірки (кількість проведених вимірів).

Середньоквадратична абсолютна похибка вимірів визначалася як:

$$\Delta T_n = t_p \sigma_{T_n}^* \quad (1.25)$$

де t_p – коефіцієнт Ст'юдента, що береться з таблиці відповідного розподілу [117] для заданої вірогідності й кількості ступенів свободи щодо дій $k = N - 1$. У розглянутому випадку вірогідність прийнята $p = 0,05$. Тут $\sigma_{T_n}^*$ – залишкове середньоквадратичне відхилення, яке обчислено за формулою:

$$\sigma_{T_n}^* = \sqrt{\sum_1^N T_n - T_n^*{}^2 / N - 1} \quad (1.26)$$

У результаті середньоквадратична відносна похибка прогнозу визначена в такий спосіб:

$$\delta_{T_n} = |\Delta T_n| / T_{n\max} \cdot 100\% \quad (1.27)$$

де $T_{n\max}$ – граничне значення прогнозованої температури.

За результатами проведеної перевірки математичної моделі енергетичної установки підтверджена її адекватність реальному процесу. Середньостатистична відносна похибка прогнозування склала менше 4%. Отримана регресійна залежність дозволила ефективніше визначати доцільну напруженість електричного поля в камері енергетичної установки.

1.7 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз існуючих математичних моделей камерних печей, який показав, що більшість з них недосконалі, лише вибірково відображають процеси, які відбуваються в розглянутих теплотехнічних установках та не дають повного уявлення про розподіл теплових потоків у камері, тому це питання потребує подальших досліджень.

2. Проведено моделювання полів швидкостей пічних газів у камерній нагрівальній печі за допомогою рівняння Нав'є-Стокса для нестисленої рідини і рівняння нерозривності. Турбулентність руху в'язкого газу у цьому випадку враховувалась за допомогою RNG k - ϵ моделі. Результати виконаного моделювання температурних зон камери печі показали не раціональність аеродинаміки теплоагрегату. Проведений аналіз одержаних розрахункових досліджень напрямків та масових витрат пічних газів показав, що найбільше останні нагрівають верхню частину печі і видаляються за допомогою димових вікон, так і не віддавши теплоту металу, який нагрівається.

2. Розроблена експериментальна нагрівальна установка (теплова потужність - до 77 кВт, питома витрата газу - 0,04 м³/хв.), яка моделює канал з розмірами 0,192×0,192×1,1 м для відведення продуктів згорання. Встановлена можливість застосовувати електричне поле, при необхідній напруженості між пластинами та пальником в діапазоні 0...1 кВ/м, з метою корегування температурного поля всередині камери печі.

3. Аналіз виконаних експериментів показав, що перерозподіл масових витрат пічних газів поблизу металевих заготовок за рахунок створення теплових бар'єрів шляхом використання електричного поля дає можливість впливати на температуру цих заготовок.

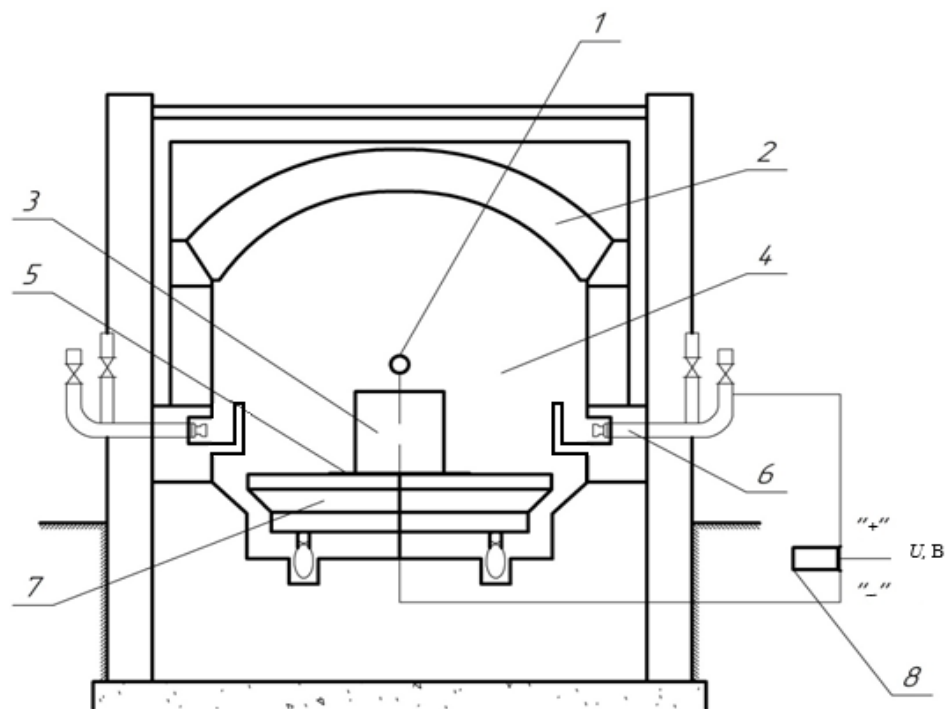
4. Розроблена математична модель розподілу температури в камері нагрівальної установки під дією електричного поля, за допомогою якої можна визначити температуру у місці розташування садки і зробити аналіз

процесу теплового обміну. Адекватність вищезазначеної моделі підтверджена реальним експериментальним дослідженням, середньоквадратична відносна похибка прогнозування - до 4 %.

2 ПРОМИСЛОВІ ЕКСПЕРИМЕНТИ НА КАМЕРНІЙ ПЕЧІ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ГАЗІВ

2.1 Результати натурних експериментів на камерній печі за умови застосування електричного поля

У попередніх розділах була надана детальна характеристика печі відпалу лиття, яка розташована у ливарному цеху ТОВ «ЗТМК» та розраховано її тепловий баланс. На рисунку 2.1 представлено поперечний переріз печі відпалу.



1 – отвір для термопари для вимірювання лазерним пірметром температури металевої заготовки; 2 – звід печі; 3 – заготовка, що нагрівається; 4 – робочий об'єм; 5 – електропровідна пластина; 6 – пальниковий пристрій;
7 – висувний під; 8 – електрична частина

Рисунок 2.1 – Поперечний перерізу печі відпалу

На рисунку 2.2. представлено загальний вигляд металевих заготовок на викатному поді, які проходять термообробку у печі відпалу



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд металевих заготовок на викатному поді, які проходять термообробку у печі відпалу

Для оцінки впливу електричного поля на рух пічних газів було проведено серію натурних експериментів. На викатний під камерної печі було встановлено електропровідну пластину, до якої приєднувався провідник струму. Другий провідник струму з установлювався на пальниковому пристрої. Протилежні кінці зазначених провідників струму приєднувалися до випрямляча з напругою, яка подавалась протягом процесу нагріву металевих заготовок [92-94].

Результати натурних експериментів у процесі відпалу за умови використання електричного поля представлені на рисунку 2.3.

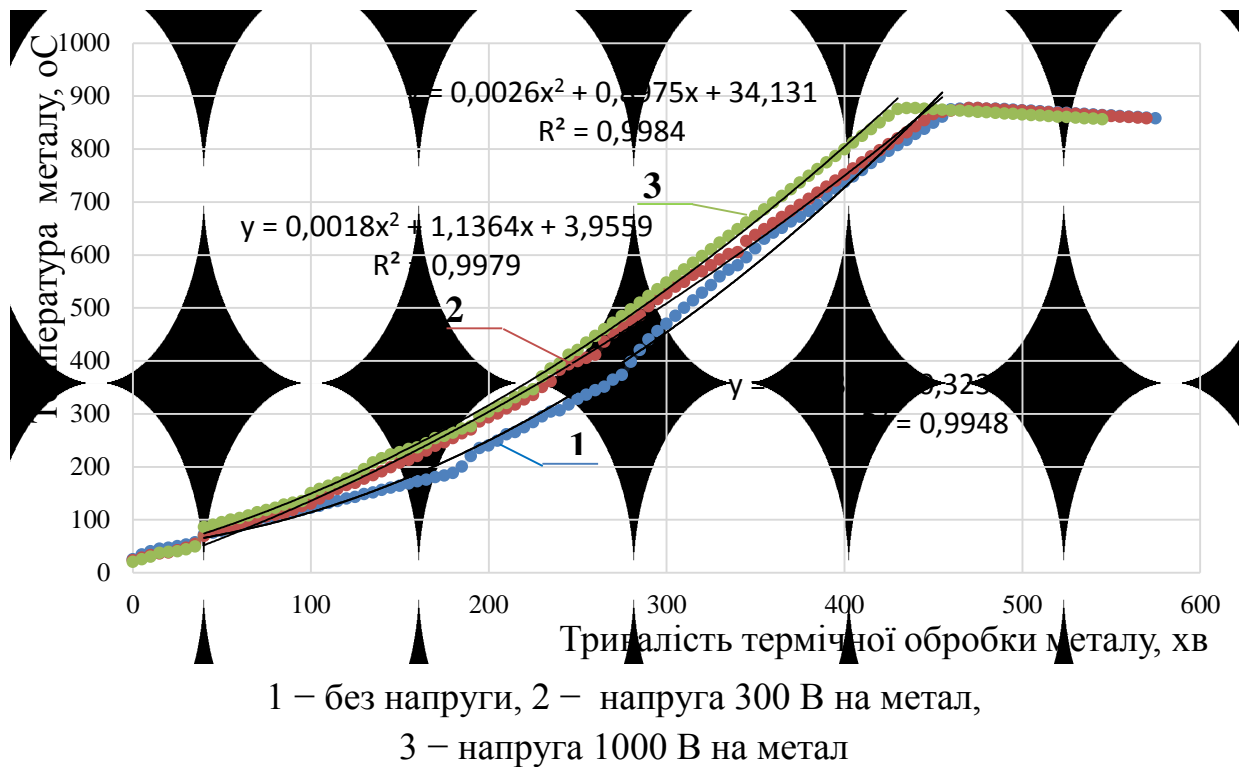


Рисунок 2.3 – Значення температур нагріву металу за результатами проведеного експерименту

Результати сумарної витрати газу за режим термообробки «відпал» без подачі напруги та за умови застосування електричного поля представлені на рисунку 2.4

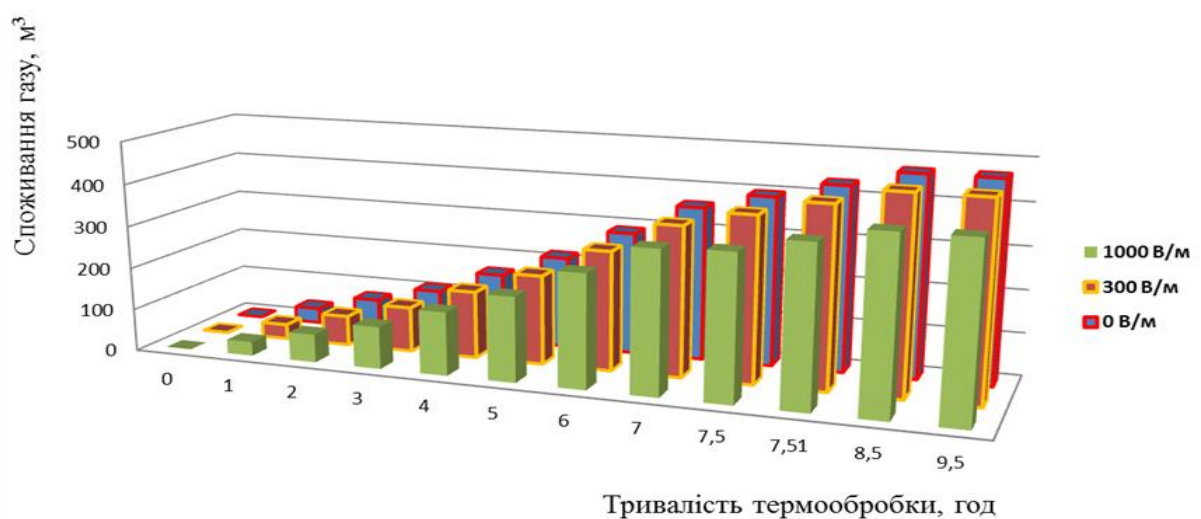


Рисунок 2.4 – Сумарна витрата газу камерною піччю без подачі напруги та за умови подачі напруги металеві заготовки 300 В та 1000 В

Результати проведених натурних експериментів на печі відпалу показали, що застосування електричного поля дає змогу зменшити споживання природного газу піччю на (5...10) % .

2.2 Система управління тепловими потоками в камерній нагрівальній печі

Проведений у попередніх розділах аналіз сучасного стану роботи камерних печей вказує на невідповідність останніх щодо якості нагрівання металу. Мета управління технологічними процесами нагріву металу це - стабілізація показників температури виробів, які нагріваються та забезпечення мінімальних енергетичних витрат на вироблення продукції необхідної якості.

У наукових дослідженнях, які присвячені управлінню процесом термобробки металу, в якості керуючого впливу застосовують лише витрату природного газу. Тому дослідницьку зацікавленість і викликає розробка інноваційного управління технологічним процесом нагріву металу в теплоагрегаті, де напруга між пальником та садкою металу, що нагрівається буде використовуватись як додатковий керуючий вплив.

Нехай $T_{зад}$ – задана температура металу, а τ – час нагрівання металу за умови температурно-часового режиму. Ці параметри чітко регламентовані технологією при усіх фазах процесу термічної обробки для досягнення необхідних теплофізичних перетворень. Отже, задача оптимізації – це виконання розрахунків значень керуючих впливів задля досягнення необхідної динаміки зміни температури за умови мінімальної витрати природного газу, з цією ціллю і з'являється необхідність розробки відповідної системи управління.

Керуючим впливом будемо використовувати напругу між пальником та садкою U у діапазоні $U \in [U_{min}; U_{max}]$, U_{min} та U_{max} – мінімальне та максимальне значення напруги між пальником і садкою, обсяг подачі газу

$Q \in [Q_{\min}; Q_{\max}]$, Q_{\min} та Q_{\max} – мінімальне та максимальне значення обсягу подачі газу на кожному кроці за часом $j \in [j_{\min}; j_{\max}]$, j_{\min} та j_{\max} – мінімальне та максимальне значення кроку за часом.

В результаті розрахунків оптимальних співвідношень керуючих впливів система керування повинна реалізувати послідовність змінювання витрат природного газу і електричної напруги задля виконання необхідного технологічного режиму термічної обробки металу.

На рисунку 2.5 наведено схему запропонованої системи управління теплотехнічною установкою, яка включає в себе такі основні блоки як розрахунок оптимальних керуючих впливів за цикл нагрівання (блок 2), регулятори напруги і газу між металевою заготовкою та пальниковим пристроєм (блоки 3, 4) і блок визначення відхилень температури від тієї, яка необхідна за технологічним режимом (блок 6) [95].

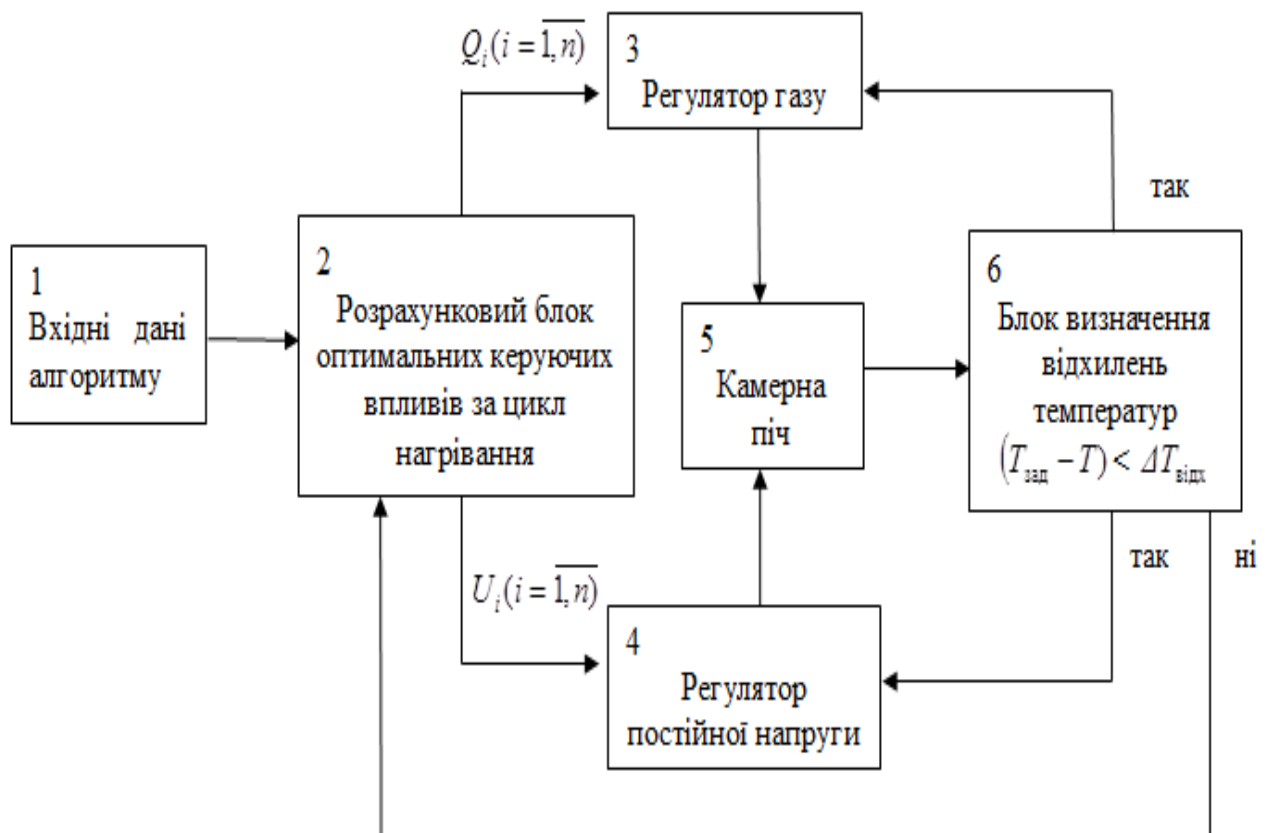


Рисунок 2.5 – Блок-схема системи управління камерною піччю

Функціонування розробленої системи управління відбувається наступним чином: у розрахунковий блок 2 вводяться вхідні дані алгоритму з обмеженнями. Розрахунки для визначення оптимальних значень величини напруги та витрати природного газу на кожному кроці виконуються у блоці 2 за розробленим алгоритмом [126].

На блок-схемі T – температура металу, що проходить термообробку;

$T_{зад}$ – температура металу, яка необхідна за технологічним режимом;

$\Delta T_{відх}$ – допустиме відхилення температури від заданої згідно технологічного режиму термообробки.

ΔU – крок зміни напруги;

ΔQ – крок зміни подачі газу.

Після того, як будуть визначені співвідношення керуючих впливів, що забезпечують досягнення заданої температури на кожному кроці, необхідно встановити оптимальну послідовність змінювання витрат газу і напруги за цикл, яка дозволить забезпечити виконання температурного режиму нагрівання за умови мінімальної витрати природного газу. Потім згідно отриманої послідовності регуляторами 3 і 4 необхідно змінити величину напруги між пальником і садкою металу та подачі газу, що й забезпечить досягнення заданого графіку нагріву. При відповідності температури заданій, на наступному кроці регулятори будуть продовжувати реалізовувати послідовність, яка видана алгоритмом.

У разі виходу температури за межі технологічно допустимого відхилення, процес реалізації необхідно зупинити і провести визначення інших значень керуючих впливів за цим же алгоритмом. Вищерозглянута система управління універсальна, тому що після проведених розрахунків надає динаміку, за допомогою якої необхідно змінювати величину постійної напруги і подачу газу на кожному часовому інтервалі задля забезпечення виконання заданого технологічного режиму нагріву.

Розроблена система керування процесом нагріву металу при додатковому використанні електричного поля як керуючого впливу [86] дає змогу значно підвищити енергетичну ефективність теплоагрегату. У порівнянні із алгоритмом конструктивної оптимізації теплових агрегатів за допомогою переміщення витяжних вікон і пальників, він простіший за технічною реалізацією. Перевага розробленого алгоритму полягає у використанні електричного поля, як додаткового керуючого впливу. Створення такого поля на виробничому підприємстві не вимагає необхідності суттєвих вкладень капіталу та зовнішніх утилізаторів теплоти, тому що теплота продуктів згоряння, яка втрачалась з відхідними газами, буде використовуватись безпосередньо при проведенні термообробки, що позитивно вплине на підвищення енергоефективності агрегату в цілому.

2.3 Висновки до розділу

1. Проведено серію натурних експериментів на камерній печі в умовах промислового підприємства за умови застосування електричного поля. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованого способу впливу на температурне поле пічних газів у камері печі відпалу. Досягнуто зниження споживання природного газу піччю на (5...10) %.

2. Розроблено систему управління процесом нагріву металевих заготовок у камерній печі, у якій застосовується електричне поле. Створення такого поля на виробничому підприємстві не вимагає необхідності суттєвих вкладень капіталу та зовнішніх утилізаторів теплоти, тому що теплота продуктів згоряння, яка втрачалась з відхідними газами, буде використовуватись безпосередньо при проведенні термообробки, що позитивно вплине на підвищення енергоефективності агрегату в цілому.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих математичних моделей камерних печей, який показав, що більшість з них недосконалі, оскільки лише вибірково відображають процеси, які відбуваються в розглянутих теплотехнічних установках та не дають повного уявлення про розподіл теплових потоків у камері.

2. Проведено чисельне моделювання полів швидкостей пічних газів у камерній нагрівальній печі за допомогою рівняння Нав'є-Стокса для нестисленої рідини і рівняння нерозривності. Турбулентність руху в'язкого газу у цьому випадку враховувалась за допомогою RNG $k-\epsilon$ моделі. Результати виконаного моделювання температурних зон камери печі показали нераціональність аеродинаміки теплоагрегату. Проведений аналіз одержаних розрахункових досліджень напрямків та масових витрат пічних газів показав, що найбільше останні нагрівають верхню частину печі і видаляються за допомогою димових вікон, так і не віддавши теплоту металу, який нагрівається.

3. Проведені експериментальні дослідження на нагрівальній установці для оцінки впливу електричного поля на теплові потоки у її камері. Аналіз виконаних експериментів показав, що перерозподіл масових витрат пічних газів поблизу металевих заготовок за рахунок створення теплових бар'єрів шляхом використання електричного поля дає можливість впливати на температуру цих заготовок.

4. Розроблена математична модель розподілу температури в камері нагрівальної установки під дією електричного поля, за допомогою якої можна визначити температуру у місці розташування садки. Адекватність вищезазначеної моделі підтверджена реальним експериментальним дослідженням, середньоквадратична відносна похибка прогнозування склала до 4 %.

5. Проведено серію натурних експериментів на камерній печі в умовах промислового підприємства за умови застосування електричного поля. Отримані результати підтвердили ефективність запропонованого способу впливу електричного поля на температурне поле пічних газів у камері печі відпалу. Досягнуто зниження споживання природного газу піччю на (5...10) %.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губинский В. И. Нагревательные печи металлургии - сегодня и завтра. Теория и практика металлургии. 2004. № 6. С. 56-60.
2. Свинолобов Н. П. Печи черной металлургии : учеб. пособ. для вузов. Днепропетровск : Пороги, 2004. 154 с.
3. Теплотехника металлургического производства : учеб. пособ. для вузов / под общ. ред. : В. А. Кривандина, В. В. Белоусова, Г.С. Сборщикова и др. В 2 т. Т. 2. Конструкция и работа печей. Москва : МИСИС, 2001. 736 с.
4. Губинский В. И. Металлургические печи : учеб. пособие. Днепропетровск : НМетАУ, 2006. 85 с.
5. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах : монография. Донецк : Ноулидж, 2012. 247 с.
6. Барішенко О. М., Ревун М. П. Актуальні енергозберігаючі методи роботи нагрівальних печей : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 138 с.
7. Ерёмин А. О. Современные способы отопления нагревательных печей. *Металлургическая теплотехника* (Сб.научн. трудов НМетАУ). Днепропетровск : Новая идеология, 2008. С. 139 – 151.
8. Пилипенко Р. А. Интенсификация тепловой работы камерных печей, отапливаемых природным газом. *Металлургическая теплотехника* (Сб. науч. трудов НМетАУ). Днепропетровск: НМетАУ, 2002. Т.8. С.99-105.
9. Єрьомін О. О., Сибір А. В., Губинський В. Й. Дослідження об'ємно – регенеративного опалення камерної печі на основі математичного моделювання руху газів і теплообміну. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика* : зб. наук. пр. Дніпропетровськ : Нова ідеологія. 2010. Вип. 2. С. 96–106.

10. Візер А. А. Щодо недоліків теплової роботи камерних печей. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2015. № 34. С. 89 - 92.
11. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Щодо можливості підвищення енергоефективності нагрівальних печей за рахунок формування теплових потоків просторовими електричними полями. *Металургія : наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2013. Вип. 29. С. 121–125.
12. Лисиенко В. Г., Щелоков Я. М., Ладыгичев М. Г. Топливо. Рациональное сжигание, управление и технологическое использование : справ. в 3 кн. Кн. 2. / под ред. Лисиенко В. Г. Москва : Теплотехник, 2004. 832 с.
13. Одиноченков В. В., Гаврева И. В. Обеспечение разработки и реализации стратегии эффективности ресурсо - и энергопотребления на предприятиях промышленности. *Экономика, организация и управление предприятиями, отраслями, комплексами*. 2013. №3. С. 32-34.
14. Сазонов Э. В., Семенов В. Н. Утилизация теплоты и очистка газовых выбросов: монография. Воронеж : ВГАСУ, 2010. – 142 с.
15. Фиалко Н. М., Шеренковский Ю. В., Степанова А. И. и др. Эффективность систем утилизации теплоты отходящих газов энергетических установок различного типа. *Промышленная теплотехника*. 2008. № 3. С. 68-76.
16. Ревун М. П., Зинченко В. Ю. Перспективные направления совершенствования тепловой работы нагревательных и термических камерных печей. *Металлургическая теплотехника (Сборник научных трудов НМетАУ)*. 2006. № 6. С. 294-302.
17. Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Комаров А. В. Оптимальный режим использования топлива при энергосберегающем нагреве. *Изв. ВУЗ. ЧМ*. 2004. №12. С. 48-53.
18. Chakravarty K., Kumar S. Increase in energy efficiency of a steel

billet reheating furnace by heat balance study and process improvement. *Energy Reports*. 2020. No 6. P. 343–349. DOI : 10.1016/j.egyр.2020.01.014.

19. Куценко Ю.Г., Онегин С. Ф. Применение методов вычислительной газовой динамики для моделирования процессов течения многокомпонентного потока газа, горения и теплообмена в камере сгорания газотурбинного двигателя. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2002. № 2. С. 60-64.

20. Soroka B., Zgurskyu V., Pyanykh K. Development of the Monte-Carlo method to predict radiative heat transfer within the boilers and furnaces. *In: Abstracts of the 13th Intern. Conference on Thermal Engineering and Thermogrammetry (THERMO), Budapest 18–20 June, 2003*. Budapest, 2003. P.69–78.

21. Кочевский, А. Н., Неня В. Г. Современный подход к моделированию и расчету течений жидкости в лопастных гидромашинах. *Вісник Сумського державного університету : Серія Технічні науки*. 2003. №13(59). С. 195-210.

22. Soroka B. Fuel Furnaces in the problem of enhancement the process of heat- and mass transfer. *In: V Minsk Intern. Heat & Mass transfer Forum Proceedings. – section 9 “Thermophysics and Thermal Engineering of Metallurgical Process”*. 2004. №3 . 35p.

23. Soroka B., Zgurskyi V. Updating the modern techniques of radiative heat transfer calculation within fuel furnaces and boilers. *WSEAS transactions on heat and mass transfer*. 2014. № 9. P. 205-220.

24. Shah, R. K., Sekulic, D. P. *Fundamentals of heat exchanger*. 2003. Hoboken, NJ : Wiley, Aug. 976 p.

25. Gaddis, E. S., Schlünder, E. U. Temperature Distribution and Heat Exchange in Multipass Shell-and-tube Exchangers with Baffles. *Engineering*, 1979. 1(1), 43-52.

26. Губинский В. И., Еремин А. О., Сибирь А. В. Работа

нагревательного колодца с шариковыми регенераторами. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. №1 С. 103- 105.

27. Єрофєєва А. А. Нові підходи до вирішення проблеми енергоефективності камерних печей промислових підприємств. «Еко форум - 2020»: зб. тез доп. IV спеціалізованого міжнародного екологічного форуму, 28 - 30 травня 2020 р. Запоріжжя : Запорізька торгово-промислова палата, 2020. С. 172 - 173.

28. Єрофєєва А. А. Підвищення ефективності споживання природного газу промисловими камерними печами. «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»: збірник матеріалів 6-го міжнародного конгресу, 23-25 вересня 2020 р. Львів: Західно - Український Консалтинг Центр (ЗУКЦ), 2020. С. 166.

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

30. V. Yakhot, S. Orszag, S. Thangam et. al. Development of turbulence models for shear flows by a double technique. *Phys. Fluids A*. 1992. Vol. 4, № 7. P. 1510–1520. DOI:[10.1063/1.858424](https://doi.org/10.1063/1.858424).

31. Юрко В.В., Ганжа А.Н. Методика расчета тепловых процессов в петлевом теплообменном аппарате при запыленном греющем теплоносителе. *Экология и промышленность*. 2019. № 2 (59). С. 43–50. <https://doi.org/10.35477/2311-584x.59.43-50>.

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

33. Соколов В.М. Современные технологические решения при разработке топочно-горелочных устройств. *Новости теплоснабжения*.

2012. № 10(146). С.23-25.

34. Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Апробация упрощенной модели расчета горения и формирования оксидов азота при сжигании жидкого топлива. *Промышленная теплотехника*. 2006. № 3. С. 62-69.

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

36. V. A. Pinchuk, M. Moumane, T. A. Sharabura, Y. Shishko, A. V. Kuzmin, Applicability of the Graetz's solution for Newtonian fluids to the calculations of the heat transfer in coal-water fuel at the pre-heating stage. *Thermal Science and Engineering Progress*. 21 2021. 100798. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100798>

37. Давыденко Б.В. Метод матричной прогонки для решения сеточных уравнений гидродинамики. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2008. №5(35). С. 7 – 11.

38. M. Rimar, A. Kulikov, M. Fedak, O. Yeromin, K. Sukhyu, O. Gupalo, E. Belyanovskaya, R. Berta, M. Smajda, M.R. Ratnayake. Mathematical Model of a Heating Furnace Implemented with Volumetric Fuel Combustion. *Processes*. 2020. No 8. P. 469. DOI : 10.3390/pr8040469.

39. Pavlenko A.M., Cheilytko A. A., Nosov M. A. Mathematical description heat transfer through the body with a closed porosity. *Energy, Energy saving and ration Nature Use*. 2017.№1-2 (7,8). P. 43 – 50.

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

41. N. Bohlooli Arkhazloo, Y. Bouissa, F. Bazdidi-Tehrani, M. Jadidi, J.-B. Morin, M. Jahazi. Experimental and unsteady CFD analyses of the heating

process of large size forgings in a gas-fired furnace. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2019. No. 8. P. 940. DOI :10.1016/j.csite. 2019. 100428.

42. Van Belleghem M. et al. Validation of a coupled heat, vapour and liquid moisture transport model for porous materials implemented in CFD. *Building and Environment*. 2014. Vol. 81. P. 340-353.

43. Säckel W., Nieken U. Structure Formation within Spray-Dried Droplets; Mathematical Modelling of Spray Polymerisation. *Process-Spray*. Springer International Publishing. 2016. P. 89-125.

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

45. Сибирь А. В., Решетняк С. И. , Губинский В. И. Моделирование теплообмена в камере, отапливаемой регенеративными горелками. *Промышленная теплотехника*. 2006. №5. С. 41-46.

46. Сибирь А.В., Решетняк С. И. , Губинский В. И. Моделирование гидродинамических процессов в регенеративном колодце с центральной горелкой : *Металлургическая теплотехника (Сборник научных трудов НМетАУ)*. Днепропетровск, 2006. С. 313 - 323.

47. Сорока Б. С., Згурский В. А. Моделирование процессов переноса и образования вредных выбросов при сжигании природного газа с воздухом, увлажненным в цикле Майсоценко. *Современная наука. Исследования, Идеи, Результаты, Технологии*. 2013. № 1(12) С. 403- 409.

48. Сорока Б. С. Интенсификация тепломассообменных процессов при сжигании топлива в печах. Развитие теории топливных печей и топочных процессов. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2006. №5. С. 3

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

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

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

52. Капустин Е. А., Шаламов Ю. Н., Кулаков А. М. Работа нагревательных колодцев с верхней горелкой при пульсирующим факеле. *Сталь.* 1980. №12. С. 1105 – 1107.

53. Лисиенко В. Т., Шимов В. Н., Фетисов Б. А. Сравнительные исследования способов отопления нагревательных печей на огневом стенде. *Изв. ВУЗ. ЧМ.* 1976. №2. С. 94 – 97.

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

55. Ревун М. П., Погорелов В. Н., Чепрасов А. И. Оптимизация нагрева металла при использовании двух видов топлива и кислорода. *Известия Вузов. Черная металлургия.* 1991. № 1. С. 79-81.

56. Гольдфарб Э. М., Ибряев В. С., Оптимальный режим нагрева металла по критерию минимума суммарной стоимости расходуемого топлива и потерь металла на окисление . *Известия Вузов. Черная металлургия.* 1971. № 12. С. 144-148.

57. Коротин А. Н., Крылова Л. С., Чельшев А. И. Математическая модель оптимизации режима работы термической печи с выдвигным подом. *Металлургическая теплотехника* : сборник научных трудов государственной металлургической академии Украины. Днепропетровск, 1989. Т. 2. С. 163-166.

58. Крылова Л. С., Горбунов В. А. Расчет теплообмена в камерной нагревательной печи с учетом неизотермичности газового объема. *Металлургическая теплотехника*. 1989. Т. 2. С. 167-168.
59. Крупенников С. А. Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации. *Известия Вузов. Черная металлургия*. 2006. №3. С. 59-62.
60. Арутюнов В. И., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей : учебник для вузов. Москва : Металлургия, 1990. 239 с.
61. Ткаченко В. Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Київ : Наукова думка, 2008. 244 с.
62. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Моделирование нестационарного теплопереноса в замкнутой области с локальным источником тепловыделения. *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. № 2. С. 305-314.
66. Візер А. А. Щодо визначення напруги просторового електричного поля у нагрівальній печі для підвищення її енергоефективності. «Україна-Польща: діалог культур в контексті євроінтеграції»: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, 25 - 27 вересня 2014. Запоріжжя: ЗДІА, 2014. С. 168 - 169.
67. Візер А. А. Щодо підвищення енергоефективності камерних печей за рахунок утилізації теплоти відхідних газів. «Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості»: матеріали XXI Науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів, 25 - 29 квітня 2016 р. Запоріжжя : ЗДІА, 2016.
68. Єрофєєва А. А., Нікітенко О. О. Підвищення енергетичної ефективності камерних печей з викатним подом. *Енергетика, електроніка та інформаційні технології*: матеріали XXIV науково-практичної конференції студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів

Інженерного інституту ЗНУ, 26 - 29 листопада 2019. Запоріжжя: ІІ ЗНУ, 2019. Т. III. С. 7.

69. Von A. G. Gaydon, H. G. Wolfhard. Flames – their structure, radiation and temperature. *Chemie Ingenieur Technik*. 2009. Vol. 51. Issue7. P.765 – 765.

70. Черепнин С. Н. К вопросу о влиянии ионизирующих добавок и внешнего электрического поля на горение и окисление. *Физика горения и взрыва*. 1991. № 1. Т. 27. С. 75 –77.

71. Качан Ю. Г., Візер А. А., Сибір А. В. Застосування просторових електричних полів задля створення теплових перешкод у камерних печах. *Електротехніка та електроенергетика*. 2017. №1. С. 18 – 23.

72. Belhi M., Domingo P., Vervisch P. Direct numerical simulation of the effect of an electric field on flame stability. *Combustion and Flame*. 2010. Vol. 157. Issue 12. P. 2286 – 2297.

73. Haber F. The Synthesis of Ammonia from its Elements. *Nobel Lectures, Chemistry*. 1920. P. 326 – 340. URL: <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/haber-lecture.pdf> (дата звернення 27.03.2019).

74. Dulikravich G.S., Colaco M.J. Convective heat transfer control using magnetic and electric fields. *Journal of Enhanced Heat Transfer*. 2006. Vol. 13 (2). P. 139–155.

75. Go D.B., Maturana R.A., Fisher T.S., Garimella S.V. Enhancement of external forced convection by ionic wind. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol.51. Issues 25-26. P. 6047 – 6053.

76. Kumar R., Kumar A. Enhancement of natural convection heat transfer by the effect of high voltage D.C. electric field. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 2014. Vol.3. No. 1. P. 42 – 49.

77. Mahmoudi S.R., Adamiak K., Castle G.S.P. Electrohydrodynamic Single-phase Convection Heat Transfer Enhancement Techniques: Direct ionic

wind and Vortex induction. *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, 2011. P. 1 – 13. URL: http://www.electrostatics.org/images/2011_K4.pdf.

78. Рыжов Э. В., Горленко О. А. Математические методы в технологических исследованиях. К : Наук. думка, 1990. 184 с.

79. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход. Москва : ФИЗМАТЛИТ. 2002. 144 с.

80. Босов А. А. Функции множества и их применение : монография. Днепродзержинск : Андрей. 2007. 182 с.

81. Босов А. А., Артемчук В. В. Математичне моделювання планування експериментів. *Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*.

82. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Щодо можливості керування тепловими потоками просторовим електричним полем. *Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины*. Днепропетровск: Новая идеология, 2013. Вып. 13. С. 80 - 84.

83. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Моделювання температурного режиму газової нагрівальної печі за наявності просторового електричного поля. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. Вип. 2 (36). С. 30 - 34.

84. Качан Ю.Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Методика визначення оптимальних енергетичних параметрів термічної печі, що працює на біогазі, за умови наявності в її камері просторового електричного поля. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2016. № 35. С. 88 - 91.

85. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Кількісна оцінка ефективності газової нагрівальної установки за умови створення в її камері просторового електричного поля. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. Київ: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. Вип. 4 (38). С. 14 - 17.

86. Качан Ю. Г., Візер А. А. Можливості використання математичної моделі розподілу температури у газовій нагрівальній печі за наявності просторового електричного поля. *«Теплотехніка та енергетика в металургії»*: праці XVII Міжнародної конференції, 7 - 9 жовтня 2014 р. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2014. С. 92 - 93.

87. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., Візер А.А. Щодо прогнозування розподілу температури у газовій нагрівальній камері при наявності просторового електричного поля. *«Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку - 2014»*: зб. тез доповідей I Міжнародної науково-практичної та навчально - методичної конференції, 27–29 травня 2014 р. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. С. 19 - 20.

88. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособ. для вуз. 10-е изд, стереотипное. Москва : Высшая школа, 2004. 479 с.

89. Елисеєва И. И. Общая теория статистики : учеб. пособ. 4-е изд. перераб. и доп. Москва : Финансы и Статистика, 2002. 480 с.

90. Адлер Ю.П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука, 1976. - 279 с.

91. Лукомский Ф.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. Москва : Госстатиздат, 1958. 120 с.

92. Пат. 116305 Україна МПК 2007 C21D 9/00. Спосіб термічної обробки металу у камерних печах періодичної дії / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, В. Л. Коваленко (Україна); заявник Запорізька державна інженерна академія. u201612960; заявл. 19.12.2016; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. С. 4.

93. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Визначення економії споживання промисловим підприємством природного газу за наявності у робочих об'ємах його камерних печей просторового електричного поля. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2017. № 1. С. 91 - 94.

94. Cheilytko Andrii, Yerofieieva Alina. Increasing the uniformity of

metal heating in chamber furnaces by influence of the electric field. II "Environmental Innovations: Advances in Engineering, Technology and Management EIAETM Conference", On-line Conference, 19 - 23 October 2020.

95. Качан Ю. Г., Єрофєєва А. А. Інноваційне управління процесом нагрівання металу у печі з використанням просторового електричного поля. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. 4 (43). С. 193 - 199.