

**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 «Аналіз ефективності заходів щодо покращення роботи камерних печей»

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

Борисенко Віталій Юрійович

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
«09» грудень 2021 року

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

Борисенку Віталію Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)





Тема роботи (проекту) Аналіз ефективності заходів щодо покращення роботи 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: 09 грудня 2021 р.
- 2 Вихідні дані до роботи: продуктивність камерної печі, витрата природного газу, габаритні розміри печі для розрахунку теплового балансу.
- 3 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): аналіз ефективності заходів щодо покращення роботи камерних печей; аналіз можливості інтенсифікації тепломасообміну у печі електричним полем; розрахунок теплового балансу промислової печі; моделювання температурних зон та циркуляційного руху пічних газів у камері печі; промислові випробування на камерній печі.

4 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): аналіз ефективності заходів щодо покращення роботи камерних печей, результати розрахунку теплового балансу камерної печі, розподіл температурних зон у камерній печі, моделювання циркуляційного руху пічних газів у камерній печі.

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	Срок виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз ефективності заходів щодо покращення роботи камерних печей	25.06.2021	виконано
2	Аналіз можливості інтенсифікації тепломасообміну у печі електричним полем	01.08.2021	виконано
3	Розрахунок теплового балансу промислової камерної печі	01.10.2021	виконано
4	Моделювання температурних зон та циркуляційного руху пічних газів у камері печі	05.11.2021	виконано
5	Промислові випробування на камерній печі	01.12.2021	виконано
6	Оформлення кваліфікаційної роботи згідно нормативним вимогам	09.12.2021	виконано

Студент


(підпис)

В.Ю.Борисенко
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)


(підпис)

Г.В.Карпенко
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер


(підпис)

С.С. Чижов
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

В.Ю. Борисенко. Аналіз ефективності заходів щодо покращення роботи 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 аналізу ефективності заходів щодо покращення роботи камерних печей. Досліджено шляхи підвищення енергоефективності розглядуваних енергетичних установок. Проведені теплотехнічні випробування камерної печі промислового підприємства та розраховано її тепловий баланс. Запропоновано використовувати електричне поле з метою перерозподілу теплоти у камері печі та підвищення її енергоефективності.

Ключові слова: енергозберігаючі режими, пальник, камерна піч, тепловий баланс, енергоефективність, термічна обробка металу.

ABSTRACT

V.Y.Borysenko. Analysis of methods improving chamber stoves efficiency.

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 analysis of the effectiveness of measures to improve the operation of chamber furnaces. The ways of increasing the energy efficiency of considered energy plants are investigated.

Thermal tests of the chamber furnace of an industrial enterprise were carried out and its heat balance was calculated. It is proposed to use an electric field in order to redistribute heat in the furnace chamber and increase its energy efficiency.

Keywords: saving modes, burner, chamber furnace, heat balance, energy efficiency, heat treatment of metal.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ КАМЕРНИХ ПЕЧЕЙ.....	10
1.1 Аналіз конструктивних особливостей та проблем камерних печей.....	10
1.2 Аналіз можливих заходів покращення роботи камерних печей.....	15
1.3 Аналіз можливості інтенсифікації тепломасообміну у печі електричним полем.....	33
1.4 Висновки до розділу.....	40
2 МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПІЧНИХ ГАЗІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ПРОМИСЛОВІЙ КАМЕРНІЙ ПЕЧІ	42
2.1 Загальна характеристика об'єкта досліджень.....	42
2.2 Розрахунок теплового балансу промислової печі відпалу лиття ТОВ «ЗТМК».....	55
2.2.1 Прихід тепла.....	55
2.2.2 Витрати тепла.....	56
2.3 Моделювання температурних зон та циркуляційного руху пічних газів у камері печі ТОВ «ЗТМК».....	60
2.4 Промислові випробування на камерній печі в умовах ливарного виробництва ТОВ «ЗТМК».....	68
2.5 Висновки до розділу.....	70
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	72
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	74

ВСТУП

Актуальність роботи. Згідно енергетичної стратегії України до 2035р. пріоритетними напрямками енергозбереження є зниження енергоємності 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 енергоємних 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. Єр'оміну, 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 □ аналіз ефективності заходів щодо покращення роботи камерних печей.

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

- аналіз конструктивних особливостей та наявних проблем камерних печей;
- дослідження шляхів підвищення енергоефективності камерних печей;
- розрахунок теплового балансу промислової камерної печі;
- моделювання температурних зон та циркуляційного руху пічних газів у промисловій камерній печі;
- проведення теплотехнічних випробувань на промисловій камерній печі.

Об'єкт дослідження – камерна нагрівальна піч.

Методи та засоби дослідження. Поставлені задачі вирішувались за допомогою розрахунково-теоретичного методу, що базується на використанні класичних законів тепломасообміну, спільне застосування розрахункових і інженерних методик дослідження; експериментальні методи дослідження температурного поля; дослідно-промислові випробування. Використано програмний продукт MathCAD.

Наукова новизна отриманих результатів. Запропоновано і обґрунтовано підвищення енергоефективності камерних печей за допомогою електричного поля.

Практична цінність роботи. На підставі проведених теоретичних досліджень підтверджена можливість корегування теплових потоків у камерних печах електричними методами.

Апробація роботи. Результати роботи представлені на 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. та III Міжнародній науково-практичній конференції «MODERN SCIENCE: INNOVATIONS AND PROSPECTS» Стокгольм, Швеція 5-7 грудня 2021р.

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 33 ілюстрації та 5 таблиць.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАХОДІВ ЩОДО ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ КАМЕРНИХ ПЕЧЕЙ

1.1 Аналіз конструктивних особливостей та проблем камерних печей

Згідно Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [1] пріоритетними напрямками енергозбереження є зниження енергоємності виробництва, скорочення споживання первинних паливно-енергетичних ресурсів за рахунок впровадження новітніх енергоефективних та енергозберігаючих заходів.

На рисунку 1.1 представлені обсяги видобутку природного газу в Україні у 2018 - 2020 рр., млрд куб.м [2]. Аналіз показує, що є тенденція до скорочення видобутку природного газу державними підприємствами. Проте приватні компанії у 2020 р., навіть незважаючи на важкі умови, збільшили на 7% видобуток газу порівняно з 2019 р.

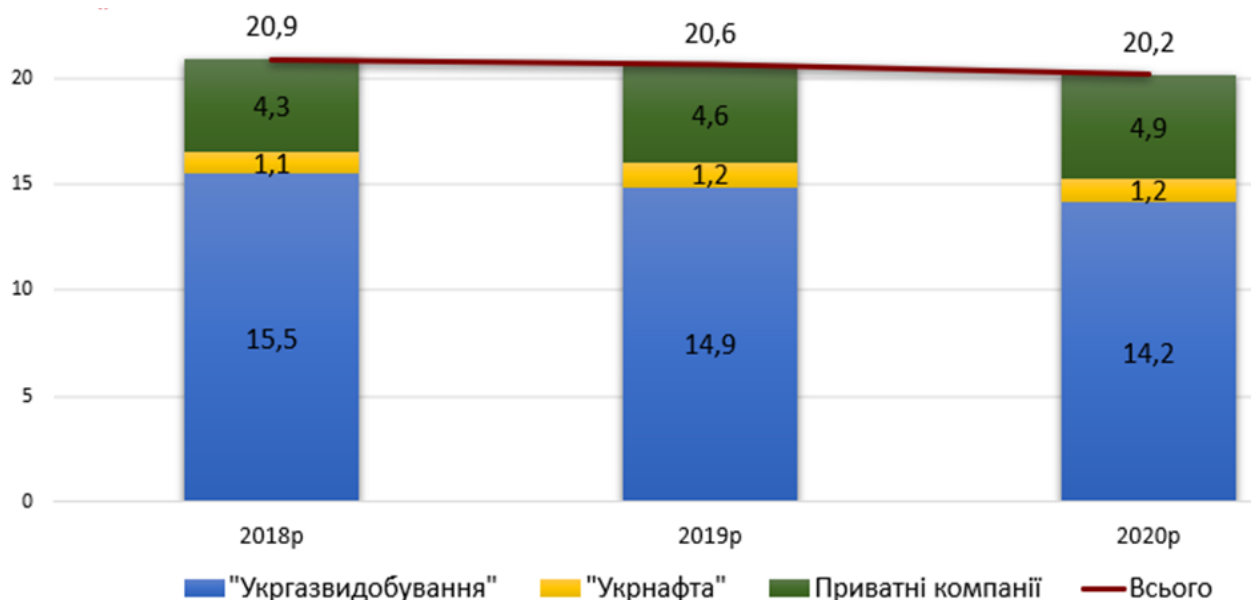


Рисунок 1.1 – Видобуток природного газу в Україні у 2018 - 2020 рр.,
млрд куб.м [2]

На рисунку 1.2 представлена структура кінцевого споживання енергії в Україні за 2019 - 2020 р.р. Як видно з діаграми, у загальній структурі споживання енергії частка природного газу складає 30 % [2].

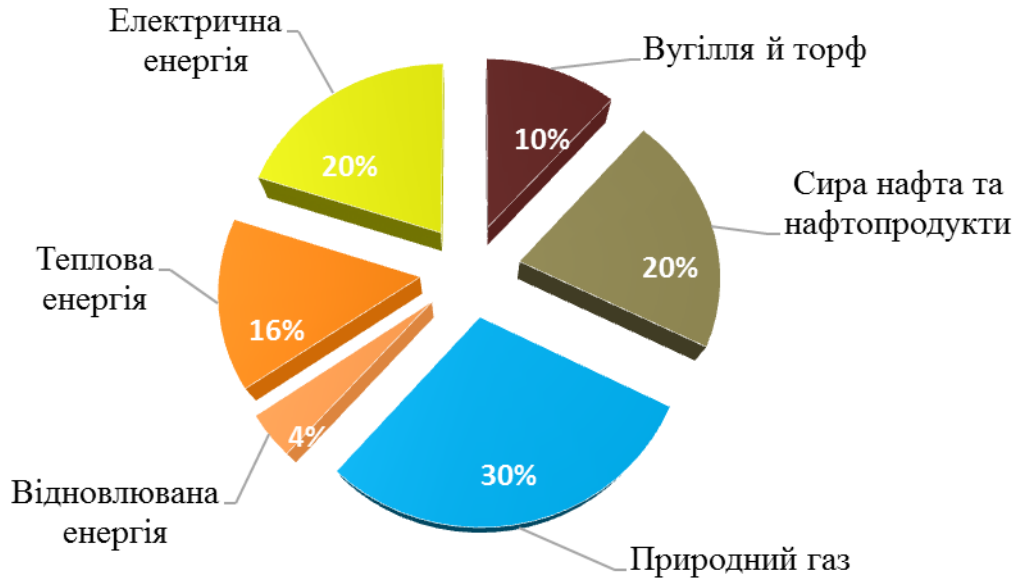


Рисунок 1.2 – Структура кінцевого споживання енергії в Україні за 2019 - 2020 р.р. [2]

За даними Державної служби статистики України, промисловими підприємствами й організаціями у 2020 р. використано 106,5 млн.т.у.п. первинних і вторинних видів. У структурі використаного палива (рис. 1.3) у 2020 році більше 34 % припадало на природний газ, близько 30 % – на вугілля, 13 % – на нафтопродукти, 10,7 % – на кокс і напівкокс і майже 12 % – на інші види палива.

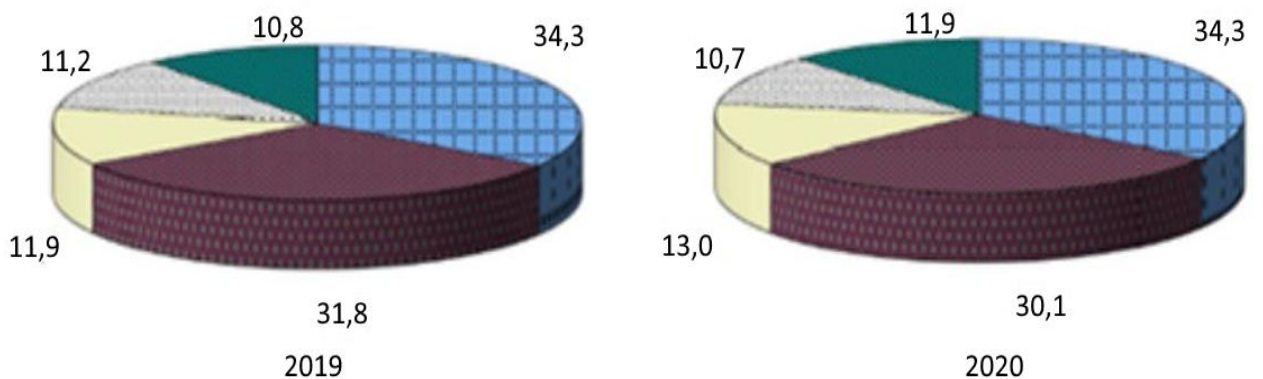


Рисунок 1.3 – Структура використання палива за 2019 - 2020 р.р., % [2]

За видами економічної діяльності основна частина використання палива припадає на промисловість (89 % у 2020 р. та 87 % у 2019 р.) [3,4]. Металургійна промисловість є однією з найбільш ресурсо- та енерговитратних галузей, а чорна металургія – це одна з базових галузей промисловості. Тому модернізація промисловості щодо раціональності енерговикористання є стратегічним важливим завданням державного значення.

Державою визначено [1] основні тенденції та напрями у розвитку металургії, якими є:

- підвищення ефективності використання сировини та енергоресурсів;
- впровадження нової техніки та технологій;
- ресурсо- та енергоощадження при зниженні негативного впливу на навколишнє середовище.

Для забезпечення конкурентоспроможності вітчизняної металургійної продукції як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринку необхідно впроваджувати нові інноваційні технології та здійснювати підвищення енергоефективності агрегатів усього виробничого ланцюжка. Гостро стоять проблеми енергоресурсозбереження при здійсненні технологій нагріву металу при обробці металів тиском та термообробці.

Печі для нагрівання та термообробки металу є найчисленнішим класом теплових агрегатів, як на металургійних, так і на машинобудівних заводах. Теплова обробка є одним з енерговитратних етапів виробництва металевієї продукції. Тому введення у виробництво нових технологій та конструкцій печей є одним з основних напрямків підвищення енергоефективності [5- 9]. З технологічної точки зору термообробка є одним з найважливіших етапів виробництва якісної металевієї продукції, оскільки саме вона визначає підсумкові механічні та фізичні властивості готової продукції.

На сьогодні у промисловості сформувалася гостра нестача сучасних технологій теплової обробки високоякісної сталевий продукції з низькими витратами енергії та ресурсів.

З практичної точки зору, перехід на менш затратні технології нерозривно пов'язаний з модернізацією застарілого та введенням в дію нового обладнання в металургійній галузі. У цьому використанні принципово нових технологічних ланцюжків досить витратним. Тому промислові підприємства, як правило, обмежуються вдосконаленням уже наявних технологій та модернізацією обладнання, автоматизацією, а також оптимізацією виробничих процесів. Енергозбереження на енергоємних металургійних підприємствах України, підвищення енергоефективності теплотехнічних установок, набуває першорядного значення, оскільки воно безпосередньо пов'язане з собівартістю кінцевої продукції [6]. Загальний вигляд камерної печі з викатним подом представлено на рисунку 1.4.

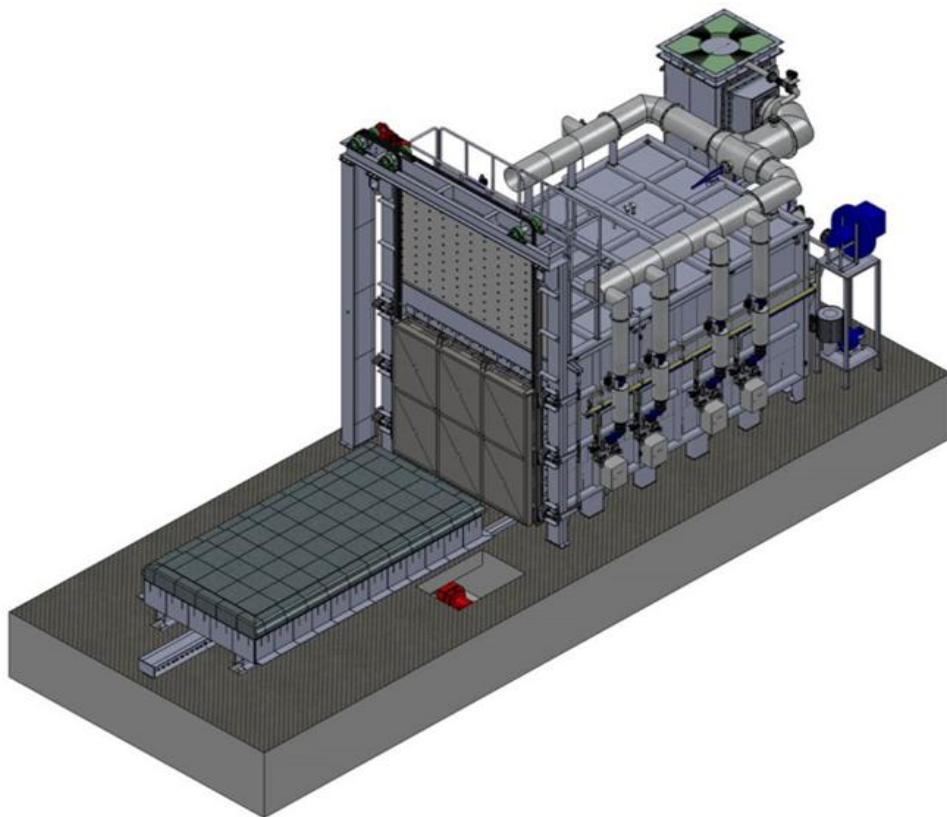


Рисунок 1.4. Загальний вигляд камерної печі з викатним подом

Завдання нагрівальних та термічних печей – нагрівання садки із строго заданою швидкістю та підтримання температури витримки із заданим перепадом температур по поверхні та перерізу виробів. При цьому енергоощадження зводиться до найбільш повного використання хімічної енергії палива в рамках одного агрегату, мінімізації втрат тепла в навколишній простір та зниження загального обсягу шкідливих викидів [7].

Розглядувані енергетичні установки універсальні завдяки широкому спектру регулювання режиму роботи та якості нагрівання металу, але в них є істотні недоліки, такі як великі втрати теплоти з відхідними газами, нераціональний розподіл теплоти за об'ємом камери, значний відсоток угару металу, та ін. [6, 7]. Перелічені недоліки призводять до зменшення енергоефективності теплових агрегатів у цілому.

До особливостей роботи печей можна віднести те, що в таких енергетичних установках проходять термообробку заготовки різних геометричних розмірів, які відрізняються за масою, маркою сталі, початковою температурі печі та виду термічної обробки металу.

У камерних печах з урахуванням нерухомого розташування металу, що нагрівається, для якісного (рівномірного) нагріву садки необхідні однакові умови передачі теплоти у всьому робочому просторі. При одночасному введенні в піч відносно великої та холодної садки, і в силу періодичної роботи печі, відбувається інтенсивна втрата тепла в атмосферу від газів та стінок, внаслідок чого їх температури значно знижуються [8-18].

Камерні печі є універсальними теплотехнологічними агрегатами періодичної дії і, як вже сказано вище, широко використовуються для термічної обробки різних виробів: труб, листової сталі, поковок та іншої продукції з чорного і кольорового металу. За способом завантаження та вивантаження оброблюваних виробів вони поділяються на печі із зовнішньою механізацією та печі з висувним подом. Очевидно, що останні мають найнижчу енергоефективність, тому що при цьому істотно остигає основа печі, що викочується назовні. Камерні печі є універсальними

теплотехнологічними агрегатами періодичної дії і, як вже сказано вище, широко використовуються для термічної обробки різних виробів: труб, листової сталі, поковок та іншої продукції з чорного і кольорового металу. За способом завантаження та вивантаження оброблюваних виробів вони поділяються на печі із зовнішньою механізацією та печі з висувним подом. Очевидно, що останні мають найнижчу енергоефективність, тому що при цьому істотно остигає основа печі, що викочується назовні.

Технологічні режими для камерних печей задаються температурними графіками, які, залежно від виду термообробки та марки металу, можуть бути простими чи складними. Простий режим складається з одного періоду нагрівання при постійній тепловій потужності печі або постійної швидкості нагрівання до заданої температури та наступної витримки при незмінній температурі печі. Складні режими термообробки характеризуються багатоступінчастими графіками нагріву та охолодження з проміжними стадіями витримки за різних температур. Тривалість циклу термообробки включає час підйому або охолодження поверхні металу до заданої температури, часу вирівнювання останньої за обсягом садки і час технологічної витримки, при якій протікають необхідні структурні перетворення в металі або зняття термічних напруг. Зазвичай сумарний час підвищення температури та її вирівнювання вважається часом нагріву, тобто час, протягом якого метал поглинає тепло [19-20].

1.2 Аналіз можливих заходів покращення роботи камерних печей

Заходам щодо покращення теплової роботи печей та підвищенню енергоефективності термічної обробки металу присвячено багато наукових праць. [21 - 24].

Ефективний спосіб підвищення коефіцієнту використання теплоти палива □ це процес рекуперації тепла за рахунок підігрівання димовими газами теплоагрегату компонентів горіння. В результаті інтенсифікуються

процеси їх сумішоутворення, скорочується час нагрівання паливо-повітряної суміші і збільшується швидкість горіння. Слід відзначити, що, це призводить до скорочення довжини факела та дає можливість працювати з меншою кількістю надлишку повітря, в свою чергу, це приведе до зниження собівартості нагріву за рахунок зменшення втрат тепла з відхідними газами [6].

У роботі [6] розглядається питання застосування оптимального енергозберігаючого режиму нагріву в камерних печах, необхідність проведення розрахунку і реалізації необхідного процесу змінювання температурного стану виробу, який нагрівається, за часом або довжиною робочого простору, що призведе фінансову вартість нагріву до мінімуму. Особливість енергозберігаючого режиму нагріву – це процес його інтенсифікації на завершальній стадії. В результаті зменшаться витрати енергії тепла для підтримки більш високої температури заготовок. Вищевказаний режим, який передбачає інтенсифікацію нагріву на кінцевій стадії, призводить також до зменшення втрат металу від окислення [26-28].

Водночас, у зв'язку з проблемами, які виникають через необхідність врахування різноманітних технологічних і конструкційних обмежень, цей розрахунковий режим складно застосувати в реальних виробничих умовах.

З метою зменшення витрат на експлуатацію теплоагрегату, в конструкції робочого простору останнього використовуються потужні однотипні пальники в усіх його зонах. А у разі підвищення теплової потужності теплоагрегату, зони інтенсивного нагрівання потребують заміни кладки на більш вогнетривку, з відповідними теплоізолюючими властивостями та можливістю витримування збільшення температурних меж робочих режимів. В той же час, задля забезпечення енергозберігаючого режиму обробки металу потрібно не лише внести зміни в конструкцію робочого простору печі, а ще і обов'язково володіти інформацією щодо оперативного прогнозу про загальний проміжок часу, впродовж якого кожна металева заготовка знаходиться у робочому просторі (похибка повинна бути

не більше 2 %), при цьому потрібно врахувати усі заплановані та випадкові зупинки технологічної установки [6].

В роботі [6] розглядаються питання щодо способу управління процесом згорання палива, який забезпечує об'ємні пропорційні витрати палива і повітря за рахунок стабілізації заданого поточного значення коефіцієнту витрати повітря. Цей спосіб самий розповсюджений, але в той же час недостатньо ефективний із-за нелінійності залежності необхідного значення коефіцієнту витрати повітря від поточного обсягу споживання палива. У кожному випадку зміни поточної витрати палива, задля забезпечення оптимального значення цього коефіцієнту, технолог-оператор постійно повинен втручатися у процес управління, а це маловірогідно, оскільки фізично дуже складно втілити в життя.

Поліпшення техніко-економічних показників процесу теплової обробки матеріалів можливе також в результаті збільшення тепловіддачі конвекцією.

На практиці це здебільшого досягається засобом підвищення швидкостей і щільностей теплоносіїв, які обдувають поверхню металу. В теперішній час одним із засобів поліпшення теплообміну є використання імпульсних режимів нагріву теплового агрегату, останні дають можливість скоротити витрати палива більше ніж на 10 % [6].

До безперечних переваг такого нагріву опалення перед традиційним безперервним, який здебільшого використовують задля забезпечення температурних режимів у теплових агрегатах відносяться:

- рівномірне нагрівання усього обсягу садки металу;
- відсутні критичні перепади температури;
- підвищується конвективна складова теплообміну із-за ліквідації «застійних» зон щодо аеродинаміки робочого обсягу печі.

Також забезпечується автоматична організація оптимального потоку рециркуляції опалювальних газів, що зменшує тривалість термічної обробки металу та підвищує продуктивність печі за рахунок зменшення витрати

газоподібного палива та більш раціонального використання його виробничої потужності [14]. Однак, незважаючи на численний ряд переваг, для широкого впровадження імпульсного опалення існує низка перешкод:

- встановлені на теплових агрегатах пальникові пристрої, зазвичай, не мають можливості працювати в таких режимах і реалізовувати заданий нагрів;

- не існує універсального методу розрахунку тривалості подачі імпульсу палива, а також його відсутність, що унеможлиблює ще при розробці проекту підшукати необхідні пальники і систему автоматичного керування для конкретного теплоагрегату;

- неможливе широкомасштабне використання напрацьованого позитивного досвіду, отриманого при впровадженні цього методу із-за відсутності вищезазначеної методики. У літературі [10] представлені лише деякі відомості про практичну реалізацію таких режимів і не можуть вважатися універсальними.

Для виконання вимог рівномірності нагріву металу та раціонального використання палива необхідно:

- мати можливість оцінювати теплове навантаження печі за різними зонами;

- мати чітке уявлення про розподіл температурного поля усередині камери;

- володіти відомостями про зміну теплового потоку не лише за обсягом печі, а й у часі з урахуванням параметрів камери, джерел горіння, тяги та ін.

Ці відомості дозволять визначити так звані «мертві зони» камери, зони з низькою щільністю теплової енергії і меншою температурою, що дасть можливість розташовувати вироби, що нагріваються в більш вигідних місцях. Крім того, впливати на процес розподілу теплових потоків можна також аеродинамікою печі, направляючи їх безпосередньо до місця розташування заготовки. Очевидно, що для визначення найбільш вигідних та

ефективних режимів роботи при проектуванні нових та реконструкції діючих печей необхідно провести численні експериментальні дослідження на реальних об'єктах. [29-33]. Але виконання подібних експериментів з вивчення теплообмінних процесів на установках, що діють, є досить складним і дорогим.

Для підвищення ефективності використання палива в камерних печах реалізуються такі заходи:

- удосконалення системи опалення для інтенсифікації циркуляції пічних газів та забезпечення рівномірного нагрівання металу. Тут мається на увазі використання спеціальних пальників та повітряних сопел, форкамер, а також зміна розташування та збільшення їх кількості [31].;
- закривають у період, коли подина викочується на майданчик перед піччю для завантаження в неї садки, відкритий підподовий простір екраном у вигляді відбивної плівки, що кріпиться до заднього торця подини.;
- забезпечення високої та якісної герметичності робочого простору працюючої печі за рахунок застосування високощільних затворів та ущільнювачів, для виключення втрат теплоти через щілини та зазори;
- збагачують з метою зниження витрати енергоресурсів повітря, що подається на пальники киснем. За досвідом розвинених країн [35] застосування зазначеного методу може підвищити продуктивність печей на 15 %. Встановлено [36-39], що застосування кисню для збагачення повітря киснем для опалення промислових печей є досить ефективним способом збільшення ККД останніх;
- розділяють функції нагрівання та витримки між різними печами. Мається на увазі, що слід здійснювати переміщення заготовок з однієї печі до іншої по ходу виконання технологічного процесу, щоб забезпечити їхню постійну теплову потужність.

Застосування волокнистих матеріалів дозволяє значно знизити масу футерування, знизити втрати тепла з акумуляцією тепла кладкою та теплопровідністю через неї. Тільки з допомогою цього можна досягти

економії палива (30...40) % [17,25,27,32]. В цей час більшість нових нагрівальних та термічних печей будуються з використанням модульної технології футерування.

Ще одним способом підвищення енергоефективності є зниження втрат тепла, наприклад, через огороження печей [14,37,38]. З погляду енергоощадження – найбільш важливими характеристиками футерувальних матеріалів є найменші теплопровідність та теплоємність для мінімізації втрат тепла у навколишнє середовище. Значна частина високотемпературних агрегатів на промислових підприємствах України футерована нині вогнетривкими матеріалами з великою щільністю, значення коефіцієнта теплопровідності яких на рівні 1 Вт/(м·К). У разі використання волокнистих, жароміцних теплоізоляційних матеріалів у кладці печі зазначені втрати знижуються в кілька разів. В результаті різко скорочується час розігріву останньої, що дозволяє заощаджувати не тільки енергоресурси, а й зменшувати непродуктивний час роботи агрегату та робочого персоналу.

У нагрівальних і термічних печах матеріал, що нагрівається, як правило, має механічний контакт тільки з подом. Відповідно вимоги щодо механічної стійкості до футерування стін та склепіння мінімальні. У зв'язку з цим все ширше застосування отримують волокнисті вогнетривкі та теплоізоляційні матеріали. Волокнисті матеріали мають великі переваги в порівнянні з традиційними штучними вогнетривками: щільність, що здається, дуже низька (від 80 кг/м³), внаслідок чого коефіцієнт теплопровідності вкрай малий (0,1...0,3) Вт/м·К. Існують волокнисті матеріали більш високої щільності, при цьому мають досить низьку теплопровідність (0,3 Вт/м·К).

Особливо ефективно застосування такої футеровки в термічних печах періодичної дії, в яких через особливості їх режимів роботи спостерігаються постійні коливання температури. Відомі приклади успішної реконструкції футеровок високотемпературних печей за допомогою волокнистих вогнетривів [27,39-41]. Відмінні теплоізоляційні якості останніх забезпечують до того ж зменшення товщини футерування і, як наслідок,

габаритних розмірів теплотехнічних установок, що розглядаються. Застосування футерувальних матеріалів з низькою щільністю забезпечує високу економічність та швидкий розігрів печі за рахунок зменшення загальної кількості тепла, що акумулюється футеровкою. На рисунку 1.5 представлено загальний вигляд волокнистого футерувального модуля, а на рисунку 1.6 - модульна волокниста футерівка печі.



Рисунок 1.5 □ Загальний вигляд волокнистого футерувального модуля

Так само відомо [42-45], що паливна ефективність, продуктивність печі та однорідність розподілу температури всередині її камери залежать і від типу пальників. Застосування найсучасніших рекуперативних та регенеративних пальникових пристроїв з автоматичним регулюванням та різноманітними режимами роботи (імпульсне горіння та високошвидкісне закінчення газового факелу) дозволяє знизити витрати газу та підвищити ефективність його використання.

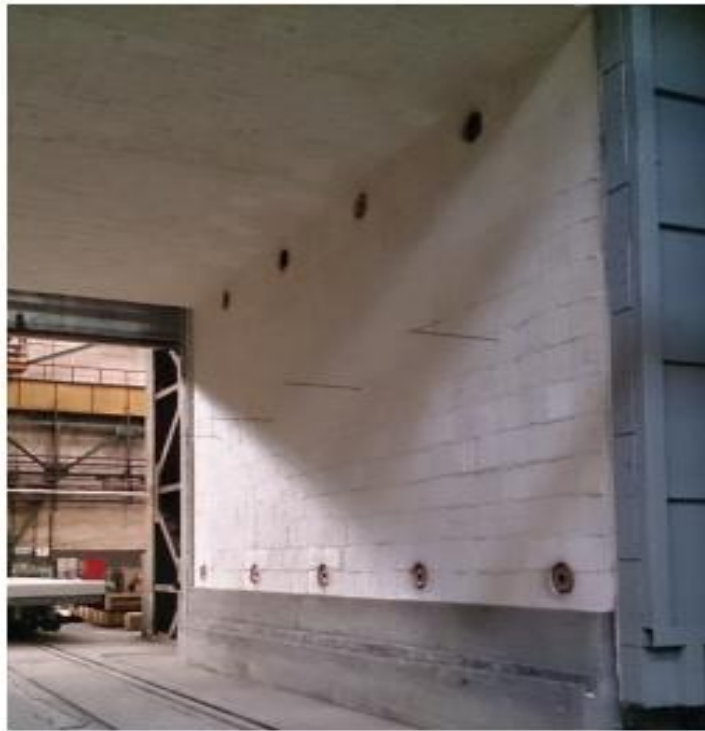


Рисунок 1.6 □ Модульна волокниста футеровка камерної печі

Застосування високоефективних рекуперативних пальників у промислових печах дає можливість підняти температуру повітря, що використовується для горіння, до $(800...1350) ^\circ\text{C}$. Пальники такого типу із високою частотою перемикання дозволяють забезпечити 90 % утилізації теплової енергії. Це досягається за рахунок високоефективного теплообмінника □ металевого або керамічного рекуператора, повітря, що йде на горіння, в якому і нагрівається. У разі коефіцієнт використання палива зростає до 85 %.

Регенеративні пальники використовуються попарно і працюють за принципом короткострокової акумуляції енергії газів, що дає можливість утилізувати $(85...90) \%$ останньої, забезпечуючи підігрів повітря, що надходить до значних температур, які можуть досягати значень всього лише на $(100...150) ^\circ\text{C}$ менших, ніж робоча температура установки. Такі пальники можуть використовуватись у діапазоні робочих температур $(800...1500) ^\circ\text{C}$. При цьому витрати палива скорочуються до 60 %.

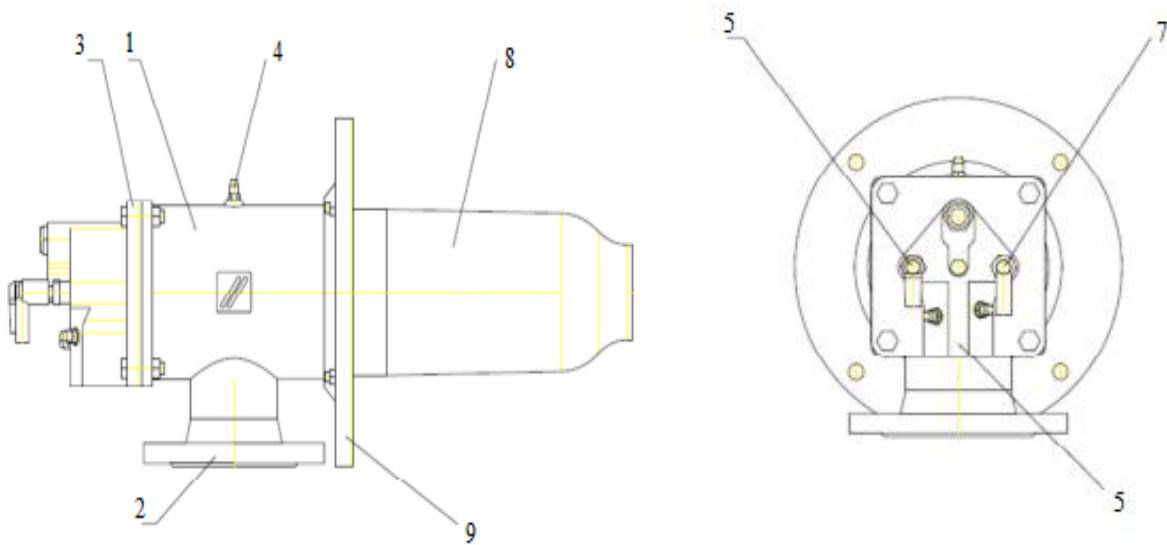
Використовуючи регенеративні та рекуперативні пристрої різних конструкцій шляхом підігріву повітря може досягатись значний економічний ефект. Так, підігрів повітря, що подається на горіння, до 600 °С дає 34 % економії палива [6]. Однак, підігрів такого високого рівня вимагає застосування спеціальних конструкцій теплообмінних апаратів із жароміцних матеріалів, тому на практиці температура повітря рідко перевищує 450 °С, але це дає економію у 26 %.

На думку багатьох авторів [24, 47-48] недостатня утилізація теплоти відхідних газів є основною причиною перевитрати енергоресурсів. Адже з ними в полум'яних печах губиться близько (70...75) % енергії. Застосування пристроїв регенеративного або рекуперативного типу [47,49-51] дає можливість певною мірою використовувати теплоту продуктів згоряння для підігріву повітря, що йде на пальники (а в ряді випадків і для підігріву самого палива). На жаль, в даний час ситуація на промислових підприємствах України характеризується в основному досить низькою ефективністю рекуператорів.

Одним зі способів підвищення рівномірності нагріву у печі є встановлення плоскополум'яних пальників на зводі печі. Така система опалення в основному встановлюється на прохідних та методичних печах. Одним із сучасних прикладів застосування плоскополум'яних пальників є піч з крокуючим подом, побудована фірмою Firma Maerz-Gautschi (Німеччина) у співпраці з фірмою Kromschroeder (Німеччина). У комплексі з автоматикою ці пальники дозволяють здійснювати якісне спалювання природного газу з підтриманням постійного коефіцієнта надлишку повітря.

Поряд із підвищенням рівномірності температурного поля в робочому просторі застосування високошвидкісних пальникових пристроїв дозволяє підвищити коефіцієнт тепловіддачі конвекцією металу, а значить підняти енергоефективність печі, що особливо актуально для низькотемпературних агрегатів, де частка теплообміну випромінюванням невелика. Застосування високошвидкісних пальників дозволяє організувати в робочому просторі

циркуляційний рух продуктів згоряння з зонами високих швидкостей поблизу поверхні металу. [31,32,49-54].Однією з найвдаліших конструкцій є пальники серії ВІС/ЗІС (рисунок 1.7) німецької компанії Elster Kromschroeder [16]. Пальники даної серії мають великі межі регулювання теплової потужності, електроди розпалювання та контролю полум'я та можуть працювати у повністю автоматичному режимі.



1 – корпус пальника, 2 –патрубок для подачі повітря, 3 – газова частина, 4 – штуцер для вимірювання тиску повітря перед пальником, 5 – запальний електрод, 6 – патрубок для подачі газу, 7 – електрод контролю полум'я, 9 – установчий фланець

Рисунок 1.7 □ Загальний вид пальника ВІС 140

Вдалим є рекуперативний пальник Ecomax німецької фірми Elster Kromschroeder. Розроблено кілька типорозмірів з різною потужністю, а також кілька конструкцій вбудованих у пальник рекуператорів, що мають різний ступінь рекуперації тепла відхідних газів, що відходять. Результат застосування пальників Ecomax у промисловій нагрівальній печі описаний у [31]. У ході проведення режиму нагрівання вдається досягати перепаду температур до 2 °С по поверхні металу. Комп'ютерне моделювання

газодинаміки у цій печі показало, що кратність циркуляції газів у робочому просторі становила 9,6 [45-47, 55-58].

У регенеративних пальниках Regemat німецької фірми WS шість регенеративних насадок, що перемикають клапани, й стартовий пальник об'єднані в один компактний модуль [22,32]. Через групу з трьох регенераторів поперемінно надходять гарячі відхідні гази й повітря, що підігрівається (рисунок 1.8). Особливістю даного пальника є режим безполум'яного горіння FLOX, що дозволяє здійснювати рівномірно розподілене по всьому обсягом робочого простору спалювання газу. Це призводить до різкого скорочення концентрації NOx у продуктах горіння, підвищення рівномірності температурного поля у робочому просторі та економії палива до 60 % [23,59-61]. Однак складна конструкція та необхідність використання легованих сталей та жароміцної кераміки призводить до значної вартості даних пальникових пристроїв.



Рисунок 1.8 □ Загальний вид регенеративного пальника Regemat

Застосування швидкісних пальникових пристроїв дозволяє інтенсифікувати теплообмін і різко підвищити рівномірність температурного поля в робочому просторі печі, що в кінцевому результаті призводить до підвищення ефективності. Застосування швидкісних рекуперативних та регенеративних пальників додатково до перерахованого вище знижує витрату палива. Однак, за технологічними обмеженнями буває неможливо застосувати рекуперативні та регенеративні пальники, наприклад, коли потрібно підтримувати в робочому просторі відновлювальну атмосферу шляхом спалювання палива з коефіцієнтом надлишку повітря менше одиниці. Також в поточних умовах часто економічно не доцільно застосувати складні і дорогі пристрої, що мають найвищі показники енергоефективності [6,62,63]. Тому більшість сучасних печей оснащуються швидкісними пальниками з окремим рекуператором, рідше – рекуперативними пальниками.

Застосування рекуперативних пальників, що працюють в імпульсному режимі, в комплексі з волокнистим футеруванням та сучасною системою автоматичного управління дає ще значніше поліпшення показників роботи печі. Так, за даними [6,43] після технічного переозброєння з впровадженням зазначених вище матеріалів та обладнання, вдалося збільшити продуктивність печі на майже 74 % при зниженні абсолютної витрати палива на 13 %, питомої витрати палива на 62,5 % при досягненні рівномірності нагріву до 2 °С по поверхні виробів.

Комплексне технічне переозброєння печі із заміною футерування на волокнисті матеріали, встановленням швидкісних рекуперативних пальників, сучасної системи керування температурним режимом – досить затратно і, на жаль, не завжди є економічно можливим.

Енергоощадження при спалюванні палива в металургійних печах не обмежується утилізацією тепла газів, що відходять з робочого простору. Ефективність використання хімічної енергії палива, в першу чергу, визначається найбільш повною її передачею у вигляді теплоти металу, що

обробляється, тобто залежить від інтенсифікації теплообміну в робочому просторі. У нагрівальних і особливо в термічних печах, поряд з інтенсифікацією теплообміну, потрібна підтримка мінімально можливого перепаду температур робочого простору. Це вимога до підвищення якості металічної продукції, що випускається, а, отже, до підвищення конкурентоспроможності та ресурсоефективності.

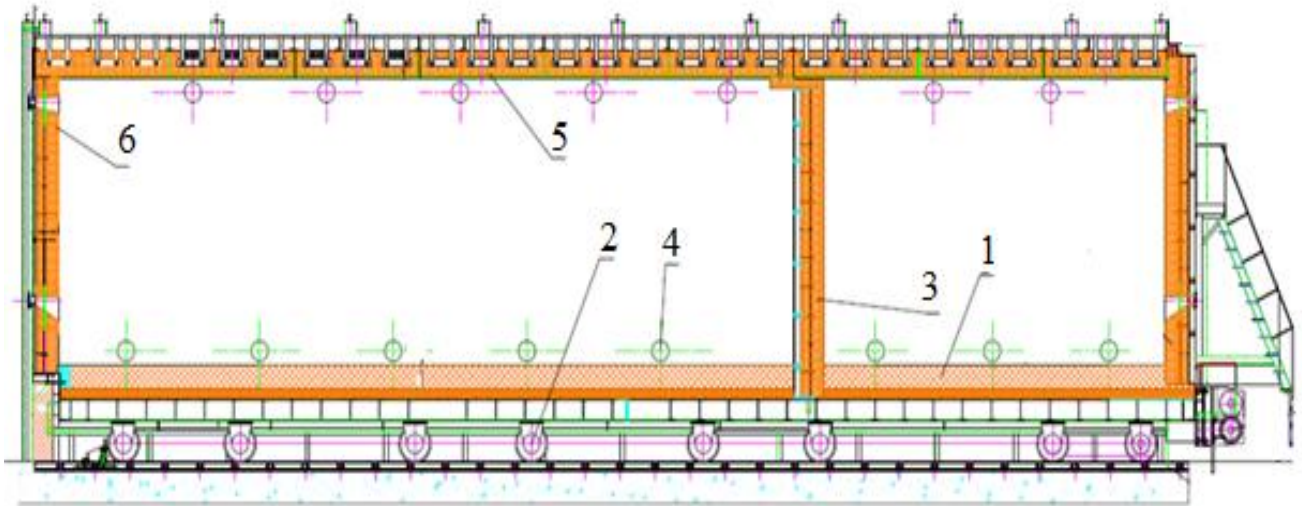
Одним із дієвих способів підвищення ефективності теплообміну є струменево-факельне опалення. Його суть полягає в нагріванні спеціальними струменевими смолоскипними пальниками, спрямованими безпосередньо на садку. Коефіцієнти конвективного теплообміну можуть досягати $300 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Завдяки такому інтенсивному нагріванню вдається суттєво скоротити час нагріву, а забезпечити високий ККД дозволяє утилізація тепла газів, що відходять, безпосередньо в робочому просторі. Спалювання палива в печах із струминно-факельним опаленням відбувається безпосередньо поблизу виробів, що нагріваються, що дозволяє додатково підвищити тепловіддачу на метал і знизити теплове навантаження на футерування. Так, вдалося знизити витрату палива в (1,9...2,2) рази, збільшити стійкість футерування, вдвічі знизити викиди оксидів азоту, підвищити продуктивність печі на 15 %. Струменевий метод опалення також активно застосовується за кордоном у прохідних та методичних нагрівальних печах кольорової металургії: італійською фірмою COIM, німецькою Otto Junker GmbH, а також США.

Однак цей метод має дуже обмежену сферу ефективного застосування. Струменево-факельне опалення забезпечує якісну теплову обробку виробів і високий ККД тільки при нагріванні круглих, або вузьких листових виробів у печах безперервної дії із зосередженим димовідведенням. Даний метод не може застосовуватися в садочних печах через різноманітну геометрію оброблюваних виробів.

Однією з головних проблем теплової обробки великогабаритних виробів є дрібносерійний, а в цей час і штучний характер виробництва, що в комплексі зі складною геометрією та великою масою металу унеможливорює

застосування високопродуктивних печей, що безперервно працюють. Для теплової обробки цього типу продукції використовуються камерні печі періодичної дії. Велика різноманітність маси та розмірів виробів, що випускаються, потребує встановлення цілого парку печей, що призводить до великих витрат на їх обслуговування. Тому тепер на машинобудівних підприємствах часто вся номенклатура продукції обробляється в печах, які спроектовані під найбільші з можливих габаритів садки металу. Це призводить до зниження ККД агрегатів та перевитрати палива.

Прикладом агрегату, що має можливість обробки виробів, що значно відрізняються за габаритами з високим ККД є піч з робочим простором, що розділяється, з викочуваним подом площею 62,8 м². Тепловий агрегат призначений для проведення термообробки зварних виробів. На поді печі може встановлюватися спеціальна перегородка, що дозволяє розділяти робочий простір на 2 частини 6 і 12,6 м завдовжки (рисунок 1.9). У разі теплової обробки габаритних виробів використовується весь робочий простір. У разі обробки невеликої садки металу, на под встановлюється перегородка, і частина робочого простору, що не використовується, відключається. Футерування стін та склепіння виконане за спеціальною панельною технологією з волокнистих матеріалів. Система опалення заснована на 30 швидкісних пальниках Есомах 5М, що працюють в імпульсному режимі. Теплотехнічна установка обладнана сучасною трирівневою АСУ ТП, що дозволяє проводити термообробку в повністю автоматичному режимі з підтримкою заданої температури в п'яти віртуальних зонах управління. Застосована в конструкції печі технологія дозволила досягти рівномірності нагріву до 3 °С робочого простору на етапі витримки. У ході проведення режиму з встановленою перегородкою температура в невикористовуваній частині робочого простору не перевищувала 40 °С, що забезпечується герметичною перегородкою.



1 – викочуваний под печі, 2 – ходова частина поду, 3 – перегородка, яка знімається, 4 – пальники, 5 – склепіння, 6 – торцева панель футерування печі

Рисунок 1.9 – Повздовжній розріз печі

Використання мікропроцесорів для керування горінням та режимами нагрівання (охолодження) печі, дозволяє забезпечити сумарну економію енергії, скорочення тривалості термообробки і, як наслідок, підвищення продуктивності агрегатів та більш точне регулювання температури на кінцевій стадії режиму термічної обробки матеріалів. Тут особливо важлива роль приділяється точності математичних моделей теплового процесу, що використовуються в алгоритмах управління [33,43,68].. Впровадження таких комп'ютеризованих систем забезпечує до того ж можливість збирання та зберігання інформації (запис архіву параметрів та подій) для автоматичної генерації паспорта термообробки виробу.

Щодо способів зниження угару при нагріванні сталі, то вони поділяються на дві групи [6,24,65]. Першу групу складають методи малоокислювального нагріву, що зменшують чад металу в (1,5...2) рази. Вони відносяться до печей відкритого нагріву в продуктах повного згорання і зводяться до впливу на фактори, що визначають окислення металу: вдосконалення конструкції печей і пальників, установка рекуператорів, раціональне розміщення паливних пристроїв і димовідвідних каналів; гарне

ущільнення печі, підтримка тиску пічних газів у зоні високих температур, правильний вибір палива та спалювання його з мінімальним надлишком повітря з метою максимального зменшення вмісту H_2O , SO_2 та O_2 у продуктах згоряння; створення газових завіс над садкою металу, що огортають заготовки, які нагріваються продуктами неповного горіння газоподібного палива [23,67,69,70]. До другої групи належать більш ефективні методи, що дозволяють повністю або майже повністю ліквідувати угар: нагрівання в розплавлених солях і скломасі, застосування захисного покриття, нагрівання в спеціальних контрольованих атмосферах та атмосферах з парами солей літію, нагрівання у продуктах неповного спалювання палива [2,8,24,61].

Для зменшення теплових втрат збільшують швидкість переміщення висувного пода і підйому заслонки печі, застосовують на поді жароміцні бетони для підвищення його експлуатаційної стійкості. Приділяється багато часу ремонтам, налагодженню та заміні обладнання, а саме стану теплоізоляції, автоматизації процесів спалювання палива, досягненню номінальної продуктивності агрегатів, підвищенню рівня утилізації вторинних енергоресурсів.

Скорочення грошових витрат на паливо для нагрівання матеріалів у печах здійснюється також за рахунок заміщення природного газу штучним. Адже відомо, що на металургійному підприємстві повного циклу утворюються різні штучні гази, такі як доменний (побічний продукт виробництва чавуну), коксовий (виробництва коксу), феросплавний (виробництва деяких феросплавів) тощо. Використання подібних газів як паливо або компонент паливної суміші давно відомо, причому більша частина аспектів цього питання вже досить глибоко опрацьована на теоретичному та практичному рівнях.

Хімічна енергія палива перетворюється на теплову енергію продуктів згоряння, які своєю чергою нагрівають робочий простір і залишають його, все ще маючи високу температуру, що досягає значень до $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$. З кожним

кубометром продуктів згоряння, нагрітих до температури 1000 °С з робочого простору втрачається від 1100 до 1400 кДж теплової енергії [4,62-65]. Якщо взяти до уваги кількість нагрівальних і термічних печей на підприємствах та їх продуктивність, то виходить колосальна кількість енергії, що втрачається, яку необхідно утилізувати. На сьогодні частка використання цієї енергії становить 25 % [4,13, 64]. Фізичне відхідних газів можна використовувати в рамках того ж теплового агрегату, в якому воно утворюється. Найпоширенішим способом утилізації тепла димових газів є підігрів повітря, що подається на горіння.

Аналіз публікацій, які присвячені проблемам покращення роботи камерних печей, показав, що аеродинаміка цих теплових установок нераціональна. Поліпшити аеродинаміку камерних печей можливо зміною розташування таких конструктивних елементів як пальникові пристрої та вікна для відведення продуктів згоряння [55,56]. Але було встановлено, що це конструктивно та технічно складним завданням, значно збільшити температуру в місці розташування металу за рахунок запропонованих конструктивних змін не вдається. На жаль, у даній науковій роботі авторами не проведено моделювання циркуляційного руху пічних газів у камері печі [57].

Необхідність застосування деяких, з перелічених вище, заходів є очевидною, тому що не потребує серйозних капітальних і тимчасових витрат та приносить швидкі результати, але є і такі, що вимагають залучення значних інвестицій або грамотних, наукомістких рішень. Вважається [6,24], що саме на цих етапах криється значний потенціал підвищення енергоефективності виробництва, зниження енергоємності продукції, що випускається, і підвищення її якості.

Різні заходи щодо енергозбереження вимагають різних капіталовкладень і мають різний ефект від впровадження, а отже, і різний термін окупності [9,31,52-56]. Ефективність деяких із них наведена у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Ефективність заходів щодо енергозбереження у камерних печах

№	Заходи щодо енергозбереження	Ефект від застосування заходу	Термін окупності
1	Застосування високоефективних волокнистих вогнетривких та теплоізоляційних матеріалів для футерування промислових печей	- у печах періодичної дії досягається економія енергоносіїв до 40 %, а в печах безперервної дії – до 25 %; - зниження маси футерування печі в 10 разів; - скорочення часу виходу режим до (1,5...2) годин.	до 6 місяців для печей періодичної дії
2	Застосування сучасних газопальникових пристроїв. Застосування рекуперативних плоскополум'яних імпульсних пальників.	Досягається економія палива (10...15) %, а також підвищується безпека роботи теплових агрегатів.	6 місяців
3	Застосування ефективних схем руху теплоносія (протиток, П-подібні печі із зонами рекуперації, примусова конвекція, полум'яні та теплові завіси, рециркуляція продуктів згорання)	Досягається економія палива 40 % та підвищується якість (рівномірність нагріву) термообробки.	5 - 8 місяців
4	Застосування регенеративних та рекуперативних пристроїв	Досягається економія палива (15...25) %	6 – 8 місяців
5	Автоматизація процесів виконання технологічних процесів у печах різного призначення	Досягається економія палива до 15 % та підвищення якості термообробки	до 8 місяців

1.3 Аналіз можливості інтенсифікації тепломасообміну у печі електричним полем

Цікавим у дослідженні можливості інтенсифікації тепломасообміну у печах є науковий напрямок в електрофізиці - електрогідродинаміка (ЕГД), предметом якої є закономірності взаємодії електричних та гідродинамічних полів, оскільки відомо, що одним із способів управління процесами горіння є використання електричного поля.

Застосувувати накладення електричних полів на полум'я можна подвійно. З одного боку, електричне поле можна використовувати для збільшення інтенсивності горіння, з другого – щодо його зменшення, до згасання. Хоча обидві сторони цього впливу однаково цікаві з наукової точки зору, все ж таки більш актуальним питанням є інтенсифікації горіння електричним полем, оскільки область застосування цього явища досить широка.

Вплив електричного поля на полум'я пов'язаний з наявністю в останньому позитивно та негативно заряджених частинок. Це можуть бути електрони, іони та диполі. Слід зазначити, що у кінцевих молекулярних реакціях утворюються десятки, а іноді сотні різних іонів. На думку авторів роботи [8], зростання швидкості горіння при накладенні поля на область підготовки має не газодинамічну природу («іонний вітер», про який буде нижче), а пов'язаний з прямим впливом поля на кінетику хімічних реакцій. Так, при позитивно зарядженому центральному електроді, електрони, що генеруються фронтом полум'я, під дією поля починають рухатися проти потоку газу у напрямку початку галузі підготовки, де викликають ініціювання свіжої суміші і більш повне її згоряння при проходженні через фронт. Певну роль активації горючої суміші перед згорянням грає, ймовірно, також поляризація молекул палива в електричному полі, що підвищує їх хімічну активність.

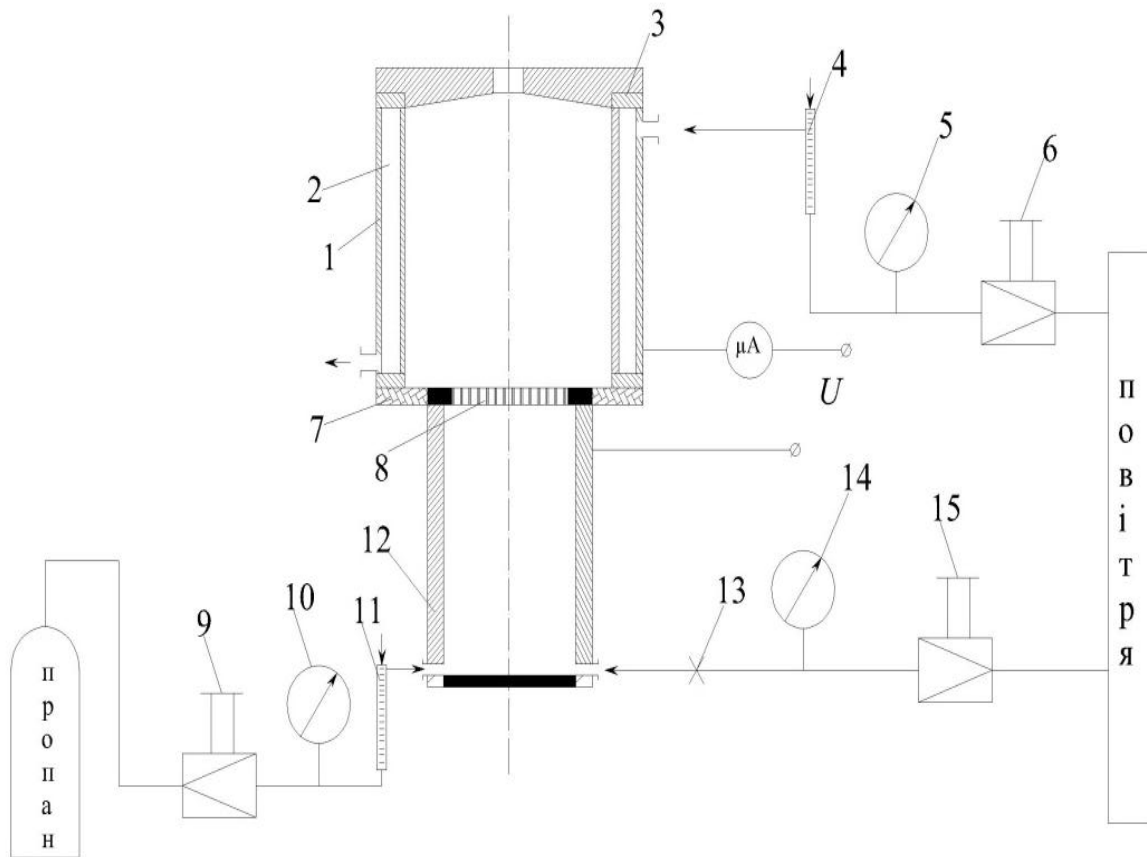
При накладенні поля з'являється «іонний вітер», тобто спрямований рух газу, що викликається захопленням іонами, що рухаються, електрично нейтральних молекул. Напрямок «іонного вітру» збігається із напрямом руху більш важких іонів. При подачі на електрод позитивного потенціалу «іонний вітер» повинен деформувати полум'я, збільшуючи тепловий потік на поверхні. Отже, переміщуючи іони та диполі, електричне поле має аеродинамічний вплив, так званий «іонний вітер».

Що стосується заряджених частинок в електричному полі, то якщо рухливості іонів різних знаків сильно відрізняються один від одного і при цьому напруженість поля достатня для початку руху великих іонів, це призведе до відведення менших іонів з такою великою швидкістю, що їхня концентрація стане дуже малою. І якщо носіями негативного заряду в полум'ї є електрони, при значній напруженості поля їх концентрація стає дуже малою. Якщо концентрація електронів зневажливо мала, то також мала швидкість їх рекомбінації з позитивними іонами.

У роботі [58] було розглянуто зміну характеристики тепломасообміну в камері згорання за умови впливу зовнішнього електричного поля. Тракт охолодження камери згорання містить пористий матеріал. Для збільшення потоку тепла від продуктів згорання до вогневої стінки треба застосувати 900 В постійного негативного потенціалу до камери згорання, що збільшить тепловий потік приблизно у 2,7 рази.

Для аналізу передачі тепла газоподібних продуктів згорання до вогневої стінки під дією зовнішнього електричного поля, було спроектовано й побудовано експериментальну установку (рис. 1.8), яка складається з компонента що охолоджує (повітря), системи вимірювання та реєстрації, магістралі подачі газоподібного окислювача (повітря), камери згорання, а також пального (пропану). У просторі між електрично ізольованими перфорованою пластиною (рисунок 1.10) та корпусом камери згорання застосувалось електричне поле з постійною напругою 900 В. Проаналізувавши підсумки експерименту, авторами було з'ясовано те, що

позитивний потенціал на камері згорання викликає розширення меж витримки полум'я.



1 - камера згорання; 2 - пористий матеріал; 3 - сопло; 4,11 - ротаметри;
5,10,14 - манометри; 6,9,15 - редуктори; 7 - ізоляція; 8 - пластина; 12 - камера
змішування, 13 - мірна шайба [58]

Рисунок 1.10 – Схема експериментальної установки

При зміні полярності ефект інтенсифікації зовнішнього електричного поля на хід запалення й горіння установився не настільки значущим. Проаналізувавши залежності іонізаційного струму від часу (рисунок 1.11) з'ясується, те що при збільшенні його зростає температура охолоджуючого теплоносія, та відповідно вогневої стінки у цілому. З розрахунків випливає те, що на вогневій стінці температура зростає на приблизно 31 % (рисунок 1.12).

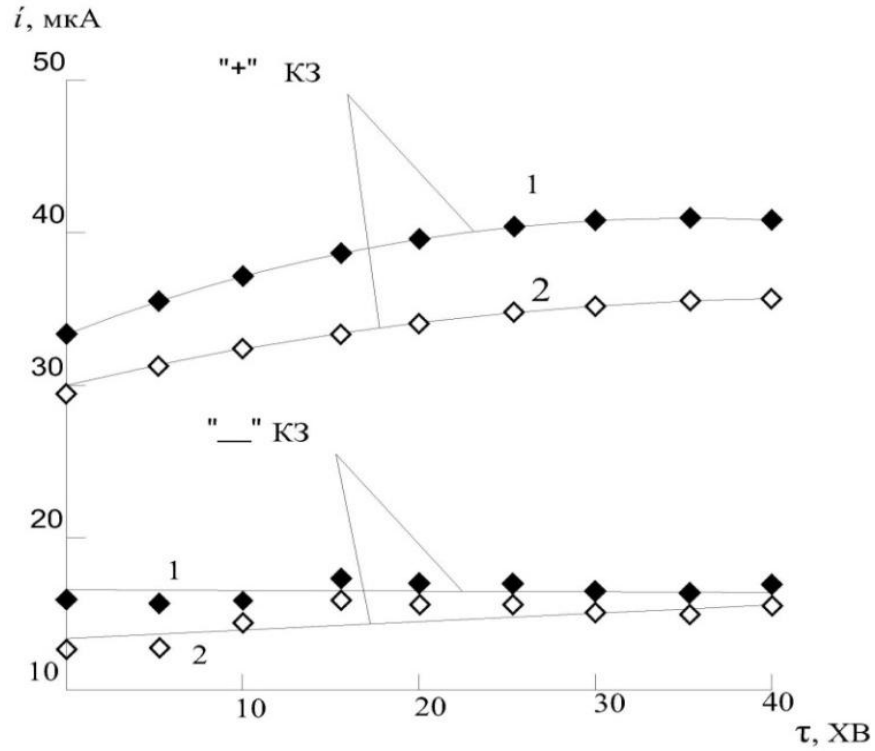
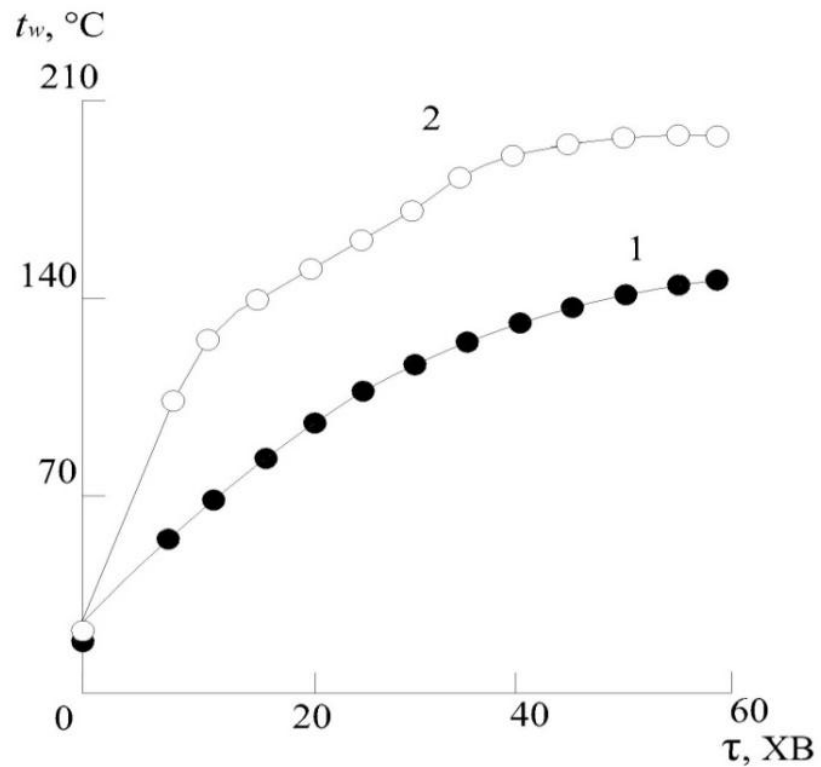


Рисунок 1.11 – Іонізаційний струм у полум'ї [58]



1 \square без напруги, 2 \square під напругою 900В [58]

Рисунок 1.12 – Зміна температури вогневої стінки від часу

Наведені результати підтверджують можливість інтенсифікації тепломасообміну електрофізичним способом. При створенні різниці потенціалів між стінкою камери і пластиною виникає потік позитивно заряджених частинок - іонів до катода та вільних електронів до анода. Причому саме іонний вітер захоплює частинки продуктів згорання і утворює рух іонів.

Авторами доведено, що збільшення або зменшення потоку теплоти від продуктів згорання до вогневої стінки можливо за рахунок прикладення зовнішнього електричного поля, та залежить від полярності та різниці потенціалів [58,68-72]. Іонний вітер взаємодіє пограничним шаром стінки, через що змінює його теплофізичні та геометричні параметри, змінюючи значення щільності конвективного потоку.

Інноваційні напрацювання щодо підвищення енергоефективності теплових установок мають першочергове значення, оскільки зменшення кількості нагрівальних печей у перспективі нинішньої промисловості є маровірогідним та викликає сумнів.

На даний час існує чимало можливих рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності газових нагрівальних об'єктів, але більшість з них потребує значних капіталовкладень. На нашу думку, основною причиною цього є те, що при вирішенні зазначеної проблеми енергоефективності практично не досліджувалися і не використовувалися можливості позитивної зміни температурних режимів всередині печі за рахунок корегування напрямку теплових потоків у ній з метою передачі відхідними газами максимально можливої кількості теплоти безпосередньо металу, який нагрівається.

Існує чимало публікацій щодо дії електричних полів на процеси горіння [73-78], але питання про їх вплив на потоки тепла залишається відкритим. Тому, вивчення можливості впливу на рух пічних газів зазначеним чином потребує проведення досліджень в подальшому.

Загальновідомо, що в процесі хімічного перетворення, яке здійснюється в результаті ланцюгового розгалуженого процесу, інтенсифікація реакції можлива шляхом введення в суміш газів активних центрів (радикали, атоми, іони). Вищевказані центри взаємодіють з високою активністю - часто майже з нульовою енергією активації. Швидкість таких актів характеризується частотою зіткнень цих центрів з другими складовими елементарних процесів. Загальна швидкість хімічного перетворення висока навіть при низькій концентрації активних часток. Тому, якщо впливати на частоту зіткнень активних центрів електричним полем, з'являється можливість регулювання швидкістю процесу горіння [79-84].

Стаціонарне однорідне полум'я, як правило, електрично нейтральне, однак в ньому існують протилежно заряджені частинки, які також розподілені нерівномірно. Зона реакції та зовнішній конус характеризуються в цілому позитивним зарядом, а внутрішній – негативним. Таке розділення зарядів викликано різною рухливістю позитивних іонів і негативних частинок – електронів. Це підтверджує, що хімічна реакція, яка розвивається у його передній частині є джерелом наелектризованості полум'я . [22,24,85].

В наслідок своєї малої рухливості, позитивні іони, що утворилися при горінні, залишаються, як правило, у місці свого походження, а одночасно створені рухливіші електрони швидко покидають фронт полум'я та утворюють зазвичай негативний заряд у внутрішньому конусі [89-93]. Отже, наявність у полум'ї заряджених частинок у високих (якщо порівнювати з рівноважною) концентраціях і призвело до думки про можливість впливу електричним полем на процес горіння внаслідок його локальної дії на заряджені компоненти, які присутні у полум'ї.

В принципі, цей електрофізичний ефект можна здійснити двома способами : шляхом докладання електричного, магнітного та комбінованих полів до полум'я або методом введення в нього заряджених частинок ззовні. Тому в роботі [92] вивчалися різні механізми утворення іонів в полум'ї та

підтверджено, що за високу концентрацію іонів в ньому відповідає механізм хеміонізації.

При процесах горіння частинки піддаються хімічному перегрупуванню, що призводить до звільнення достатньої кількості енергії задля іонізації одного з продуктів реакції.

Роботи [92] присвячені підвищенню конвективної тепловіддачі електричним полем внаслідок іонного вітру, що зумовлено спрямованим рухом іонізованих частинок під дією на них силових ліній поля.

Проаналізувавши роботи різних авторів [31,70,92], щодо утворення іонів у полум'ї, ми можемо прийняти висунуту ними гіпотезу та вважати встановленим фактом, що максимальна іонізація відповідає фронту полум'я, де відбуваються хімічні процеси, і концентрація заряджених частинок різко зменшується після потрапляння в зону продуктів згорання. І це при тому, що там ще зберігається досить висока температура.

У публікації [67] наведені варіанти прикладання повздовжнього електричного поля до полум'я та можливість зміни його полярності. Тут у одному з варіантів поле утворюється пальником, який заряджений негативно та встановленим у "хвості" полум'я електродом, який заряджений позитивно. Внаслідок, відбувається переміщення позитивних іонів до пальника вниз а електронів - вгору. У другому варіанті навпаки : позитивно заряджений є пальник, а негативно заряджений - електрод. В результаті створюється протилежний потік електронів, а позитивні іони одержують додаткову кількість руху вздовж потоку.

Згідно з останнім варіантом пальник має негативний заряд, тому, позитивні іони з об'єму полум'я підуть до пальника. У цьому випадку буде спостерігатися протилежна картина – від полум'я до позитивно зарядженого пальника буде спрямований потік електронів [67]. Передбачається, що цей процес буде найбільш ефективним при застосуванні електричного поля згідно з варіантом, де потік електронів прискорюється в напрямку пальника, який заряджений позитивно, тобто в бік потоку горючої суміші.

Існує також припущення, що в установках і пристроях, що забезпечують спрямовану передачу тепла від продуктів згорання до теплоконтактної поверхні, якщо прикласти до останньої електричний потенціал, то потік тепла буде ближче до неї. Це пов'язано з тим, що наелектризовані частинки продуктів згорання підійдуть до вищевказаної поверхні та створять біля неї додаткову температурну зону, що збільшить швидкість її нагріву [25,33]. Крім того, механізм можливого впливу електричного поля на поширення потоку тепла передбачає, що заряджені частинки, які набувають достатньо енергії поступального руху, в результаті непружних зіткнень один з одним і з поверхнею нагріву створять нові активні центри у формі вільних атомів, радикалів, нових заряджених або збуджених часток. Така взаємодія забезпечить інтенсифікацію процесу теплообміну [25,29,94]. Слід відмітити, що кількість таких іонізованих частино в продуктах згорання надто мала для створення значного теплового потоку у необхідному напрямку для передачі ними тепла нагрітій поверхні. Отже, аналізуючи вищевикладене, можна припустити, що проблему вирішить штучне утворення теплових бар'єрів. Тож враховуючи те, що в більшість промислових печей як енергоресурс використовують природний газ, вартість якого постійно підвищуються, подальші дослідження в цій галузі безумовно є актуальними.

1.4 Висновки до розділу

1. Проведено аналіз конструктивних особливостей та наявних проблем камерних печей, оскільки гостро стоять проблеми енергоресурсозбереження при здійсненні технологій термічної обробки у розглядуваних енергетичних установках.

2. Проведений аналіз заходів щодо покращення теплової роботи камерних печей показав, що існує велика кількість можливих технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності розглядуваних

теплотехнічних агрегатів, але більшість з них потребує значних капіталовкладень, що не завжди доцільно з точки зору строку окупності вкладених інвестицій.

3. Наукову цікавість викликає застосування електричного поля для інтенсифікації тепломасообміну у камері печі. Тому необхідно виконати розрахункову та промислову оцінки щодо доцільності використання результатів дослідження на реально діючій промисловій печі.

РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПІЧНИХ ГАЗІВ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ НА ПРОМИСЛОВІЙ КАМЕРНІЙ ПЕЧІ

2.1 Загальна характеристика об'єкта досліджень

ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» □ це потужне підприємство, яке має важливе значення для економічної безпеки держави. Але на підприємстві гостро стоять питання технічного переозброєння та модернізації, підвищення ресурсоефективності виробництва та якості продукції, впровадження енергозберігаючих заходів та удосконалення технології виробництва.

Це пов'язано з морально та фізично застарілими промисловими теплоенергетичними установками, які мають вкрай низький ККД, енергоємними теплотехнологічними процесами виробництва, з високою часткою вартості природного газу та електроенергії в структурі собівартості продукції [6,10,14].

Аналіз енергоефективності виробництва комбінату показав, що воно є енергоємним, оскільки на споживання електричної енергії за заводськими даними 2020р. припадає 39, 2 % виробничих витрат, а на споживання паливно-енергетичних ресурсів □ 46,6 %.

Одним з основних напрямів виробництва комбінату є ливарне виробництво. Завданням ливарного виробництва комбінату є виготовлення металевих заготовок, що мають різноманітні габарити та форми.

Основні види енергоносіїв, які використовуються у ливарному виробництві підприємства:

- природний газ;
- електроенергія;
- стиснене повітря;

– технічна вода.

Структура собівартості 1 тони металу ливарного виробництва розглядуваного промислового підприємства представлена на рисунку 2.1.

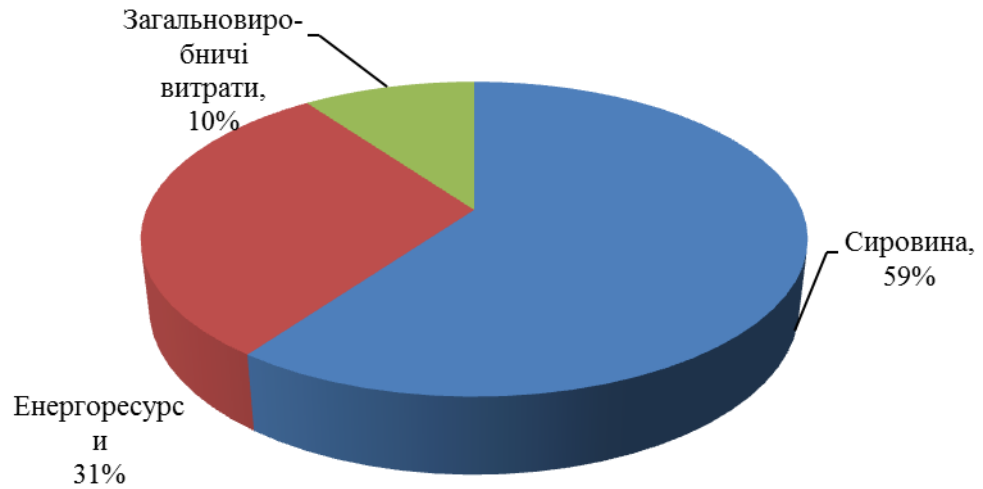


Рисунок 2.1 – Структура собівартості 1 тони металу ливарного виробництва заводу

Структура енергоресурсів для виготовлення 1 тони металу ливарного відділення заводу представлена на рисунку 2.2.

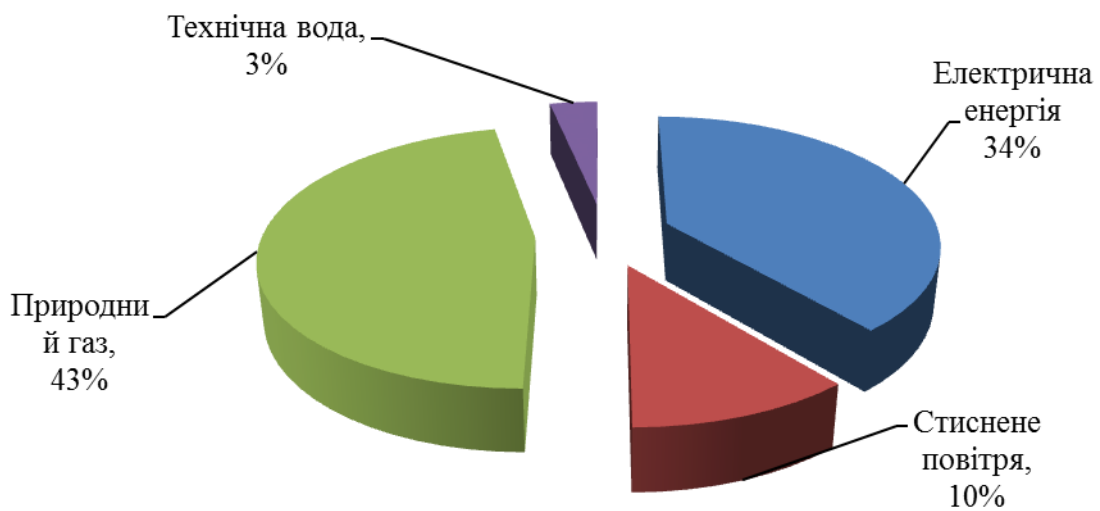


Рисунок 2.2 – Структура енергоресурсів для виготовлення 1 тони металевих заготовок ливарного відділення заводу

Сутність ливарного виробництва зводиться до отримання рідкого, тобто нагрітого вище температури плавлення, сплаву потрібного складу і необхідної якості та заливання його в заздалегідь приготовану форму. При охолодженні сплав твердне і зберігає конфігурацію тієї порожнини, в яку він був залитий. У процесі кристалізації й охолодження сплаву формуються основні механічні і експлуатаційні властивості виливки, що визначаються макро- та мікро- структурою сплаву, його щільністю, наявністю і розташуванням у ньому не металевих включень, утвореннями у виливку внутрішніх напружень, викликаних неодночасним охолодженням її частин та ін. План ливарного відділення з розташуванням промислового обладнання представлено на рисунку 2.3.

До складу ливарного цеху на підприємстві входять такі ділянки:

- шихтова;
- сумішепідготовча;
- формовочна;
- сталеплавильна;
- обрубна.

На шихтовій ділянці знаходяться кран-бункери, працює мостовий кран, на якому знаходиться магнітна шайба, за допомогою якої підіймається металобрухт. Також на цій ділянці є великі ємності, у які засипають пісок та інші допоміжні зв'язуючі матеріали. Правильний вибір формувальних сумішей у ливарному виробництві має дуже велике значення, тому що формувальні суміші впливають на якість одержуваних металевих виливків.

На сумішепідготовчій ділянці пісок та інші допоміжні зв'язуючі матеріали потрапляють на транспортерну стрічку, що висипає їх у бігуни, які ретельно все перемішують.

На формовочній ділянці суміш потрапляє у бункер, після чого відправляється на плац, на якому виготовлюється форма під заливку.

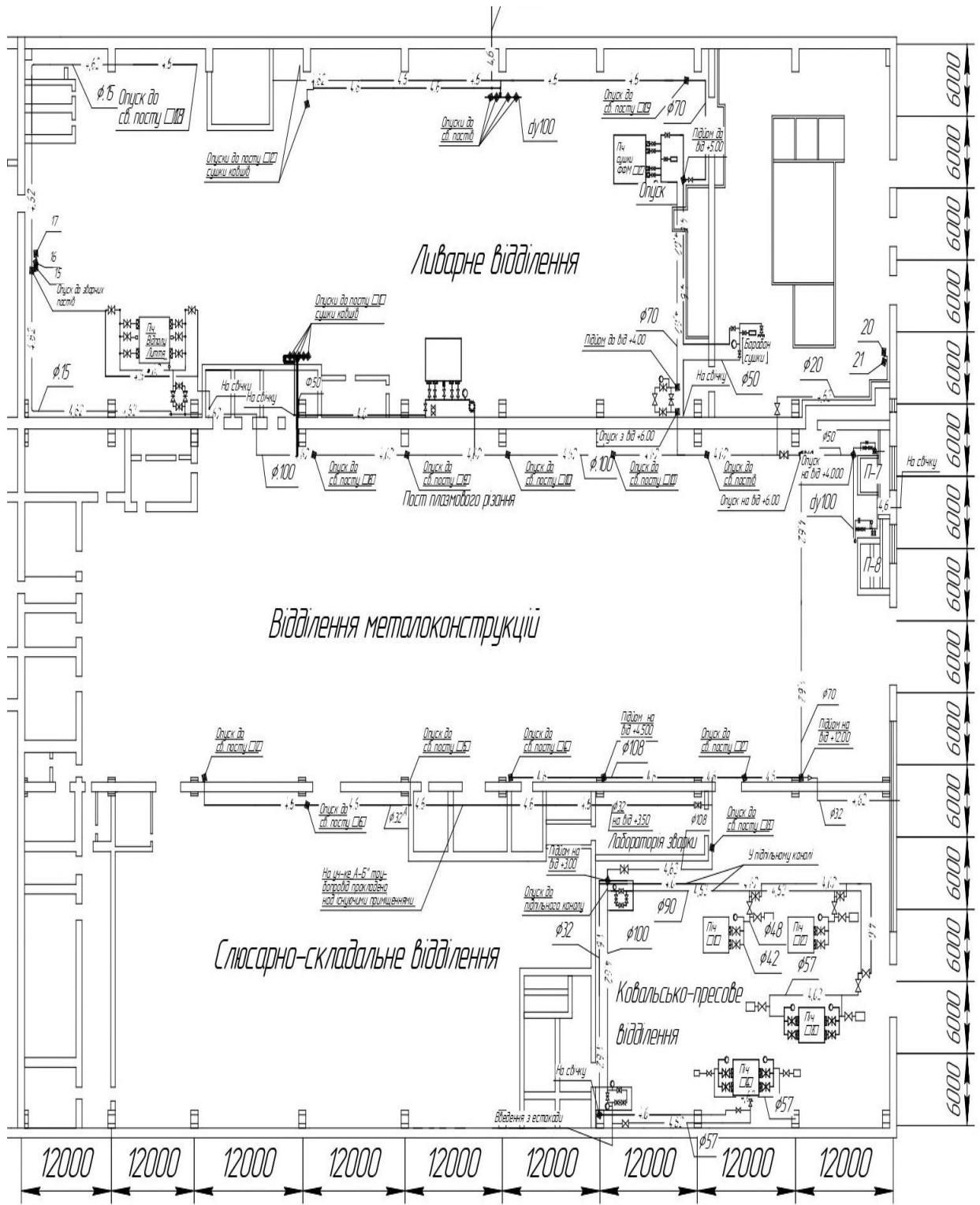


Рисунок 2.3 – План ливарного цеху з розташуванням промислового обладнання

Ливарна піщана форма у більшості випадків складається з двох напівформ: верхньої і нижньої, які отримують ущільненням формувальної суміші навколо відповідних частин (верхньої і нижньої) металевої моделі в спеціальних металевих рамках □ опоках. За допомогою пневмотрамбувальників суміш формується в опоках. У верхній напівформі за допомогою відповідних моделей виконується воронка і система каналів, по яких з ковша надходить ливарний сплав в порожнину форми.

Після ущільнення суміші моделі, власне виливки витягують з напівформ. Потім в нижню напівформу встановлюють стрижень і накривають верхні напівформи. Необхідна точність з'єднання забезпечується штирями і втулками в опоках. Перед заливанням сплаву щоб уникнути підняття верхньої напівформи рідким розплавом опоки скріплюють один з одним спеціальними дужками або на верхню опоку встановлюють вантаж.

На сталеплавильній ділянці установлена дугова сталеплавильна піч, в яку за допомогою мостового крану потрапляє металобрухт. Далі розплавлений метал заливають у форми. Коли метал застигне, то він потрапляє на вибивну решітку, на якій за допомогою вібрації виливка позбавляється формовочної суміші.

На обрубну ділянку потрапляють виливки, на яких залишилась формовочна суміш, яку видаляють за допомогою відбійних молотків.

Якщо для подальшого використання необхідно, щоб метал був ковким та пластичним □ він потрапляє до камерної печі з висувним подом.

Парк термічних і камерних нагрівальних печей, встановлених у ливарному відділенні, представлений в основному старим обладнанням, яке в силу свого морального та фізичного зносу не забезпечує необхідної технологічної точності, не відповідає сучасним вимогам безпеки та не дозволяє вести термічну обробку на якісно новому рівні з мінімальними витратами енергоносіїв.

Камерна піч повинна забезпечувати заданий технологією температурно-часовий режим обробки металевих заготовок і їхню високу рівномірність нагріву. Недосконалістю нагрівальних печей є розкид температур у робочому просторі при термообробці, що досягає (80...100) °С. При нагріванні як злитків, так і заготовок абсолютне значення перепаду температури за обсягом садки металу може бути 50...70 °С,

Для термообробки металу на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» використовується камерна піч з викатним подом, яка опалюється природним газом через чотири працюючі інжекційні пальники. На рисунку 2.4 зображено габаритні розміри такої печі, а на рисунку 2.5 – її схему поперечного перерізу.

Згідно до заданого технологічного процесу необхідно дотримуватись встановлених режимів нагріву, витримки та охолодження заготовок, не виходячи за межі допустимого відхилення за температурою. Для отримання заданих механічних властивостей металу в умовах розглядуваного ливарного виробництва максимальне допустиме відхилення за температурою складає ± 40 °С.

Аналіз технічних рішень, що присвячені проблемам покращення роботи камерних печей, який було проведено у попередньому розділі цієї магістерської роботи показав, що аеродинаміка цих теплових установок нераціональна. Основною причиною цього є те, що при вирішенні проблем підвищення енергоефективності цих енергетичних установок практично не використовувались можливості корегування циркуляційного руху пічних газів всередині печі з метою передачі продуктами горіння максимально можливої кількості теплоти безпосередньо металевій заготовці, що проходить термообробку. То ж дослідження можливості створення способів щодо такого корегування є зараз стратегічним завданням з метою значного покращення теплової роботи розглянутих теплових агрегатів.

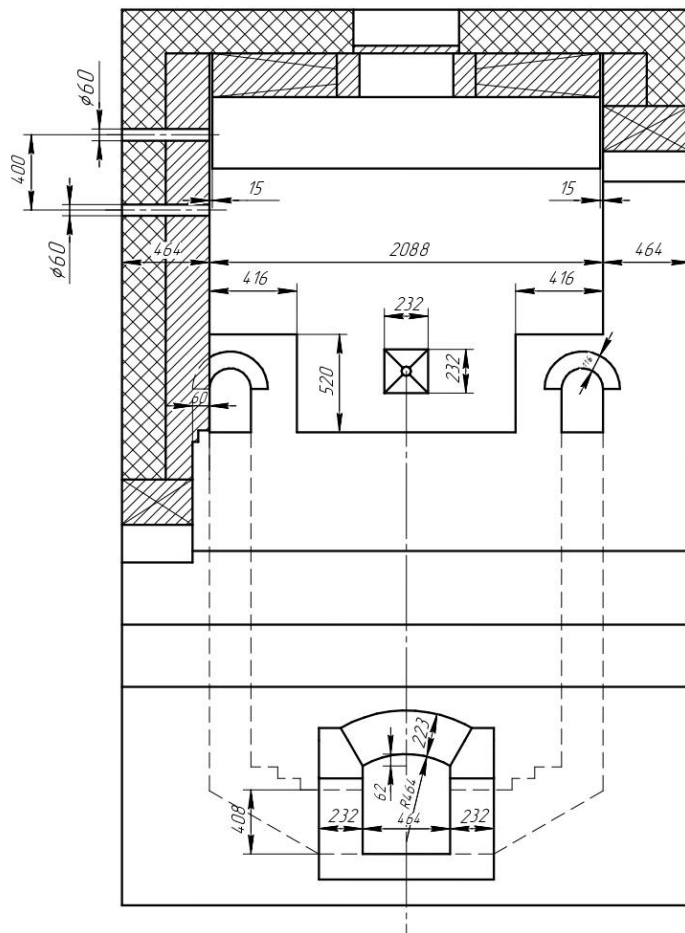
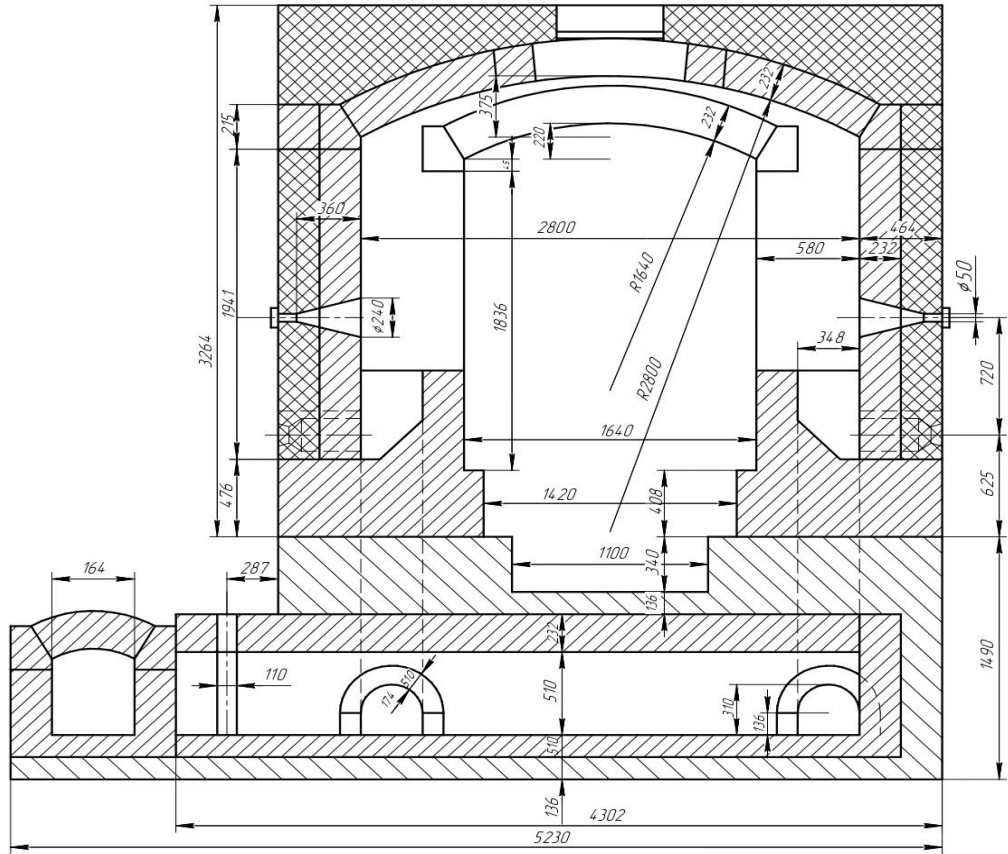
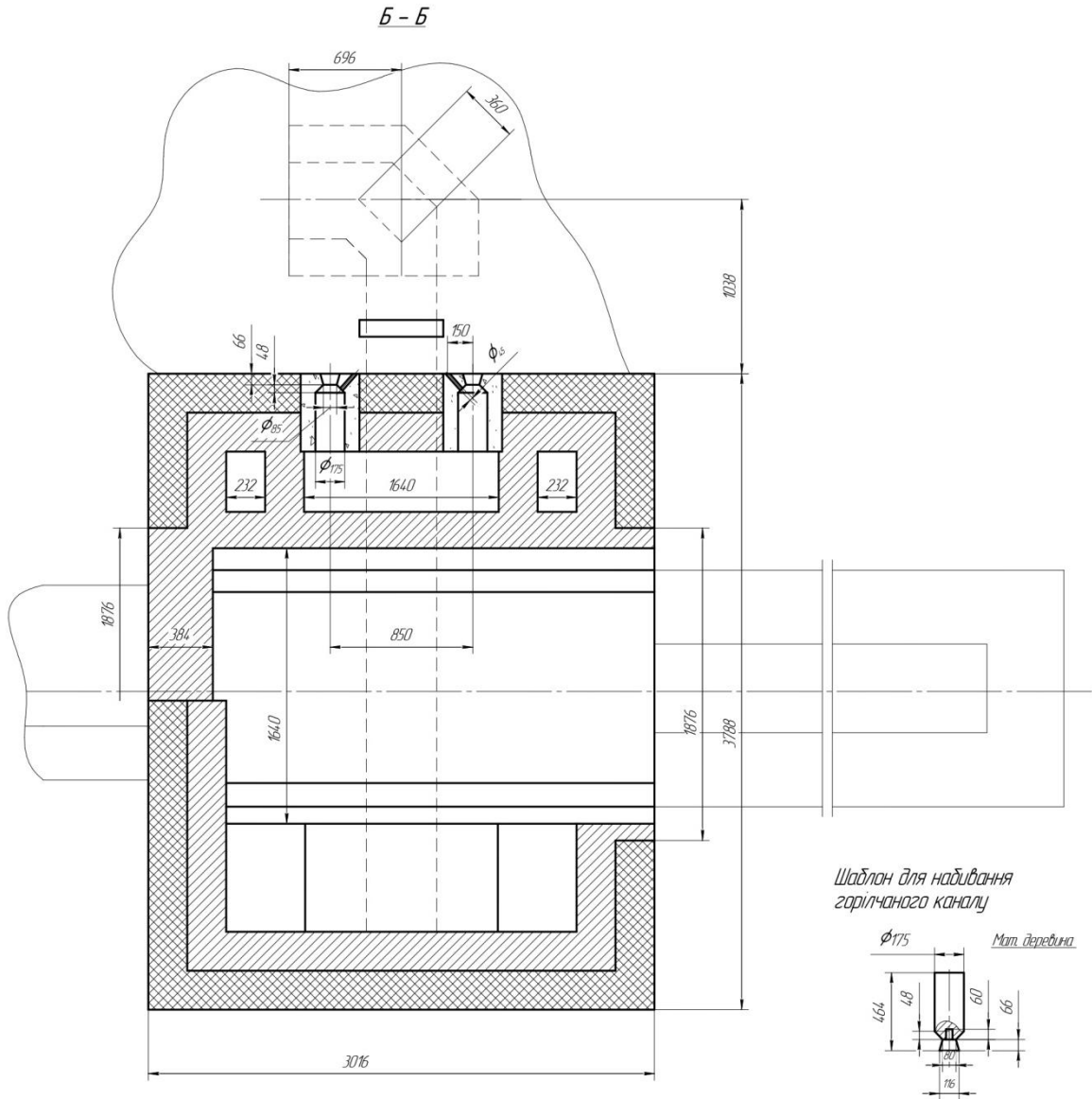


Рисунок 2.4 – Розміри камерної печі відпалу ТОВ «ЗТМК»

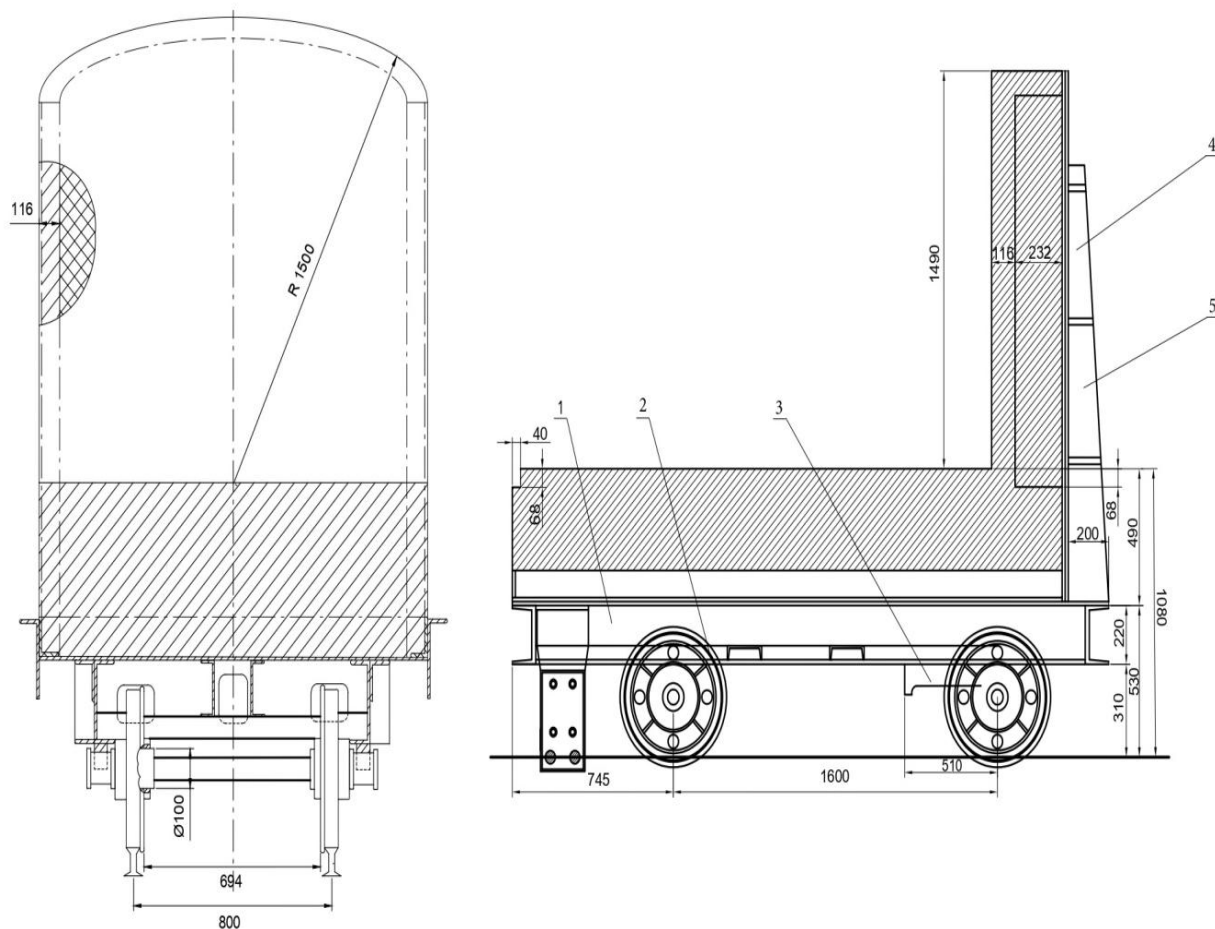


Умовні позначення:

	<i>Шамот кл "Б"</i>
	<i>Діатомова цегла</i>
	<i>Червона цегла</i>
	<i>Діатомова засипка</i>

Рисунок 2.5 – Кладка камерної печі відпалу

На рисунку 2.6 представлено викатний під печі відпалу розглядуваного ливарного виробництва.



1 – рама; 2 – колесо; 3 – направляюча; 4 – теплоізоляція;
5 – цегла

Рисунок 2.6 – Викатний під печі відпалу ТОВ «ЗТМК»

Загальний вигляд камерної печі з викатним подом представлено на рисунках 2.7 та 2.8. Загальний вигляд викоченого поду печі з металевими заготовками представлено на рисунку 2.9.



Рисунок 2.7 – Загальний вигляд відкритої камерної печі з подом



Рисунок 2.8 – Загальний вигляд камерної печі під час відпалу металу



Рисунок 2.9 – Загальний вигляд викатного поду з металевими заготовками

Хімічний склад газів, що відходять представлено у таблиці 2.1. Результати теплотехнічних випробувань камерної печі наведені у таблиці 2.2.

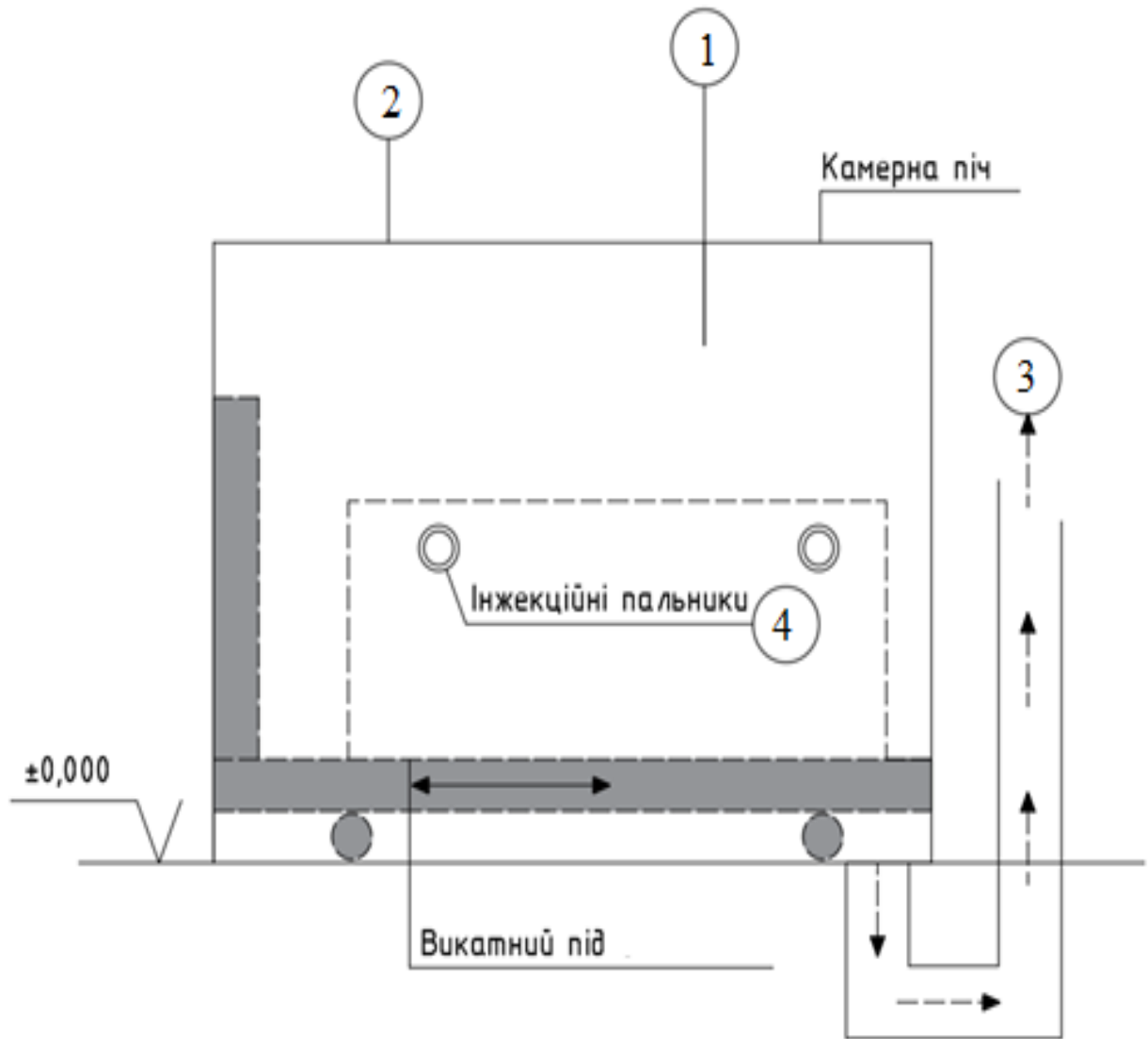
Таблиця 2.1 – Хімічний склад газів, що відходять

№ з/п	Найменування складової	Значення показника	Одиниця вимірювання
1	O ₂	12,8	%
2	CO ₂	4,6	%
3	CO	31	ppm
4	NO _x	43	ppm

Таблиця 2.2 – Основні характеристики промислової печі відпалу

№ з/п	Найменування	Значення показника	Одиниця вимірювання
1	Вид палива	природний газ	-
2	Нижча теплота згоряння природного газу	33901	кДж/м ³
3	Тип пальникових пристроїв	інжекційні	-
4	Кількість пальникових пристроїв	4	шт.
5	Продуктивність печі	910	кг/год
6	Витрата природного газу	81,62	м ³ /год
7	Барометричний тиск	100565	Па
8	Тиск газу в колекторі	(29420...39227)	Па
9	Тиск газу на пальнику	(19613... 39227)	Па
10	Робоча температура печі	925	°С
11	Середня теплоємність кладки печі	0,934	кДж/м ³ ·°С
11	Температура газів, що відходять	397	°С
12	Теплоємність газів, що відходять (середня)	1,4246	кДж/м ³
13	Коефіцієнт витрати повітря	2,41	-
14	Питома витрата природного газу	0,0897	м ³ /кг
15	Коефіцієнт використання теплоти	60,94	%
16	ККД	18,5	%

Точки замірювання робочих параметрів печі представлено на рисунку 2.10, а список вимірювальних приладів, які використовувались при проведенні експериментів представлено у таблиці 2.3.



- 1 □ температура в печі; 2 □ температура зовнішньої поверхні;
- 3 □ температура та хімічний склад димових газів, коефіцієнт витрат повітря;
- 4 □ температура та тиск газу перед пальниковими пристроями

Рисунок 2.10 – Точки замірювання робочих параметрів печі

Таблиця 2.3 – Список використаних вимірювальних приладів при проведенні натурних експериментів на камерній печі

№ п/п	Найменування	Найменування приладу
1	Температура металу	Лазерний пірометр Optris LaserSight
2	Температура повітря на горіння	SPECTRA 1600 GL TT
3	Тиск газу в колекторі, перед пальниковими пристроями та перед установкою	МПЗ
4	Розрядження у енергетичній установці	ТНМП-52
5	Температура у тепловому агрегаті	Ш4500
6	Температура поверхні теплового агрегату	ТТ
7	Температура та хімічний склад газів, що відходять	SPECTRA 1600 GL

2.2 Розрахунок теплового балансу промислової печі відпалу лиття ТОВ «ЗТМК»

Для виявлення причин низької енергоефективності камерної печі, визначення основних втрат теплоти з її робочого простору та шляхів їх усунення розраховано тепловий баланс, в якому враховані такі складові [86-87]. Тепловий баланс розраховано на основі даних таблиці 2.2.

2.2.1 Прихід тепла

Тепло, отримане від горіння палива, кДж/год

$$Q_{\Gamma} = Q_{\text{p}}^{\text{H}} \cdot V_{\text{п}}, \quad (2.1)$$

де $V_{\text{п}}$ - витрата природного газу, м³/год;

Q_{p}^{H} - нижча теплота згоряння палива.

$$Q_{\Gamma} = 81,62 \cdot 33901 = 2767000.$$

Тепло, яке вноситься повітрям, кДж/год

$$Q_{\text{в.ф.}} = V_{\Gamma} \cdot L_{\text{о}} \cdot c_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}}, \quad (2.2)$$

де $L_{\text{о}}$ - теоретично необхідна кількість повітря, для спалювання 1 м³ природного газу, м³/м³;

$c_{\text{п}}$ - теплоємність повітря при $t_{\text{п}}$, кДж/(м³·°C);

$t_{\text{п}}$ - температура повітря, °C.

$$Q_{\text{в.ф.}} = 81,62 \cdot 9,64 \cdot 2,41 \cdot 1,3 \cdot 40 = 98520$$

Теплота екзотермічної реакції, кДж/год

$$Q_{\text{екз}} = 5656 \cdot M_{\text{о}}, \quad (2.3)$$

де 5656 – питома теплота окислення, кДж/кг;

$M_{\text{о}}$ - маса утвореної металевої окалини, кг/год

$$M_{\text{о}} = G \cdot \delta, \quad (2.4)$$

де G – продуктивність печі, кг/год;

δ - угар при нагріванні, кг/кг.

$$M_{\text{о}} = 910 \cdot 0,02 = 18,2.$$

$$Q_{\text{екз}} = 5656 \cdot 18,2 = 102939.$$

2.2.2 Витрати тепла

Витрати теплоти на нагрів металу кДж/год

$$Q_M = G \cdot c_M \cdot (t_M^K - t_M^П), \quad (2.5)$$

де c_M – теплоємність металу, кДж/(кг · °С);

$t_M^K, t_M^П$ – початкова та кінцева температура металу, °С.

$$Q_M = 910 \cdot 0,67 \cdot (925 - 25) = 548730.$$

Тепло, що акумульоване кладкою, кДж/год

$$Q_{ак} = V_{кл} \cdot \rho_{кл} \cdot c_{кл} \cdot (t_{кл}^K - t_{кл}^П), \quad (2.6)$$

де $V_{кл}$ – об'єм кладки, м³;

$\rho_{кл}$ – середня щільність вогнетриву, кг/м³;

$c_{кл}$ – середня теплоємність кладки, кДж/(кг·°С);

$t_{кл}^K, t_{кл}^П$ – температура кладки у кінці та на початку нагрівання металу, °С.

$$Q_{ак} = 11,67 \cdot 1900 \cdot 0,93437 \cdot (57 - 25) = 662969$$

Втрати тепла зовнішніми поверхнями печі, кДж/год

$$Q_{зп} = q \cdot F_{зп}, \quad (2.7)$$

де q – питомий тепловий потік, кДж/(м²·год);

$F_{зп}$ – площа зовнішньої поверхні печі, м²;

$$F_{п.} = F_{пер.п.} + F_{зад.п.} + F_{бок.п.} + F_{зв}$$

$F_{пер.пов.}$ – площа передньої поверхні;

$F_{зад.пов}$ – площа задньої поверхні;

$F_{бок.пов}$ – площа бокової поверхні печі;

$F_{зв.}$ – площа зводу печі.

$$Q_{пов} = 23,78 \cdot 2727 + 22,34 \cdot 3561 + 15,79 \cdot 5824 = 236362.$$

Втрати теплоти на нагрів транспортуючих пристроїв, кДж/год

$$Q_{ак} = m_T \cdot c_T \cdot (t_k - t_p), \quad (2.8)$$

де m_T - маса транспортуючого пристрою, кг/год;

c_T - теплоємність транспортуючого пристрою, кДж/год $^{\circ}$ С;

t_k, t_p - кінцева та початкова температури транспортуючого пристрою, $^{\circ}$ С.

$$Q_{ак} = 186 \cdot 0,7123 \cdot (700 - 25) = 89430.$$

Втрата тепла з відхідними газами, кДж/год

$$Q_{від} = B_{п} \cdot V_{від} \cdot c_{від} \cdot t_{від}, \quad (2.9)$$

де $V_{від}$ - об'єм газів, що відходять $м^3/м^3$;

$c_{від}$ - середня теплоємність газів, кДж/м $^3 \cdot ^{\circ}$ С;

$t_{від}$ - температура газів $^{\circ}$ С.

$$Q_{мин} = 81,62 \cdot 24,25 \cdot 1,4246 \cdot 397 = 1119417.$$

Результати розрахунків теплового балансу зводимо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку теплового балансу камерної печі

Прихід теплоти	Величина	Витрати теплоти	Величина
1	2	3	4
Тепло, отримане від горіння палива, кДж/год (%)	27667000 (93,21)	Кількість тепла, витраченого на нагрів металу, кДж/год (%)	548730 (18,48)
Тепло, яке вноситься з повітрям, кДж/год (%)	98520 (3,32)	Тепло, акумульоване кладкою, кДж/год (%)	662969 (22,33)

Продовження таблиці 2.3

1	2	3	4
		Втрати тепла зовнішньої поверхні печі, кДж/год(%)	236362 (8,1)
Тепло екзотермічних реакцій, кДж/год (%)	102939 (3,47)	Тепло, витрачене на нагрів транспортуючих пристроїв, кДж/год (%)	89430 (3,01)
		Втрати тепла з відхідними газами, кДж/год (%)	1119417 (37,71)
		Невраховані втрати, кДж/год (%)	311551 (10,41)
Всього, МДж/год (%)	2968,459 (100,0)	Всього, МДж/год (%)	2968,459 (100,0)

Результати статей витрат теплоти теплового балансу у відсотках представлені діаграмою на рисунку 2.8.

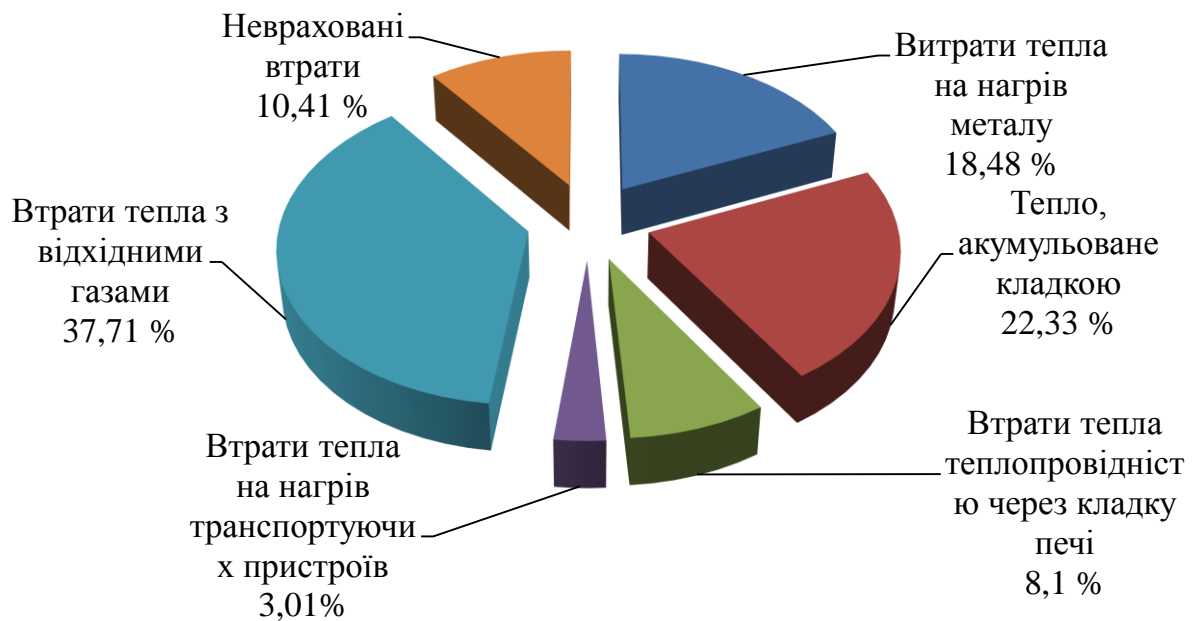
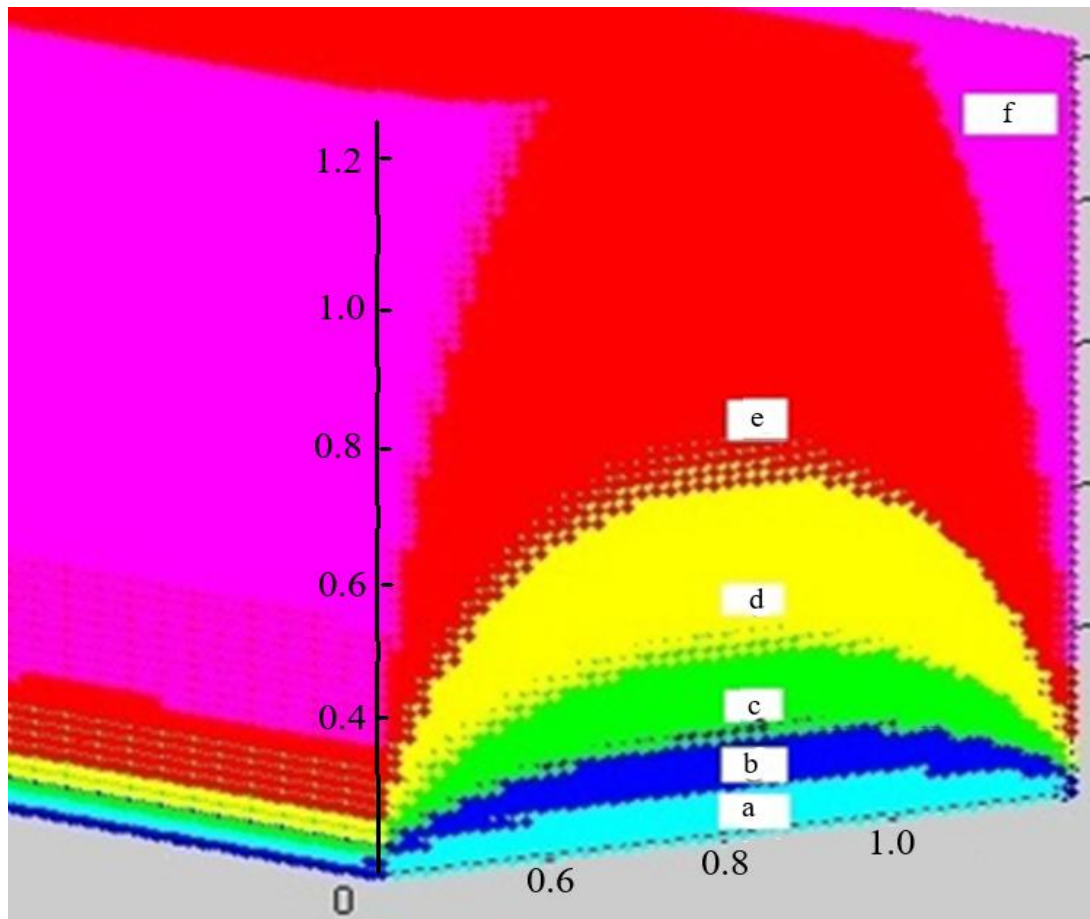


Рисунок 2.11 – Результати статей витрат теплоти камерною піччю

Враховуючи результати теплового балансу печі, основним резервом економії палива є використання теплового потенціалу продуктів згорання, який складає більше 37 % від загальних втрат тепла камерної печі.

2.3 Моделювання температурних зон та циркуляційного руху пічних газів у камері печі ТОВ «ЗТМК»

На рисунку 2.12 та у таблиці 2.4 представлено розподіл температурних зон у камерній печі.



a) 755 – 825 °C; b) 825 – 885°C; c) 885 – 950°C; d) 950 – 1015°C;
e) 1015 – 1085°C; f) 1085 – 1145°C.

Рисунок 2.12 – Розподіл температурних зон у камерній печі

Таблиця 2.4 Розподіл теплоти за зонами у печі

Зона	a	b	c	d	e	f
Кількість розрахункових точок	17452	18405	30555	61996	112221	34114
Реальний обсяг, м ³	0,32	0,34	0,55	1,14	2,06	0,63
Розподіл теплоти, %	6,3	6,6	10,8	22,7	41	12,6

Для більшої наглядності розподіл теплоти за умовними зонами печі представлено на діаграмі (рис.2.13).

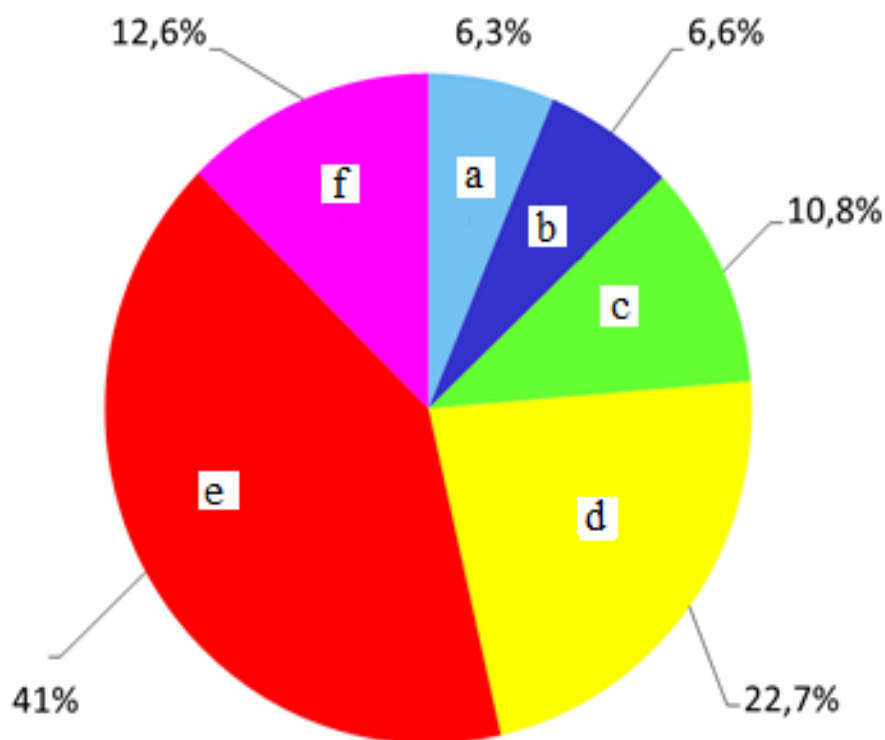
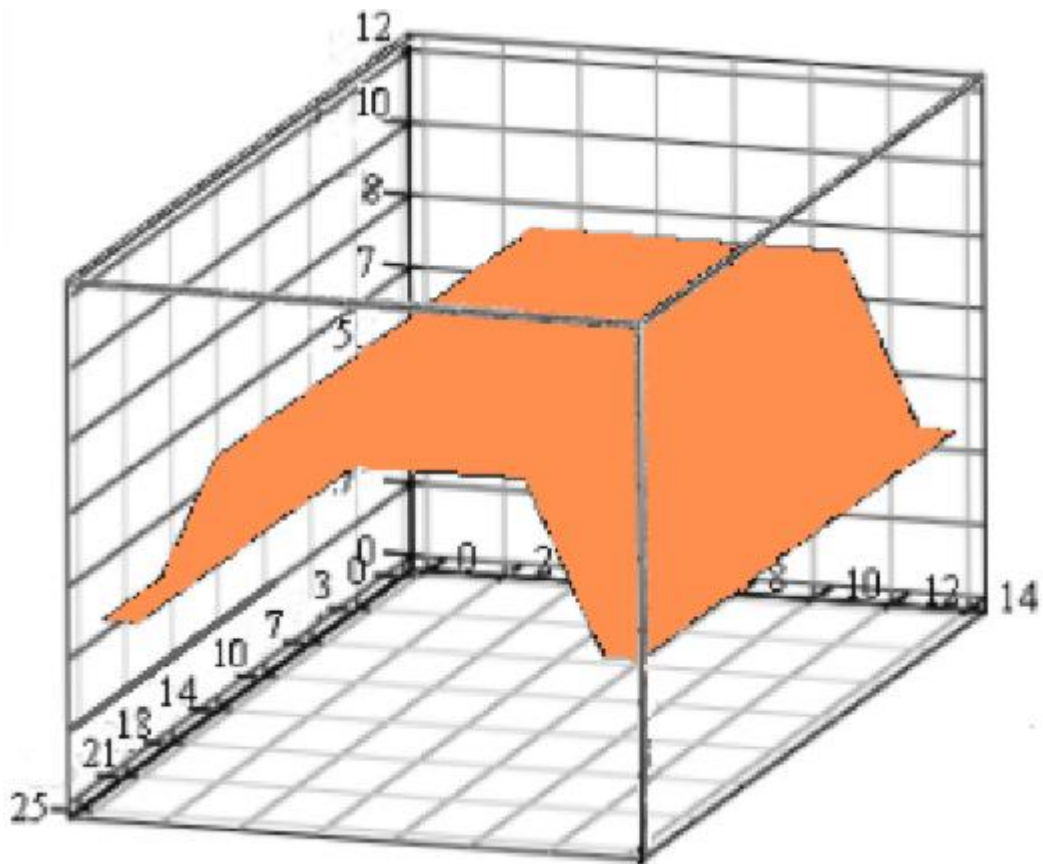


Рисунок 2.13 Діаграма розподілу теплоти за умовними зонами у камерні печі

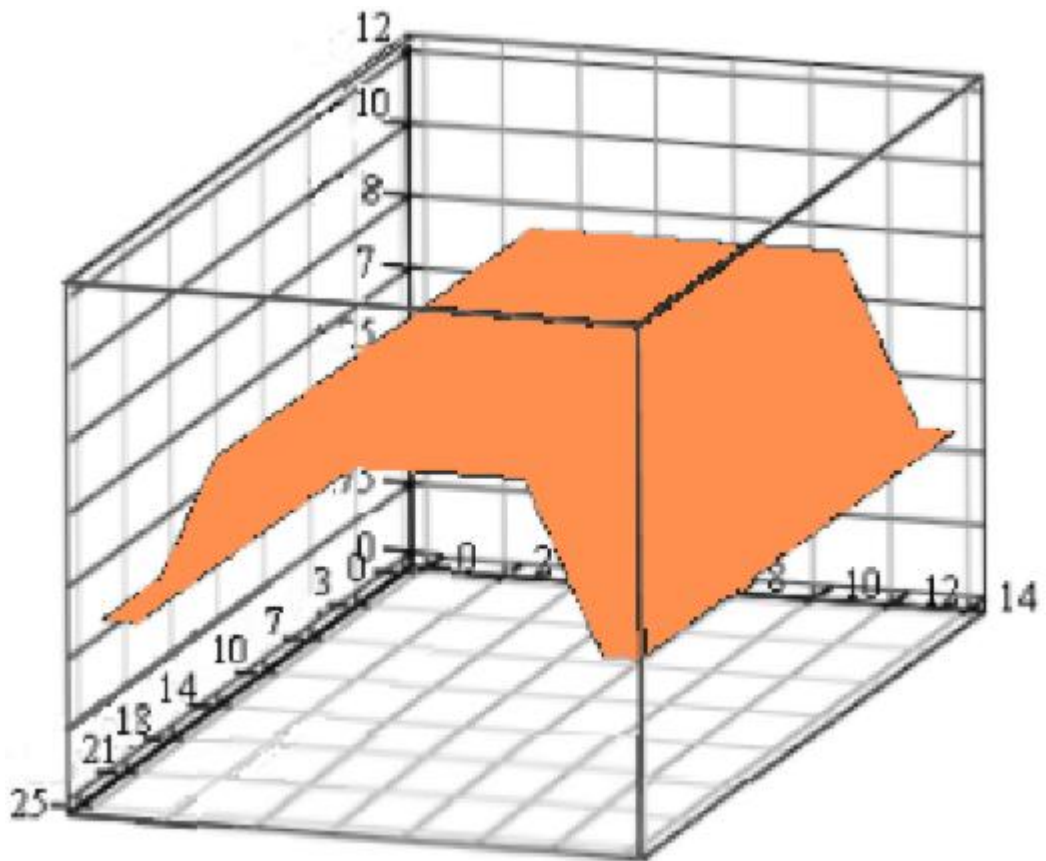
На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що найбільша концентрація теплової енергії спостерігається у верхній частині

камери, яка і нагріває склепіння печі, у той час як заготовки знаходяться в зоні з дуже малим, як і передбачалося, вмістом теплоти в нижній частині камери. Останнє викликано неефективним рухом теплових потоків, що говорить про нераціональність технології нагрівання металу.

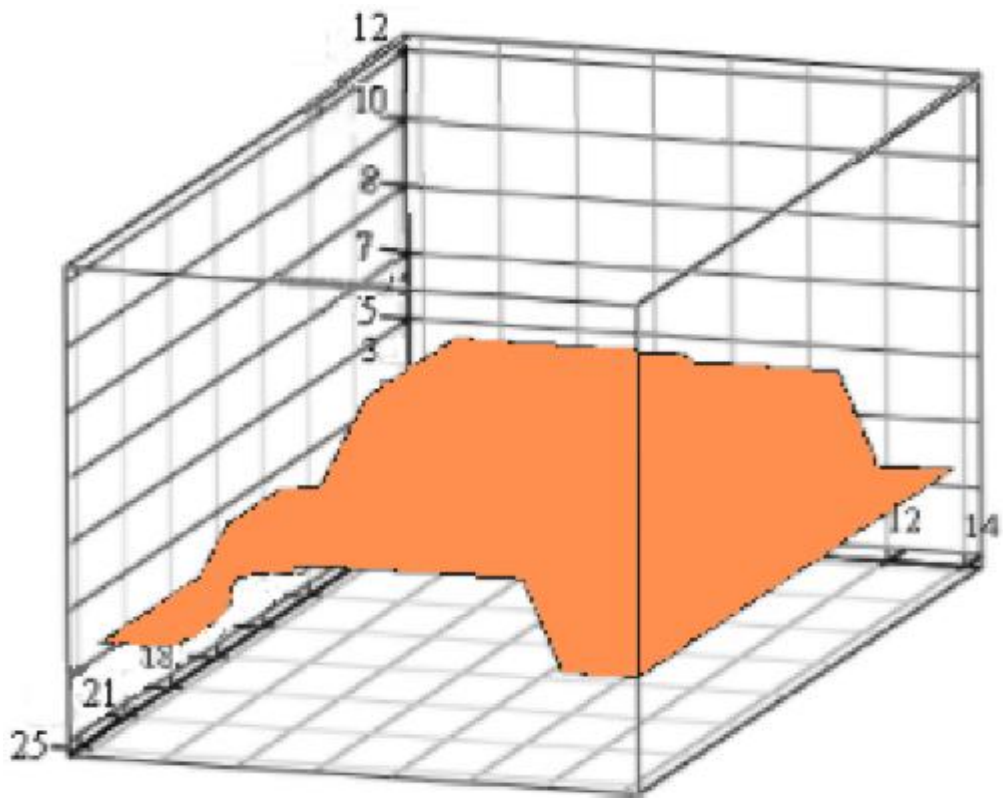
Поверхні розподілу температур у камері нагрівальної печі у процесі термообробки «відпал» представлені на рисунку 2.14 (а,б,в,г). Аналіз показав, що в період нагріву в основному розігрівається звід печі, а не під, на якому безпосередньо розташовані металеві заготовки, що значно знижує енергоефективність камерної печі.



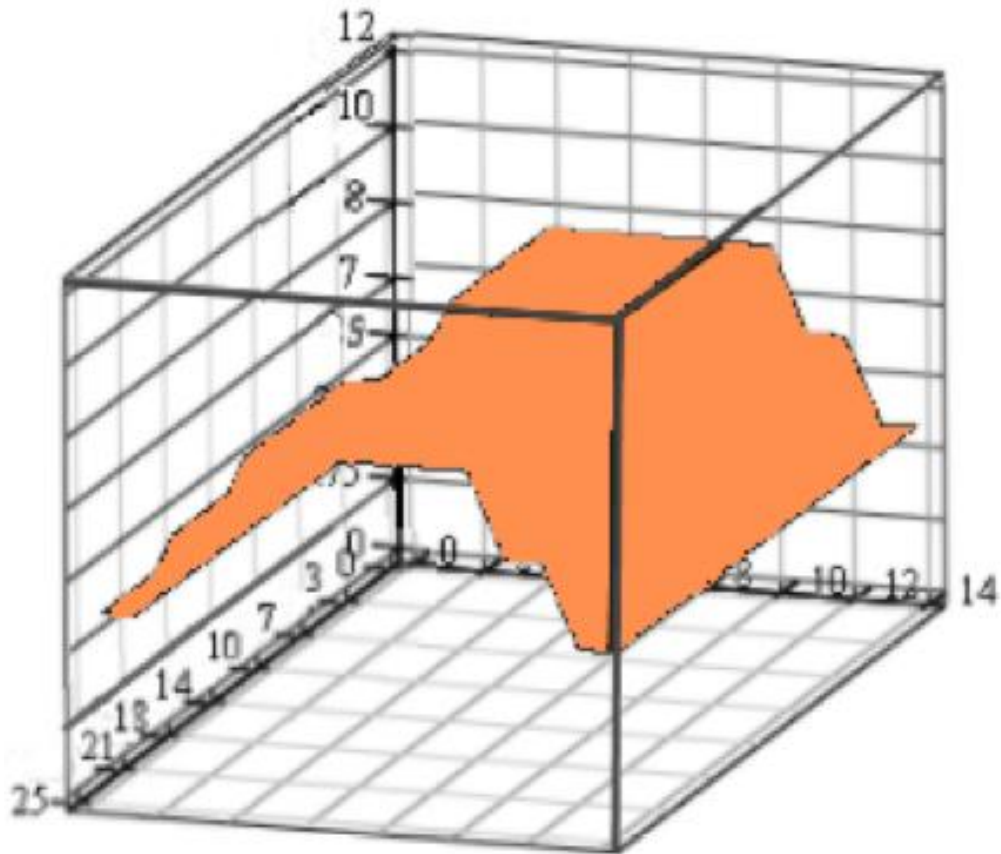
а) 800°C, (30 хв.), режим «витримка»



б) 800°C, (450 хв), режим «охлаждения»



в) 800°C, (670 хв), режим «витримка»



г) 800°C, режим «нагрівання» (1200 хв)

Рисунок. 2.14 □ Поверхні розподілу температур у камері нагрівальної печі у процесі термообробки “відпал”

Для дослідження циркуляційного руху пічних газів у промисловому агрегаті за допомогою безкоштовної ліцензії програмного продукту ANSYS для студентів моделюємо процес нагрівання у печі, визначаємо константи та турбулентні числа, які використовувались для створення комп’ютерної моделі. Було обрано саме цей програмний комплекс, оскільки на сьогоднішній день це передове програмне забезпечення для інженерного аналізу та чисельного моделювання.

На рисунку 2.15 представлена модель робочого простору промислової заводської камерної печі з розрахунковою сіткою. Остання має тип гексаедричний та є частково структурованою, при цьому містить 160010

елементів розрахунку. З метою зменшення похибки моделювання ліній току пічних газів потрібно включити автоматичне зменшення сітки біля димоходу.

На рисунку 2.16 представлена CAD (Computer-aided design) модель внутрішнього простору розглядуваного пічного агрегату.

Задані умови побудови комп'ютерної моделі у програмний продукт ANSYS:

- початкові;
- граничні;
- закінчення розрахунку.

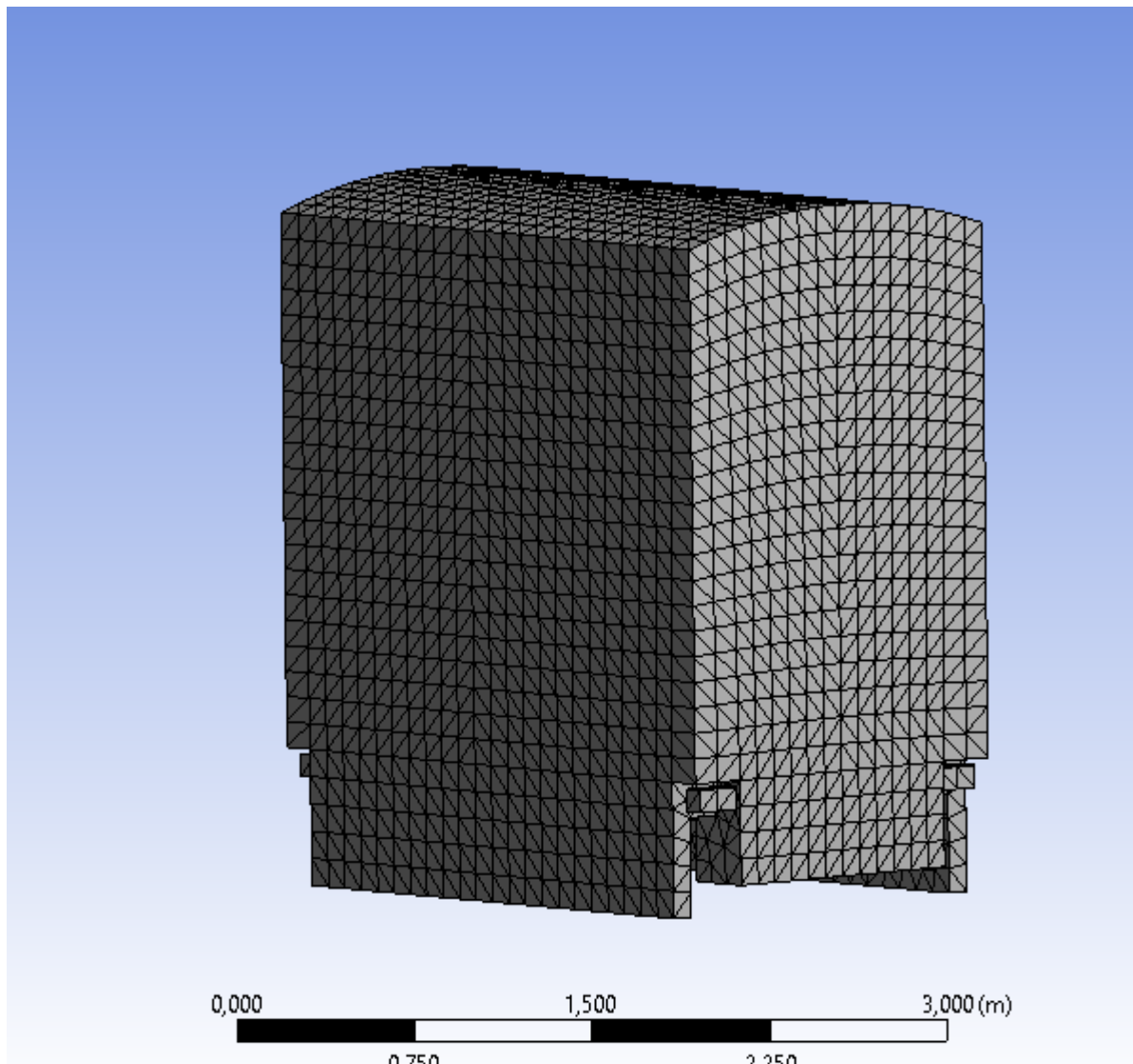


Рисунок 2.15 – Комп'ютерна модель робочого простору заводської печі з розрахунковою сіткою

Також були задані додаткові умови для всієї моделі:

- гравітаційні сили;
- склад димових газів;
- масова витрата для входу газів, що відходять;
- відносний тиск для виходу відхідних газів (згідно з даними таблиці 2.2).

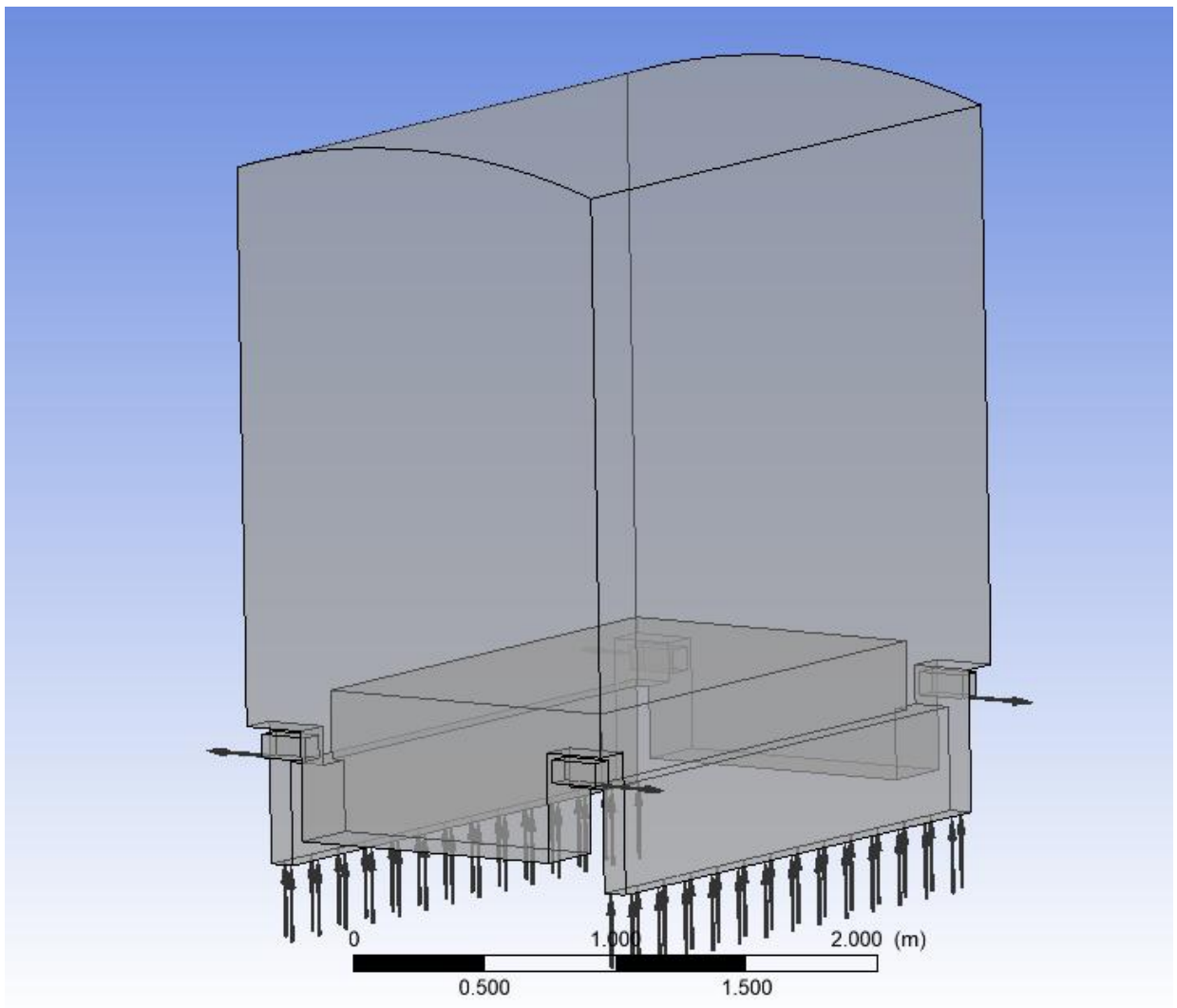


Рисунок 2.16 – CAD модель внутрішнього простору пічного агрегату з площинами входу та виходу пічних газів

На рисунку 2.17 зображено лінії току пічних газів по робочому простору розглядуваної теплотехнічної установки комбінату. Опрацювавши результати досліджень, було виявлено що у робочому просторі пічні газу рухаються нерівномірно. Великі флуктуації та висока турбулентність потоку може пояснити цю несиметричність руху складових пічних газів. Останнє призводить до нерівномірного нагрівання металу, та збільшує витрати через димохідний канал пічного газу.

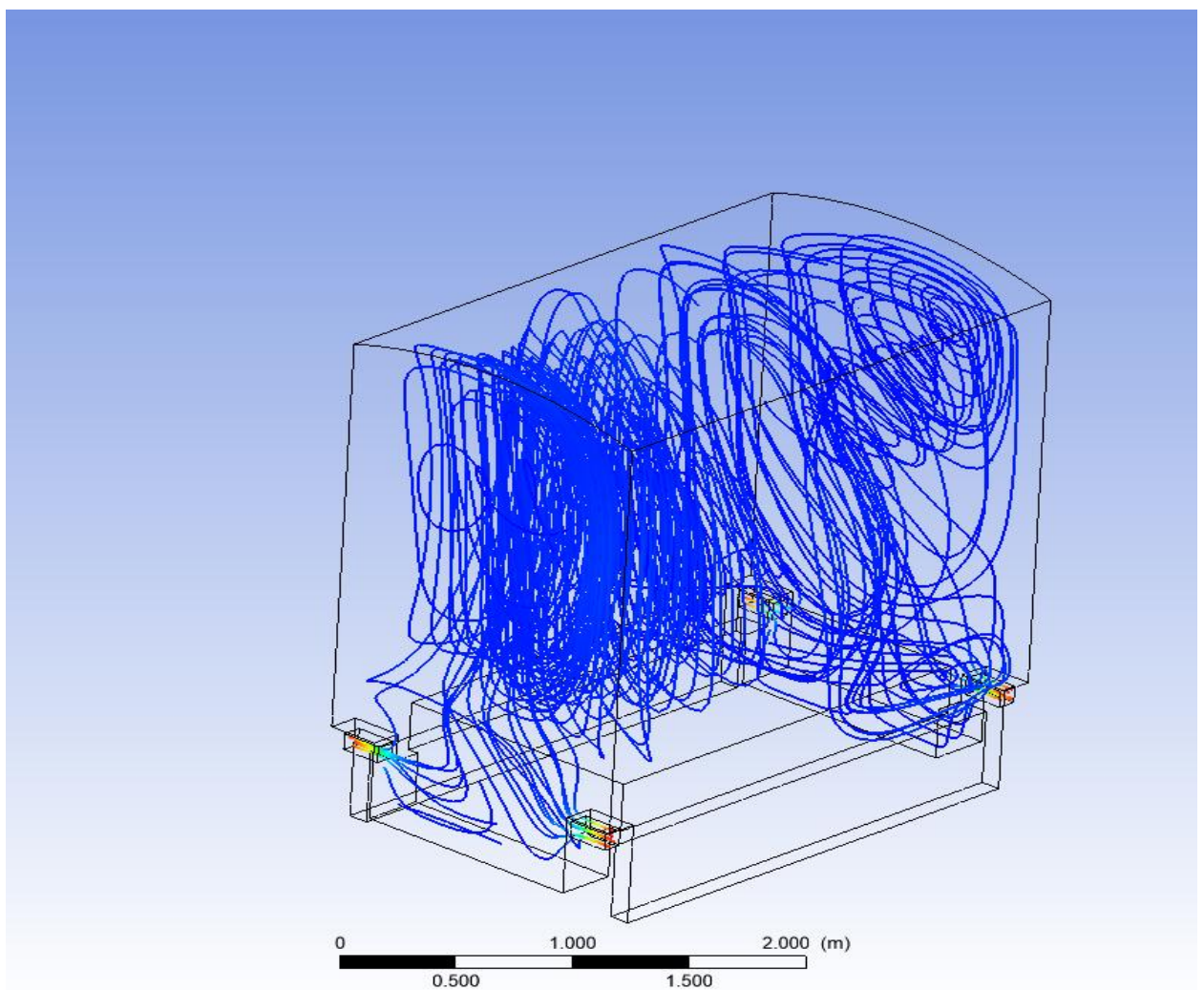


Рисунок 2.17 – Лінії току пічних газів по робочому простору теплотехнічної установки комбінату

2.4 Промислові випробування на камерній печі в умовах ливарного виробництва ТОВ «ЗТМК»

На рисунку 2.18 наведено графік температурно-часового режиму відпалу металу, який надано технологами ливарного цеху промислового підприємства.

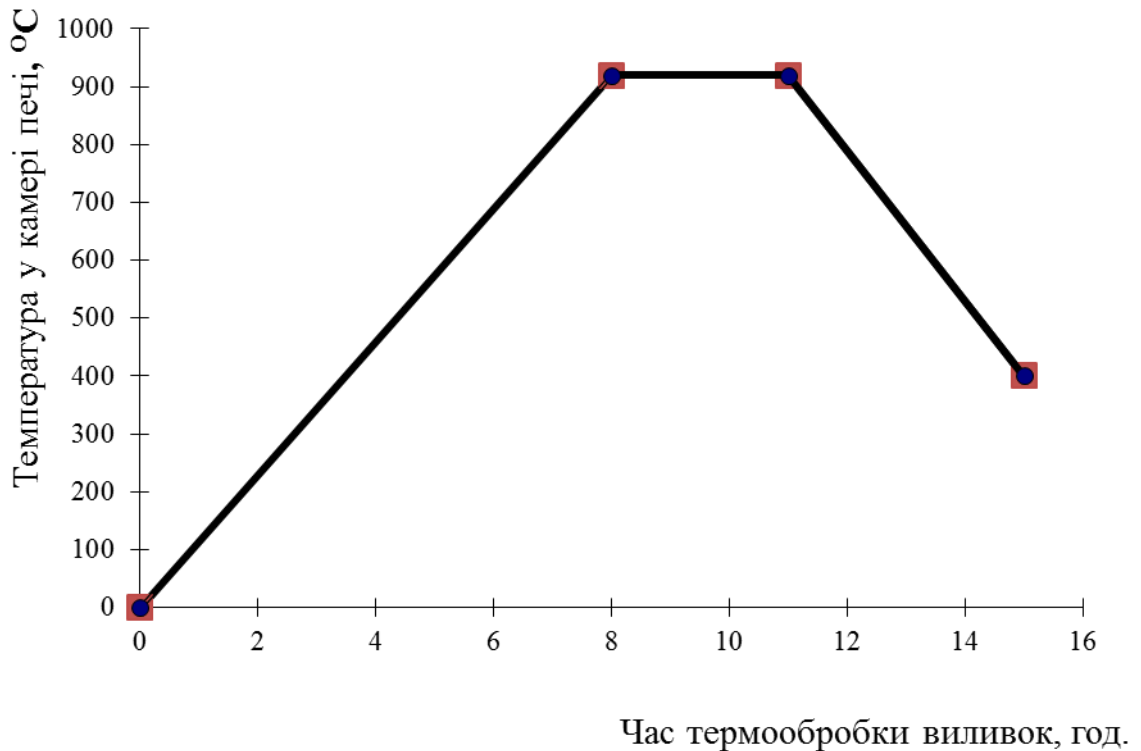


Рисунок 2.18 – графік температурно-часового режиму відпалу металу у печі

Було проведено натурний експеримент на розглядуваній печі. Значення температур металу вимірювались безконтактними лазерними пірометрами Optris LaserSight. На рисунку 2.18 наведено отриманий графік температури відпалу металу. Лінія тренду побудована для режиму нагріву садки металу.

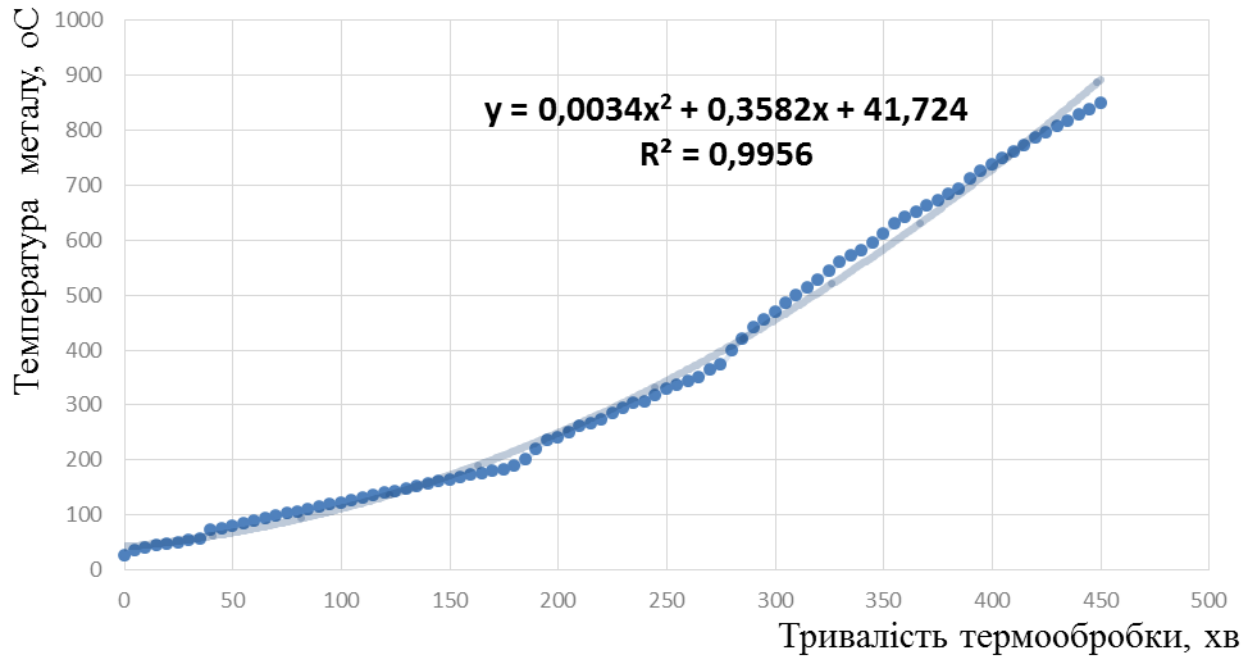


Рисунок 2.19 – Результати замірювання лазерними пірометрами температури металу у печі у процесі його відпалу

Погодинна витрата природного газу, яка вимірювалась газовим лічильником типу РГ 40 представлена на рисунку 2.20.

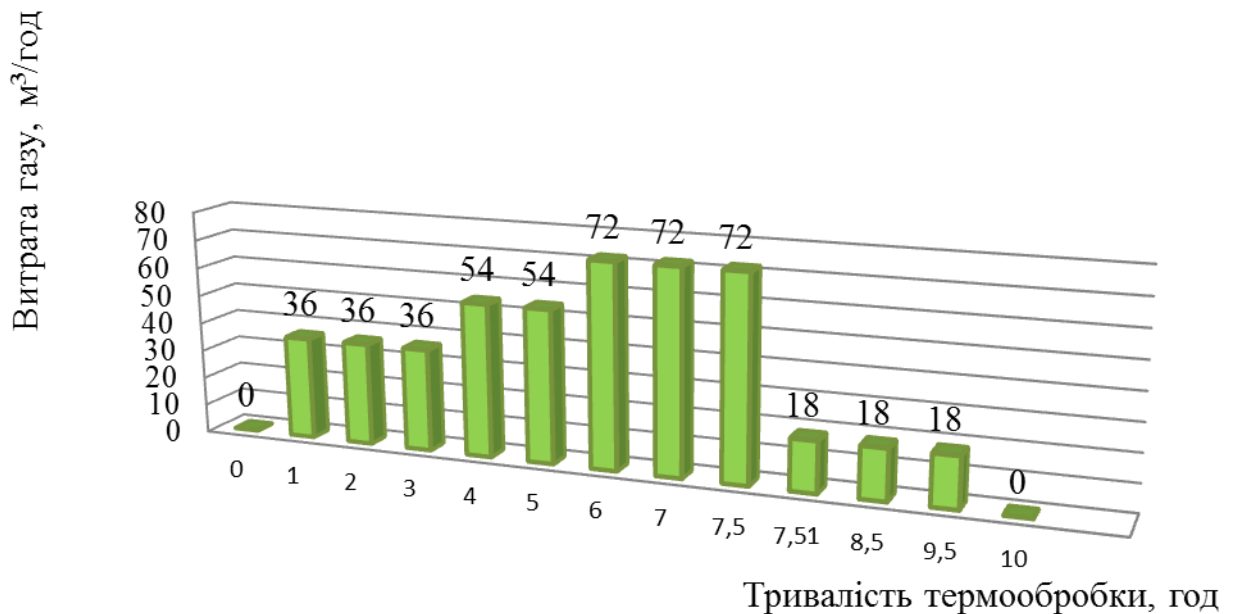


Рисунок 2.20 – Погодинна витрата природного газу камерною піччю у процесі відпалу металу

Загальне споживання природного газу за період відпалу металевих заготовок представлено на рисунку 2.21.

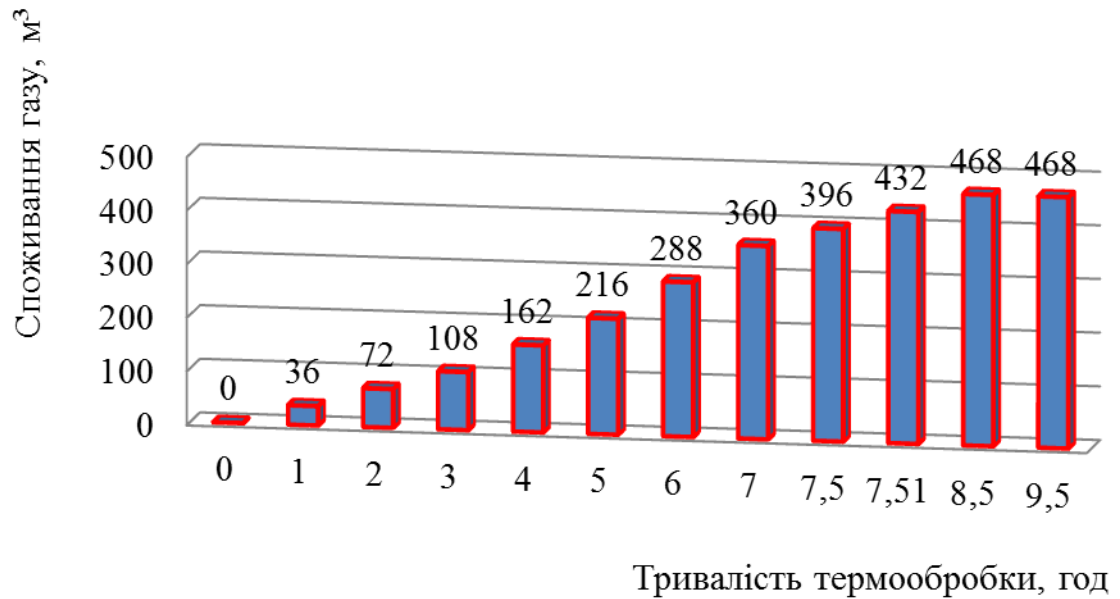


Рисунок 2.21 – Загальне споживання природного газу за період відпалу металевих заготовок

2.5 Висновки до розділу

1. Для виявлення причин низької енергоефективності камерної печі ливарного виробництва ТОВ «ЗТМК» були проведені теплотехнічні випробування та розраховано її тепловий баланс. Виявлено, що найбільша кількість теплоти втрачається з відхідними газами (більше 37 %).

2. Проведено моделювання температурних зон та циркуляційного руху пічних газів у промисловій камерній печі комбінату. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що найбільша концентрація теплової енергії спостерігається у верхній частині камери, яка і нагріває склепіння

печі, у той час як заготовки знаходяться в зоні з дуже малим вмістом теплоти в нижній частині камери. Останнє викликано неефективним рухом теплових потоків, що говорить про нераціональність технології відпалу металу.

3. Проведено натурний експеримент на розглядуваній печі відпалу. Побудовані графіки споживання природного газу за період відпалу металевих заготовок, які підтвердили що теплотехнологічні процеси не енергоресурсоефективні та гостро стоїть проблема заощадження природного газу.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз конструктивних особливостей та наявних проблем камерних печей, оскільки гостро стоять проблеми енергоресурсозбереження при здійсненні технологій термічної обробки у розглядуваних енергетичних установках.

2. Проведено аналіз заходів щодо покращення теплової роботи камерних печей, який показав, що існує велика кількість можливих технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності розглядуваних теплотехнічних агрегатів, але більшість з них потребує значних капіталовкладень, що не завжди доцільно з точки зору строку окупності вкладених інвестицій.

3. Розраховано тепловий баланс камерної печі ливарного виробництва ТОВ «ЗТМК» для виявлення причин її низької енергоефективності. Виявлено, що найбільша кількість теплоти втрачається з відхідними газами (більше 37 %).

4. Проведено моделювання температурних зон та циркуляційного руху пічних газів у промисловій камерній печі комбінату. На підставі отриманих результатів зроблено висновок, що найбільша концентрація теплової енергії спостерігається у верхній частині камери, яка і нагріває склепіння печі, у той час як заготовки знаходяться в зоні з дуже малим вмістом теплоти в нижній частині камери. Останнє викликано неефективним рухом теплових потоків, що говорить про нераціональність технології відпалу металу.

5. Проведено натурний експеримент на розглядуваній печі відпалу. Побудовані графіки споживання природного газу за період відпалу металевих заготовок, які підтвердили що теплотехнологічні процеси не енергоресурсоефективні та гостро стоїть проблема заощадження природного газу. Наукову цікавість викликає застосування електричного поля з метою перерозподілу теплових потоків у камері печі і зниження споживання

природного газу камерними печами. Тому подальші дослідження у цьому напрямку є актуальними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міністерство енергетики України : веб сайт. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358> (дата звернення 10.09.2020).
2. Державна служба статистики України : веб сайт. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 04.11.2020).
3. Державна служба статистики України : веб сайт. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2018/dop/06/dop_vp2017.pdf (дата звернення 21.09.2020).
4. Нафтогаз група. Обсяги використання газу : веб сайт. URL: [https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/8B3289E9F4B2CF50C2257F7F0054EA23?OpenDocument&Expand=7&\]](https://www.naftogaz.com/www/3/nakweb.nsf/0/8B3289E9F4B2CF50C2257F7F0054EA23?OpenDocument&Expand=7&) (дата звернення 15.10.2020).
5. V. O. Gabrinets, I. V. Tytarenko, G. L. Gnatiuk. Substantiation of the further implementation of heat pump and heat storage technology into the energy of industry and utilities. *Providing energy-saving technologies: technical, ecological and economic aspects* : collective monograph. New York : USA : Yunona Publishing , 2019. P. 53-60.
6. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах : монография. Донецк : Ноулидж, 2012. 247 с.
7. Баріщенко О. М., Ревун М. П. Актуальні енергозберігаючі методи роботи нагрівальних печей : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 138 с.
8. Ерёмин А. О. Современные способы отопления нагревательных печей. *Металлургическая теплотехника* (Сб.научн. трудов НМетАУ). Днепропетровск : Новая идеология, 2008. С. 139 – 151.
9. Пилипенко Р. А. Интенсификация тепловой работы камерных печей, отапливаемых природным газом. *Металлургическая теплотехника* (Сб. науч. трудов НМетАУ). Днепропетровск: НМетАУ, 2002. Т.8. С.99-105.

10. Єршомін 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.
11. Візер А. А. Щодо недоліків теплової роботи камерних печей. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2015. № 34. С. 89 - 92.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Сазонов Э. В., Семенов В. Н. Утилизация теплоты и очистка газовых выбросов: монография. Воронеж : ВГАСУ, 2010. – 142 с.
16. 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.
17. 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.

18. Парсункин Б. Н., Андреев С. М., Комаров А. В. Оптимальный режим использования топлива при энергосберегающем нагреве. *Изв. ВУЗ. ЧМ.* 2004. №12. С. 48-53.
19. Ганжа А. М., Заєць О. М. Оцінка ефективності системи утилізації теплоти димових газів доменних повітрянагрівачів. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : матеріали XXV міжнародної наук.-практ. конф., 17-19 травня 2017 : тези доп. Ч. I. Харків : НТУ «ХП». 249 с.
20. 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.
21. Губинский В. И., Еремин А. О., Сибирь А. В. Работа нагревательного колодца с шариковыми регенераторами. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2005. №1 С. 103- 105.
22. 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.
23. 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.
24. Й. С. Мисак, Я. Ф. Івасик, Т. Ю. Кравець. Вплив якості палива на техніко-економічні показники котельних установок теплових електростанцій. *Вісник НУ "Львівська політехніка". Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація.* 2000. №404. С. 89 – 96.
25. Кошельник А. В., Пугачева Т.Н., Круглякова О.В., Павлова В.Г.,

Долобовская О.В. Повышение эффективности работы регенеративных теплообменников стекловаренных печей. *Стекло и керамика*. 2019. №2. С.29-32.

26. 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.

27. Оснос С. П., Гололобов О. И. Применение современных волокнистых теплоизоляционных и огнеупорных материалов в тепловых агрегатах и сооружениях. *Строительные материалы и изделия*. 2000. №11. С. 120-125.

28. 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).

29. 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>.

30. 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.

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

32. 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.

33. 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.

34. 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>

35. Лиуш Ю. Б. Организация промышленного эксперимента по изучению влияния конструктивных особенностей нагревательной печи на распределение тепловой энергии в камере. Вісник Хмельницького національного університету. 2015. №2. С.80-84.

36. Лиуш Ю. Б. О влиянии конструктивных особенностей нагревательной печи на распределение температуры внутри камеры. Энергетика : економіка, технології, екологія. 2015. №2. С. 22-26.

37. Ягодников Д.А. Исследование влияния электрического поля на характеристики теплообмена в камере сгорания с пористым трактом охлаждения. *Теплофизика высоких температур*. 2001. Том 39. № 5. С. 788-793.

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. 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.

40. 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.

41. 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.

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

43. 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.

44. Сорока Б. С. Интенсификация тепломассообменных процессов при сжигании топлива в печах. Развитие теории топливных печей и топочных процессов. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2006. №5. С. 3-1.

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

46. 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.

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

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

49. 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.

50. 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.

51. 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.

52. 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.

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

54. 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.

55. 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.

56. Арутюнов В. И., Бухмиров В. В., Крупенников С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей : учебник для вузов. Москва : Металлургия, 1990. 239 с.

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

58. Кузнецов Г. В., Шеремет М. А. Моделирование нестационарного теплопереноса в замкнутой области с локальным источником тепловыделения. *Теплофизика и аэромеханика*. 2005. № 2. С. 305-314.

59. Качан Ю. Г., Николенко А. В., Степкин В. В. Моделирование

процесса нагрева металла в методической печи. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. 2007. №2. С. 74-77.

60. 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.

61. 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.

62. 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.

63. Фиалков Б. С., Щербаков Н. Д., Плицин В. Т. Распределение электрического потенциала в углеводородных пламенах. *ФГВ*. 1978. Т. 14. Вып.2. С. 104 – 108.

64. Лавров Ф. А., Малиновский А. Э. Влияние продольного электрического поля на процесс горения газовых смесей. *ЖФХ*. 1933. Т. 4. Вып.1. С. 104 – 108.

65. Фиалков Б. С., Щербаков Н. Д. Распределение положительных ионов в племенах смесей пропан-бутана с воздухом. *ФГВ*. 1980. Т. 54. Вып. 10. С. 2655 – 2659.

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

67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. Кавера А. Л. Исследование состояния вопроса о процессах горения в электрическом поле. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2005. № 1. С. 182 – 187.
71. Афанасьев В. В., Кидин Н. И. Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок. Москва : Физматлит. 2008. 176 с.
72. 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).
73. Талантов А. В. Основы теории горения. Часть 1 : учеб. пособие. Казань: Казанский авиационный институт им. А.Н. Туполева, 1975. 253 с.
74. Степанов Е. М., Дьячков Б. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. Москва : Металлургия. 1968. 310 с.
75. 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.
76. 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.
77. 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.

78. 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.

79. 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.

80. 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.

81. 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.

82. 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.

83. 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.

84. 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.

85. Мастрюков Б. С. Тепло-технические расчеты промышленных печей. М.: Metallurgiya, 1972. – 368 с.

86. Тымчак В. М., Гусовский В. Л. Расчет нагревательных и термических печей. М. : Metallurgiya, 1983. – 480 с.

87. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е. Методики расчета нагревательных и термических печей : учеб. пособ. Москва : Теплотехник, 2004. 400 с.

88. 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.

89. 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.

90. 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.

91. 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.

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

93. Качан Ю. Г., Степкин В. В., Лиуш Ю. Б. Оптимальное управление камерной нагревательной печью с использованием энергосберегающего критерия. *Гірнична електромеханіка та автоматика*. 2013. Вип. 91. С. 143-147.

94. Качан Ю. Г., Степкин В. В., Лиуш Ю. Б. Оптимизация нагревательных газовых печей с выкатным подом по критерию энергоэффективности. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2013. №3. С.123-125.

95. Yerofieieva A.A, Artemchuk V.V. Improving the Efficiency of Chamber Furnaces Through the Use of Controlled Electric Fields *«Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»*: тези доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції, 25 – 26 листопада 2020 р. Харків: НТУ «ХП»: Видавництво «Лідер», 2020. С. 85 - 87.