

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

ЄРОФЄЄВА АЛІНА АНАТОЛІЇВНА

УДК 621.783.2

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КАМЕРНИХ
НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧЕЙ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ
КЕРОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

Спеціальність 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова
теплоенергетика

Дисертація на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

_____ Єрофєєва Аліна Анатоліївна

Науковий керівник – Качан Юрій Григорович,
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2021

АНОТАЦІЯ

Єрофєєва А.А. «Підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей шляхом використання керованих електричних полів». – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика – Запорізький національний університет, спеціалізована вчена рада Д 08.084.05 при Національній металургійній академії України, Дніпро, 2021.

Дисертацію присвячено розробці заходів з підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей шляхом створення у їх об'ємах електричного поля, яке призводить до перерозподілу температурних полів газів у робочому просторі енергетичної установки.

Виконано кількісну оцінку енергетичної ефективності камерної печі з викатним подом. Розроблено математичну модель розподілу температури у її робочому просторі за умови створення в останньому електричного поля. Виконано чисельне моделювання масових витрат пічних газів у камері реальної промислової печі та запропоновано заходи для їх збільшення у зоні розташування садки металу шляхом створення теплового бар'єру за рахунок заряджених часток продуктів згоряння, що рухаються в електричному полі.

Розроблено ефективний алгоритм управління процесом нагрівання металу, який може застосовуватись у камерних печах. Перевагою даного алгоритму є те, що у якості додаткового впливу використовується кероване електричне поле, створення якого не потребує значних капіталовкладень. При цьому значна частина теплоти, що раніше втрачалась з відхідними газами залишається у робочому просторі й використовується безпосередньо для нагріву металу, що і сприяє підвищенню енергетичної ефективності установки.

Ключові слова: камерна піч, енергетичний об'єкт, тепломасообмін, математична модель, енергоефективність, електричне поле, енергозберігаючі режими, термічна обробка металу.

ABSTRACT

Yerofieieva A.A. "Improving the Energy Efficiency of Chamber Heating Furnaces through the Use of Controlled Electric Fields." - Qualifying scientific work as a manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences in the specialty 05.14.06 - Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering - Zaporizhia National University, Specialized Academic Council D 08.084.05 at National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2021.

The thesis is devoted to the development of measures to increase the energy efficiency of chamber heating furnaces by creating an electric field in their volumes, which leads to the redistribution of gas temperature fields in the working space of the power plant.

The research presents the performed quantitative assessment of the energy efficiency of a chamber furnace with a bogie hearth. A mathematical model was developed for temperature distribution in its working space under the condition of creating an electric field in the latter. Numerical modeling of mass consumption of furnace gases in the chamber of a real industrial furnace was performed and measures were proposed to increase them in the area of the metal charge by creating a thermal barrier due to charged particles of combustion products moving in the electric field.

An effective algorithm was developed for controlling the metal heating process, which can be used in chamber furnaces. The advantage of this algorithm is that the additional effect is created by a controlled electric field, the creation of which does not require significant investment. Herewith, a significant part of the heat previously lost with the exhaust gases remains in the working space and is

used directly to heat the metal, which helps to increase the energy efficiency of the plant.

Keywords: chamber furnace, power facility, heat-mass exchange, mathematical model, energy efficiency, electric field, energy saving modes, heat treatment of metal.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У вітчизняних фахових виданнях:

1. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер¹А. 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. Здобувач проаналізував існуючі способи та розробив нові підходи до вирішення задачі підвищення ефективності теплообміну в промислових печах.

2. 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. Вип. 13. С. 80 - 84. Здобувач розробив принципову схему дослідної установки та приймав безпосередню участь у проведенні експериментальних досліджень щодо підтвердження можливості керування тепловими потоками електричним полем.

3. 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. Здобувач приймав безпосередню участь у проведенні експериментальних досліджень та розробив математичну модель розподілу температури в печі за наявності електричного поля.

¹ Візер – дівоче прізвище Єрофєєвої А.А.

4. 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. *Здобувачем проведено розрахунки технічно обґрунтованої напруги в камері пічної установки та виконано оцінку економічної доцільності використання електричного поля в камері газової нагрівальної установки.*

5. **Візер А. А.** Щодо недоліків теплової роботи камерних печей. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2015. № 34. С. 89 - 92. *Здобувачем розраховано тепловий баланс промислової камерної печі та зроблено аналіз її енергоефективності.*

6. 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. *Здобувач розробив план експерименту для визначення раціональних енергетичних параметрів пічної установки, що працює на біогазовій суміші, за наявності електричного поля в її камері.*

7. 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. *Здобувачем в умовах промислового підприємства проведено експериментальні дослідження щодо впливу електричного поля на розподіл теплоти у камерах печей та отримано реальні дані щодо економії споживання природного газу.*

8. 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. *Здобувачем*

проведено моделювання полів швидкостей пічних газів у камері печі та обґрунтовано можливості створення теплових бар'єрів за рахунок керованих електричних полів у робочих просторах камерних печей з метою підвищення їх енергоефективності.

У фахових виданнях, які входять до бази Web of Science:

9. Качан Ю. Г., Єрофєєва А. А. Інноваційне управління процесом нагрівання металу у печі з використанням просторового електричного поля. *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*. 2017. 4 (43). С. 193 - 199. *Здобувачем розроблено алгоритм управління процесом нагрівання металу у печі з додатковим використанням у якості керуючого впливу електричних полів.*

Відкриття та патенти України й інших країн:

10. 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. *Здобувач здійснив патентний пошук та запропонував спосіб термічної обробки металу у камерних печах періодичної дії з використанням електричного поля.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. 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. *Здобувачем представлено математичну модель розподілу температури в печі за наявності електричного поля.*

12. 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. *Здобувачем показано виконані дослідження, розрахунки та узагальнено отримані результати.*

13. 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. *Здобувачем виконано аналіз доцільності використання електричного поля в камері газової нагрівальної установки.*

14. 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. *Здобувачем представлено аналіз можливості зменшення споживання природного газу за рахунок утилізації теплоти відхідних газів.*

15. **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. *Здобувачем зроблено аналіз енергоефективності камерних промислових печей.*

16. Чейлитко А.О., **Єрофєєва А.А.** Якісне нагрівання металу у камерній печі. *Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Scientific Research in XXI Century»* Ottawa: Methuen Publishing House, 16 - 18 December 2019. С. 64 - 69. *Здобувач виконав аналіз досліджень, розрахунків та узагальнив отримані результати.*

17. 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. *Здобувач підготував доповідь та провів апробацію роботи.*

18. 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. *Здобувач зробив аналіз способів підвищення ефективності споживання природного газу камерними печами.*

19. 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. С. 97 - 94. *Здобувачем обґрунтовано можливості створення теплових бар'єрів за рахунок електричних полів у робочих просторах камерних печей.*

20. **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 «ХПІ»: Видавництво «Лідер», 2020. С. 85 - 87. *Здобувачем показано можливість і ефективність використання у якості керуючого впливу нестационарного електричного поля в камері печі.*

ЗМІСТ

ВСТУП.....	11
1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КАМЕРНИХ ПЕЧЕЙ.....	18
1.1 Аналіз існуючих камерних печей та їх конструктивних особливостей.....	18
1.2 Існуючі проблеми енергоефективності камерних печей.....	20
1.3 Аналіз можливих шляхів підвищення енергоефективності камерних печей.....	27
1.4 Висновки до розділу і постановка завдань досліджень.....	36
2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО УПРАВЛІННЯ НАПРЯМКОМ І ШВИДКІСТЮ ПІЧНИХ ГАЗІВ У КАМЕРІ ПЕЧІ.....	38
2.1 Аналіз методів математичного моделювання процесів тепломасообміну у промислових печах.....	38
2.2 Аналіз існуючих математичних моделей камерних нагрівальних печей.....	41
2.3 Моделювання циркуляційного руху пічних газів у зоні розташування заготівок.....	48
2.4 Висновки до розділу.....	56
3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ.....	57
3.1 Обґрунтування можливості корегування напрямку теплового потоку електричним полем.....	57
3.2 Математичне планування експериментів.....	63
3.3 Постановка задачі і послідовність експериментальних досліджень щодо можливості керування тепловими потоками електричним полем.....	80
3.4 Експериментальна установка для проведення досліджень впливу електричного поля на теплові потоки.....	83

3.5	Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень.....	86
3.6	Синтез математичної моделі пічної установки з електричним полем.....	89
3.7	Висновки до розділу.....	92
4	ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ГАЗІВ У КАМЕРНІЙ ПЕЧІ.....	94
4.1	Загальна характеристика підприємства і об'єкта досліджень.....	94
4.2	Аналіз енергоефективності камерної печі, що працює в умовах ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат»... ..	106
4.3	Налаштування нагрівальної печі перед проведенням експерименту.....	111
4.4	Аналіз отриманих результатів проведених випробувань.....	112
4.5	Висновки до розділу.....	115
5	ПЕРСПЕКТИВИ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	116
5.1	Алгоритм управління тепловими потоками в камерній нагрівальній печі.....	116
5.2	Оптимізація параметрів нестаціонарного електричного поля з метою підвищення ефективності роботи камерних печей	120
5.3	Висновки до розділу.....	128
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	129
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	132
	ДОДАТКИ.....	148

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. 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. Єрьоміну, М.П. Свинолобову, впровадженні енергозберігаючих технологій використання енергії альтернативних джерел на промислових підприємствах Б.І. Баску, В.О. Габрінцю.

Оскільки у перспективі є маловірогідним зменшення кількості промислових об'єктів, що розглядаються, для вітчизняної промисловості інноваційні напрацювання щодо підвищення енергоефективності зазначених теплових агрегатів набувають першочергового значення. Незважаючи на те, що питання можливості вдосконалення нагрівальних печей вивчаються вітчизняними і зарубіжними вченими протягом багатьох десятиліть, існує значний розрив між обсягами проведених наукових досліджень і практичними показниками щодо їх роботи. Навіть за можливості швидкої окупності заходів, спрямованих на підвищення енергоефективності таких печей, їх впровадження відбувається лише в поодиноких випадках.

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

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до пріоритетного напрямку наукових досліджень «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» та пріоритетного тематичного напрямку наукових досліджень «Технології електроенергетики та теплоенергетики», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р. Матеріали дисертації є складовою частиною науково-дослідних робіт: «Розроблення технології та організація промислового виробництва композиційних матеріалів, стійких в умовах дії високих температур та агресивних середовищ, для авіаційної та космічної техніки» (№ ДР 011U004839), наукового проекту молодих вчених «Розробка інтерметалідних каталізаторів для знешкодження вуглецевмісних компонентів газових викидів в атмосферу» (№9-1Д/2019), що фінансується за рахунок державного бюджету (№ ДР 0119U100588), а також госпдоговірної роботи «Дослідження енергозберігаючих технологій, раціональних режимів енергоспоживання та розробка методичних засад енергетичного менеджменту» (12-1 ДВ/11).

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей за рахунок використання електричних полів задля управління тепловими потоками в них. Для досягнення зазначеної мети дослідження в дисертаційній роботі обґрунтовані та поставлені такі задачі:

- провести аналіз і виконати кількісну оцінку енергоефективності камерних печей з викатним подом;
- розробити та створити експериментальну нагрівальну установку для дослідження обсягу іонізації продуктів згоряння на відстані від пальника;
- розробити математичну модель щодо розподілу температури в камері нагрівальної установки з урахуванням впливу створеного в ній електричного поля;
- виконати чисельне моделювання масових витрат пічних газів у камері печі;
- розробити алгоритм управління процесом нагріву металу у камерній печі на основі використання керованих електричних полів;
- виконати розрахункову та промислову оцінки щодо доцільності подальшого використання результатів дослідження.

Об'єкт дослідження – камерна нагрівальна піч з викатним подом.

Предмет дослідження – закономірності розподілу температурних полів газів та процесів формування теплових потоків у камерній нагрівальній печі шляхом застосування електричних полів.

Методи дослідження. Розрахунково-теоретичний метод, що базується на використанні класичних законів тепломасообміну, основних законів електродинаміки; методи вирішення задачі моделювання турбулентного руху в'язкої рідини в обмеженому просторі; спільне застосування розрахункових і інженерних методик дослідження; експериментальні методи дослідження температурного поля; сучасні методи математичної обробки

результатів досліджень; статистичні методи аналізу з використанням програми STATISTICA 13, дослідно-промислові випробування.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у такому:

1. Запропоновано і обґрунтовано спосіб щодо підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей, який, на відміну від існуючих, базується на перерозподілі температурних полів у місцях розташування заготовок при їх нагріванні (до 1000 °C) та витримці (до 4 годин) за рахунок використання електричних полів, що дозволяє зменшити споживання природного газу на 5...10 %.
2. Отримали подальший розвиток дослідження щодо створення додаткового впливу на температурні поля газів у робочих просторах камерних печей за рахунок керованих електричних полів напруженістю до 1100 В/м, що дозволяє більш оперативно впливати на температуру нагріву та витримки садки (до 8 %) та підвищити енергетичну ефективність процесу термообробки металу.
3. Вперше розроблено та обґрунтовано раціональне управління нестационарним електричним полем у робочому просторі теплотехнічних установок, що дозволяє інтенсифікувати тепломасообмінні процеси й зменшити електроспоживання на 33 % у порівнянні зі стаціонарним електричним полем.

Практичне значення одержаних результатів. На підставі проведених теоретичних та експериментальних досліджень підтверджена можливість корегування теплових потоків у камерних печах електричними методами. Розроблено математичну модель щодо розподілу температури всередині нагрівальної установки з урахуванням впливу створеного в ній електричного поля.

За результатами виконаних чисельних розрахунків масової витрати пічних газів у камері печі запропоновано заходи щодо її збільшення у зоні розташування садки.

Розроблено ефективний алгоритм управління процесом нагрівання металу, який може застосовуватись у камерних печах на промислових підприємствах. Перевагою цього алгоритму є те, що у якості додаткового керуючого впливу використовується електричне поле, створення якого на реальному об'єкті не потребує значних капіталовкладень. Фактично теплота продуктів згоряння, що раніше втрачалась з відхідними газами використовується безпосередньо у процесі термічної обробки, що сприяє підвищенню енергетичної ефективності установок, що розглядаються.

Запропоновано механізм оперативного реагування та впливу на поточну температуру об'єкта (у межах до 8 %). Розроблено технологічні основи автоматизації керування електричним полем в енергетичних промислових об'єктах, а саме камерних печах. Запропоновано алгоритм управління нестационарним електричним полем в теплотехнічних установках.

Отримані при виконанні дисертаційної роботи результати схвалено та прийнято до використання на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат», ПрАТ «Дніпроспецсталь». Економія газу при встановлених параметрах склала близько 10 %, що підтверджується відповідними актами впровадження. Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри теплоенергетики та гідроенергетики Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету в лекційних курсах з таких дисциплін: «Теплотехнічні процеси та установки», «Математичне моделювання та оптимізація теплотехнічних процесів», «Основи наукових досліджень в теплоенергетиці та гідроенергетиці».

Особистий внесок здобувача. Всі результати дисертаційної роботи одержані автором особисто. У друкованих працях, опублікованих у співавторстві дисертанту належить: в [1] – аналіз існуючих способів та розробка нових підходів до вирішення задачі підвищення ефективності теплообміну в промислових печах. В [2, 3] – розробка принципової схеми

дослідної установки, прийняття безпосередньої участі у проведенні експериментальних досліджень щодо підтвердження можливості керування тепловими потоками електричним полем та розробка математичної моделі розподілу температури в печі за наявності електричного поля. В [4] – розрахунки технічно обґрунтованої напруги в камері пічної установки та оцінка економічної доцільності використання електричного поля в камері газової нагрівальної установки. В [6] – розробка плану експерименту для визначення раціональних енергетичних параметрів пічної установки за наявності електричного поля в її камері. В [7] – участь у проведенні в умовах промислового підприємства експериментальних досліджень щодо впливу електричного поля на розподіл температурних полів газів у камерах печей та отриманні реальних даних щодо економії споживання природного газу. В [8] – моделювання полів швидкостей пічних газів у камері печі та обґрунтування можливості створення теплових бар'єрів за рахунок керування електричними полями у робочих просторах камерних печей з метою підвищення їх енергоефективності. В [9] – розробка алгоритму управління процесом нагрівання металу у печі з додатковим використанням у якості керуючого впливу електричних полів.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційного дослідження доповідались і отримали позитивну оцінку на конференціях та форумах: XVII Міжнародна конференція «Теплотехніка та енергетика в металургії», НМетАУ, (м. Дніпропетровськ, 07-09 жовтня 2014 р.); I Міжнародна науково-практична та навчально-методична конференція «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку-2014», НТУУ «КПІ», (м. Київ, 27-29 травня 2014 р.); Міжнародна науково-практична конференція «Україна-Польща: діалог культур в контексті євроінтеграції» ЗДІА, (м. Запоріжжя, 25-27 вересня 2014 р.); XXI Науково-технічна конференція студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів «Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості», ЗДІА, (м. Запоріжжя, 25-29 квітня 2016 р.); Об'єднаний науковий семінар «Технічна теплофізика,

теплоенергетика і теплотехніка» Придніпровського наукового центру НАН і МОН України, (м. Дніпропетровськ, 19 травня 2016 р.); XXIV науково-практична конференція студентів, магістрантів, аспірантів, молодих вчених та викладачів Інженерного інституту, ЗНУ, (м. Запоріжжя, 26-29 листопада 2019 р.); 1st International Scientific and Practical Conference «Scientific Research in XXI Century» (Ottawa, Canada, 16-18 December 2019); IV спеціалізований міжнародний екологічний форум «ЕКО-ФОРУМ - 2020», (м. Запоріжжя, 28-30 травня 2020 р.); 6-й міжнародний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування», Національний університет «Львівська політехніка», (м. Львів, 23-25 вересня 2020 р.); II "Environmental Innovations: Advances in Engineering, Technology and Management", On-line Conference, 19-23 October 2020; Міжнародна науково-технічна конференція «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування» (м. Харків, 25–26 листопада 2020 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлюються у 20 наукових працях, з яких 8 статей у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України, 1 стаття, яка включена до міжнародної наукометричної бази Web of Science Core Collection, 10 тез доповідей до конференцій, 1 патент на корисну модель. Всі публікації містять результати безпосередньої роботи автора на окремих етапах досліджень і відображають основні положення та висновки дисертаційної роботи.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти основних розділів, висновків, налічує 147 сторінок машинописного тексту, містить 15 таблиць, 55 рисунків, бібліографічний список зі 130 джерел і 3 додатків.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КАМЕРНИХ ПЕЧЕЙ

1.1 Аналіз існуючих камерних печей та їх конструктивних особливостей

Великий внесок у розробку положень теорії печей внесли вчені Н. Ю. Тайц, М. А. Глінков, В. А. Кривандін, В. Л. Гусовський, В. Й. Губинський та ін. Як відомо [1-3], класифікацію чисельних конструкцій цих промислових установок перш за все проводять за ознакою джерела отримання тепла у робочому просторі, від чого їх конструкція залежить у найбільшій мірі. Виходячи з цього, розрізняють паливні та електричні печі. Більш детально класифікацію зазначеного промислового обладнання за чотирма основними ознаками представлено на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Класифікація промислових печей за основними ознаками

Суть процесу теплогенерації, що здійснюється у такому агрегаті, визначає зазвичай не тільки конструкцію печі, а й характер тепломасообміну у її робочому просторі [3]. Залежно від основного виду теплопередачі, усі вони діляться на наступні три групи: високотемпературні, середньотемпературні та низькотемпературні.

Відомо, що у металургійних печах проводиться нагрівання до високої температури з метою отримання чавуну, сталі, феросплавів, кольорових металів, а також для надання металевим або вогнетривким виробам необхідних механічних властивостей [4]. В металургії і машинобудуванні організація виробництва з повним циклом виконання технологічних операцій також здійснюється шляхом використання в тому числі камерних печей різних конструкцій. Розглянемо основні їх елементи на прикладі камерної газової печі, схема якої представлена на рисунку 1.2 [3].

Як видно з наведеного рисунку 1.2, піч складається з робочого простору та відповідних джерел теплоти, до складу ж допоміжного обладнання входять пристрої для утилізації останньої й очищення відхідних димових газів, трубопроводи з клапанами і засувками, димові труби. Така камерна піч є універсальним теплотехнологічним агрегатом періодичної дії, що широко використовується для термічної обробки різних виробів: труб, листової сталі, поковок та іншої продукції з чорного та кольорового металу. Відомо, що термічна обробка металів проводиться для поліпшення їх структури і надання властивостей, необхідних для використання в конкретних умовах: міцності, твердості, зносостійкості, в'язкості і т.п. Вона включає в себе низку операцій, а саме: нагрів до певної температури, підтримання її деякий час на певному рівні і охолодження до заданої температури. Найбільш поширеними операціями термічної обробки є відпал, нормалізація, загартування, відпуск і цементация.

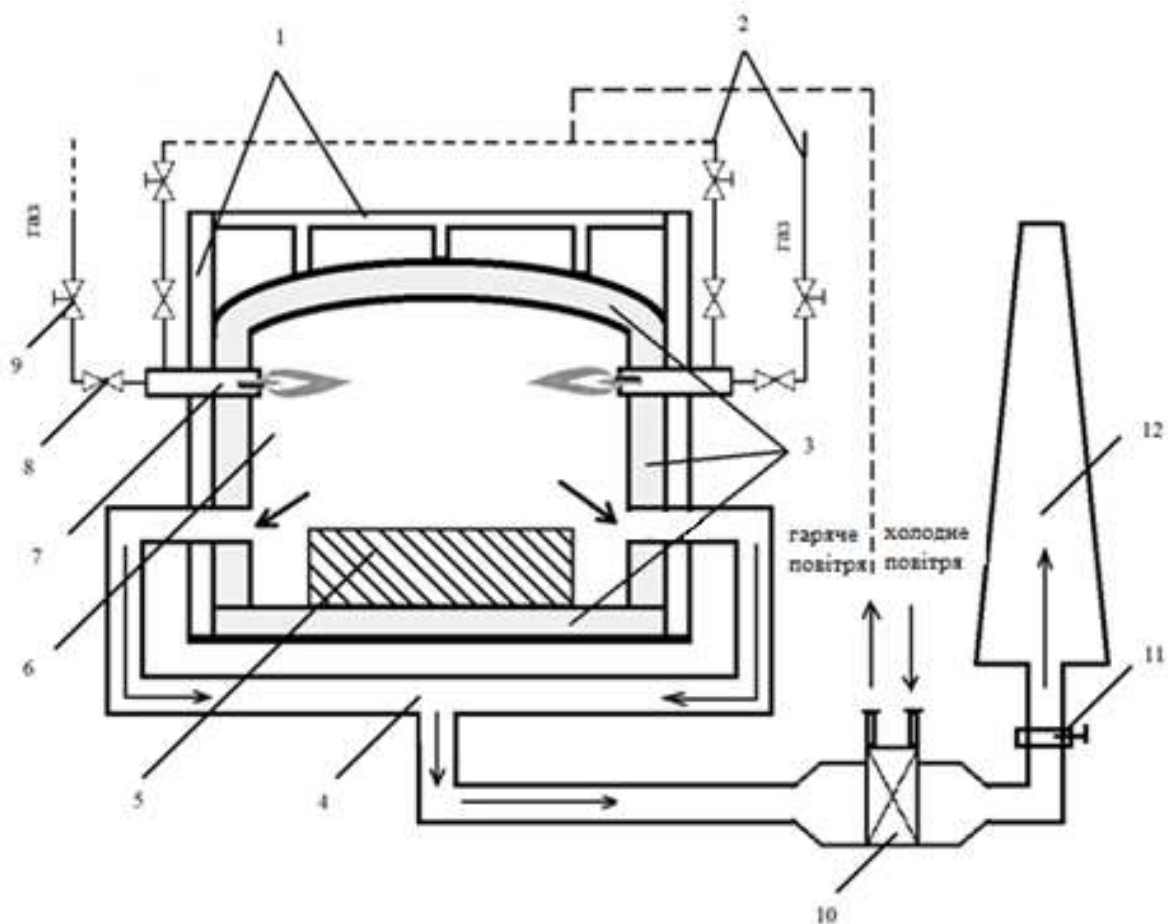


Рисунок 1.2. – Основні елементи камерної печі:

1 – металевий каркас; 2 – газоповітропровід; 3 – футерування (зведення, стіни, подина); 4 – димоходи; 5 – садка з металом; 6 – робочий простір печі; 7 – пальник; 8 – дроселі; 9 – заслонки; 10 – теплообмінник; 11 – димовий шибер; 12 – димова труба [3]

1.2 Існуючі проблеми енергоефективності камерних печей

Згідно Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [5] пріоритетними напрямками енергозбереження є зниження енергоємності виробництва, скорочення споживання первинних паливно-енергетичних ресурсів за рахунок впровадження новітніх енергоефективних та енергозберігаючих заходів. У цілому ж, споживання газу в Україні можна охарактеризувати як надлишкове й нераціональне.

На рисунку 1.3 представлена структура кінцевого споживання енергії в Україні за 2017 - 2018 р.р. Як видно з діаграми, частка природного газу у загальній структурі споживання енергії складає 30 % [6].

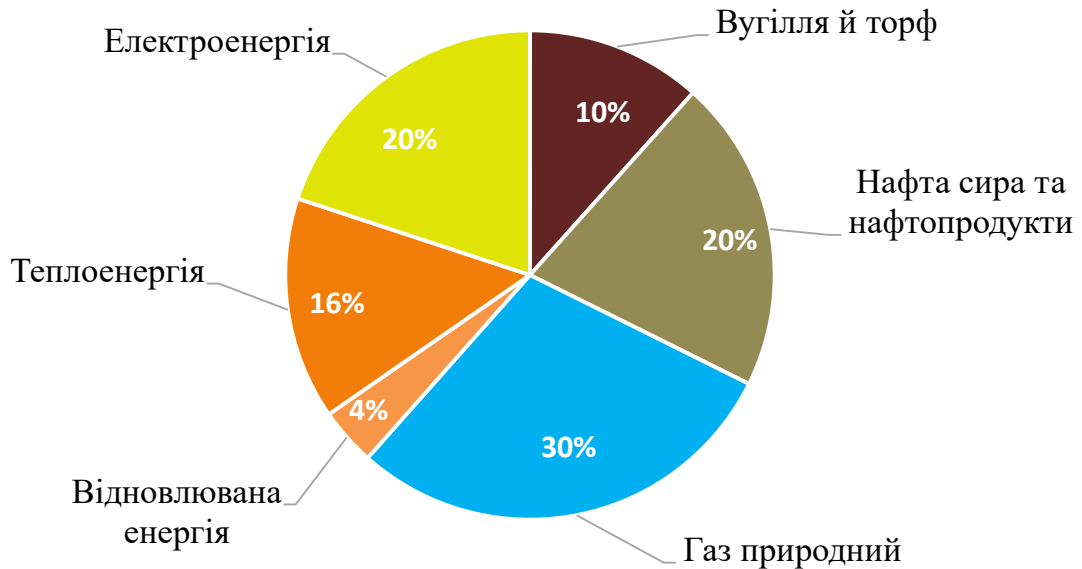


Рисунок 1.3 – Структура кінцевого споживання енергії в Україні за 2017 - 2018 р.р. [6]

За даними Державної служби статистики України, підприємствами й організаціями у 2017 р. використано 106,5 млн.т.у.п. первинних і вторинних видів. У структурі використаного палива (рис. 1.4) у тому ж році 34,3 % припадало на природний газ, 30,1 % – на вугілля, 13,0 % – на нафтопродукти, 10,7 % – на кокс і напівкокс та 11,9 % – на інші види палива.

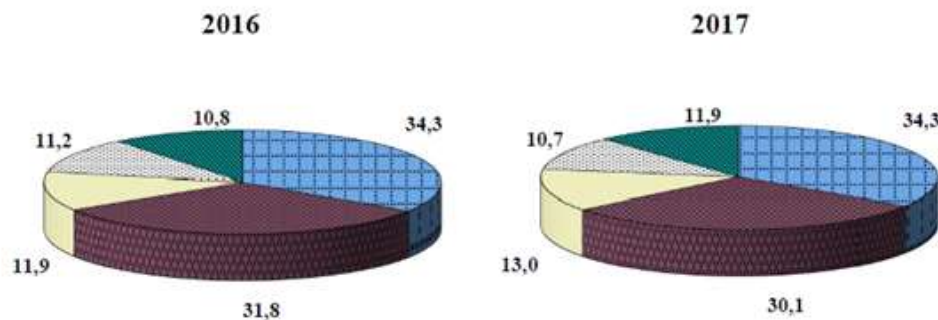


Рисунок 1.4 – Структура використання палива, % [7]

На рисунку 1.5 показано, що основна частка використання палива за видами економічної діяльності припадала на промисловість (88,9 % у 2016 р. та 87 % у 2017 р.) [7].

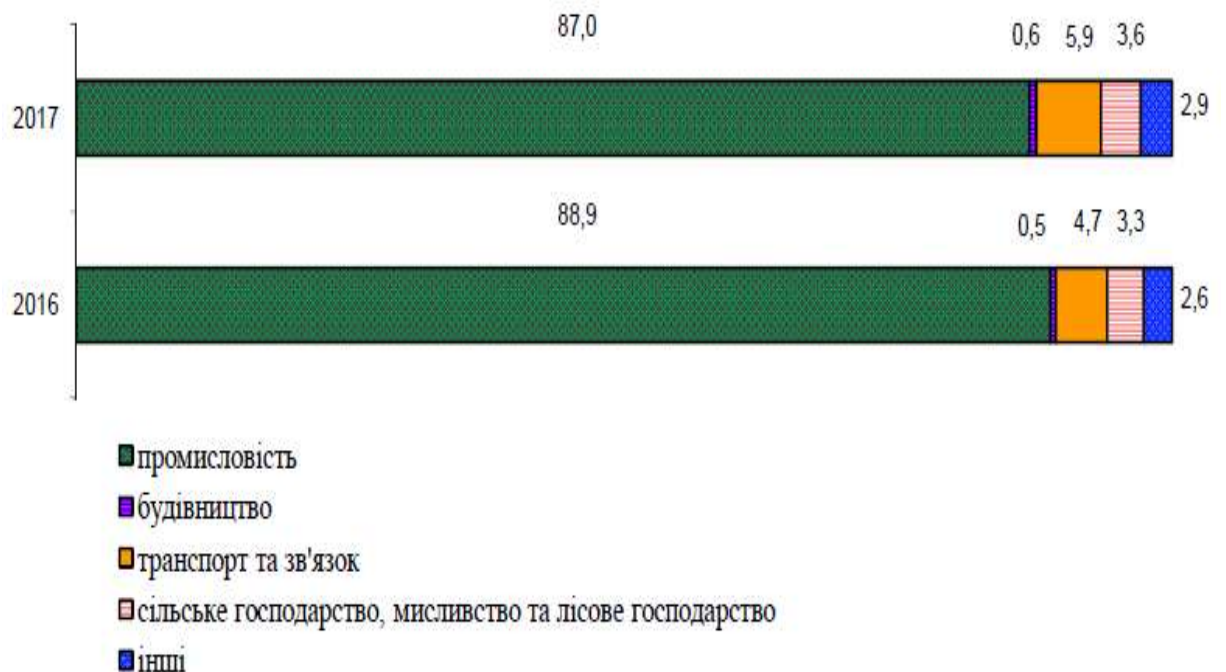


Рисунок 1.5 – Розподіл використання палива за видами економічної діяльності, % [7]

За інформацією, яку офіційно представила національна компанія “Нафтогаз України” (рис. 1.6) використання природного газу промисловими споживачами у 2017 р. склало 9,1 млрд. куб.м., що складає майже 29 % від загального обсягу споживання [8]. Тому стратегічним завданням державного значення є модернізація промисловості щодо раціональності енерговикористання.

Енергозбереження на промислових підприємствах України, а особливо підвищення енергоефективності теплових агрегатів, набуває першорядного значення, оскільки воно безпосередньо пов’язане з собівартістю кінцевої продукції [9]. Особливо це стосується металургійних виробництв через їхню високу енергоємність. Розглянемо ці питання більш детально.

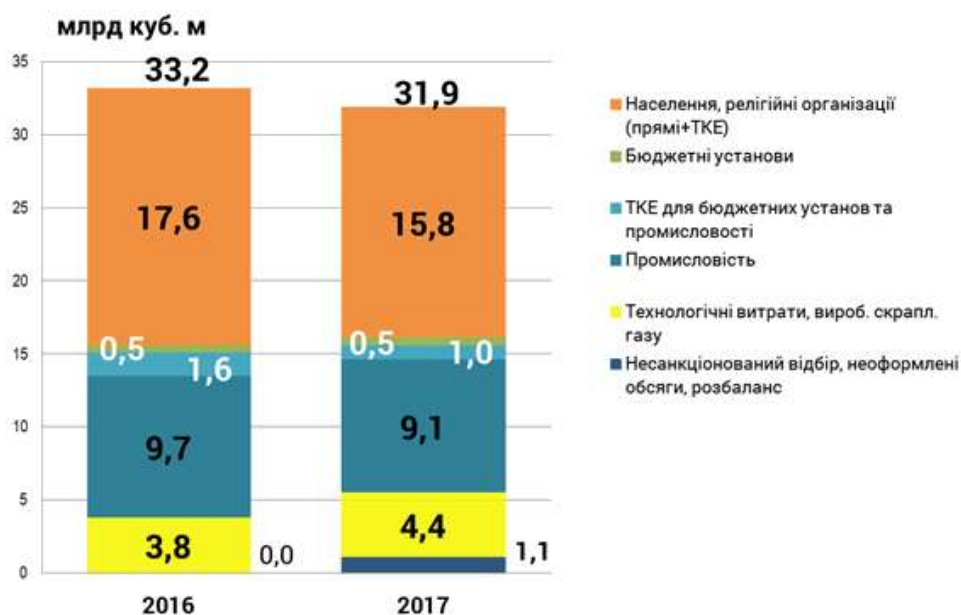


Рисунок 1.6 – Використання природного газу в Україні у 2016 - 2017 рр., млрд куб.м [8]

Як вже зазначалось вище, на підприємствах металургії і машинобудування України широкого поширення набули камерні нагрівальні печі, які використовують в якості палива природний газ. Але через високу конкуренцію з розвиненими країнами-виробниками розглядуваної продукції в країні гостро стоїть питання зниження витрат первинного енергоносія на одиницю продукції, що випускається. Як відомо, заощаджена у споживача 1 т.у.п. еквівалентна 2,5 щодо первинних паливних ресурсів [10]. У зв'язку з цим головною при конструюванні печей зараз є вимога енерго- і ресурсозбереження [11 - 13].

Маючи такі значні переваги, як універсальність з точки зору якості нагрівання виробів і широкий спектр регулювання режиму роботи, дані установки мають і низку істотних недоліків, серед яких значні теплові втрати з димовими газами, недоцільний розподіл теплоти у межах камери, великий відсоток угару металу, тощо [4, 10]. Перелічені особливості призводять до зменшення енергетичної ефективності установки в цілому.

Більшість таких печей примітивні за конструкцією і експлуатуються з неефективно працюючими пристроями для утилізації теплоти димових газів,

а деколи і взагалі без них. Внаслідок того, що температура в нагрівальних печах досягає 1000°C і вище, невідновлювальні теплові втрати, пов'язані з викидом високотемпературних димових газів в атмосферу, інколи перевищують 50 % всієї теплової потужності печі [14].

Для більш детального розгляду цього питання на рисунку 1.7 представлено схему розподілу потоків теплоти у паливній печі [4]. В цій системі є два види енергетичних втрат: у робочому просторі – $M_{в.рп.}$ і на виході з нього $M_{вих.}$. Теплота газів, що відходять з робочого простору, необов'язково повністю віддається атмосфері $M_{вих.ат.}$. В сучасних паливних печах частина її може частково повертатися у вигляді фізичної теплоти вхідного повітря – $M_{ф.п.}$ та палива $M_{ф.т.}$. Тепловий баланс паливної печі має вигляд:

$$M_{заг.} = M_{засв.} + M_{в.рп.} + M_{вих.} - M_{ф.п.} - M_{ф.т.} \quad (1.1)$$

де $M_{засв.}$ – засвоєна потужність, яка витрачається на нагрів металу, Вт.

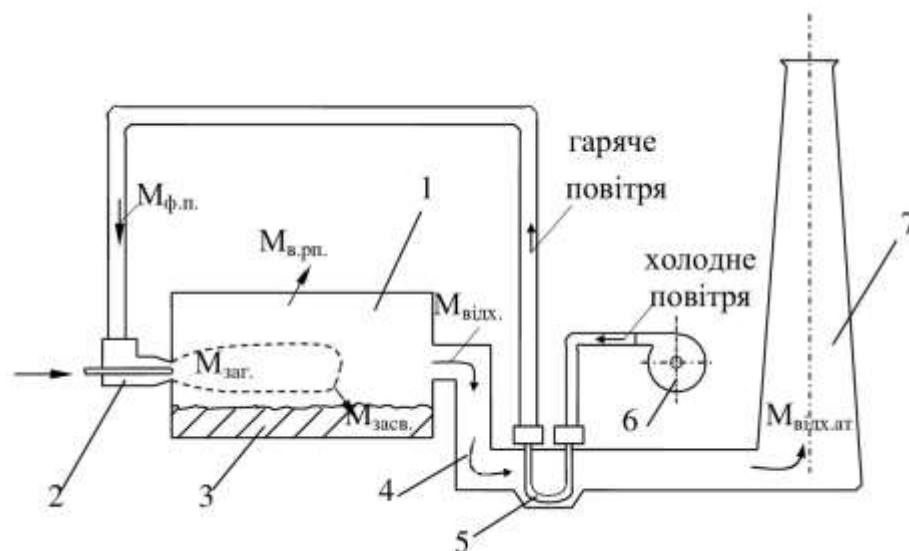


Рисунок 1.7 – Потіки теплоти у паливній печі:

- 1 – робочий простір; 2 – пальник; 3 – матеріал, що нагрівається; 4 – димовий канал; 5 – утилізатор відхідних газів (рекуператор); 6 – вентилятор;
7 – димова труба [4]

Для виявлення причин низької енергоефективності агрегату, що розглядається, та шляхів їх усунення, у якості прикладу представлено розрахований тепловий баланс камерної нагрівальної печі ковальсько-пресового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь». Паливо – природний газ, вид термообробки – нагрів металу, марка сталі – У12, час роботи печі 13,53 год, витрата палива 109,1 м³/год, ККД печі 45 %.

Перший період складається з трьох інтервалів ($C_1 = \text{const} = 60$ °С/год.):

- 1) нагрів від $t_{п0} = 100$ °С до $t_{п1} = 500$ °С;
- 2) нагрів від $t_{п1} = 500$ °С до $t_{п2} = 1000$ °С;
- 3) нагрів від $t_{п2} = 1000$ °С до $t_{п3} = 1300$ °С.

Температура при посаді 100 °С.

Другий період - витримка при $t_{п3} = 1300$ °С.

Результати розрахованого теплового балансу представлено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Тепловий баланс камерної нагрівальної печі

Стаття	Прихід тепла		Стаття	Витрата тепла	
	МДж за два періоди	%		МДж за два періоди	%
Тепло, отримане від горіння палива	90180	99,24	Тепло, засвоєне металом	40570	41,04
Фізичне тепло повітря	8651	0,76	Втрати тепла теплопровідністю	3728	3,77
			Тепло, акумульоване кладкою печі	9610	9,72
			Втрати тепла випромінюванням	1406	1,42
			Втрати тепла з відхідними газами	43520	44,03
Разом	98831	100	Разом	98834	100

Враховуючи вищезазначене, основним резервом економії палива є використання теплового потенціалу продуктів згоряння, який складає більше близько 40 % тепла камерної печі, а пріоритетною задачею є розробка і впровадження енергозберігаючих заходів з метою зниження викидів теплоти у атмосферу із збереженням при цьому необхідної якості виробничих процесів металургії. [15]. Зазначене вище підтверджується жорсткими вимогами, що висуваються до роботи існуючих камерних печей [16], а саме, забезпечення:

- заданого рівня продуктивності;
- вимог відносно зневугледцювання, окалиноутворення і перегрівання металу та його механічних властивостей;
- ефективного використання палива, характеристикою якого служить питома витрата енергії на одиницю продукції;
- відповідності екологічним нормам за гранично допустимими викидами в атмосферу пилу і шкідливих газів, максимально дозволені концентрації яких на промислових підприємствах регламентуються державними стандартами і обґрунтовані санітарно-гігієнічними нормами;
- однакових умов передачі теплоти в усьому робочому просторі для забезпечення якісного рівномірного нагрівання нерухомої садки металу [16].

Відомо, що температурно-часові режими обробки металу жорстко регламентовано технологією за усіма фазами процесу термообробки, оскільки їх задають як для забезпечення заданої температури поверхні металу і рівномірного нагрівання, так і досягнення необхідних теплофізичних перетворень в останньому. Тому впровадження ресурсозберігаючих заходів щодо камерних печей і повинно бути направлено на досягнення необхідної температури у зоні розташування садки з металом при найменших витратах природного газу [15].

1.3 Аналіз можливих шляхів підвищення енергоефективності камерних печей

Питанню удосконалення теплової роботи печей та підвищенню енергоефективності нагрівання й термічної обробки металу присвячено багато наукових публікацій та технічних рішень [17 - 24]. Останні засновані на удосконаленні системи та режимів опалення, пальникових пристроїв, конструктивних особливостей печей, систем автоматичної оптимізації процесу використання палива, тощо [25 - 33]. Завдяки дослідженням вітчизняних і зарубіжних вчених сьогодні для більшості конструкцій печей створені аналітичні методики розрахунку процесів нагріву і термообробки, закладені основи створення, ідентифікації і налаштування математичних моделей процесів нагріву, що базуються на вирішенні диференціального рівняння нестационарної теплопровідності [34 - 43]. Запропоновано також безліч практичних рішень щодо зменшення витрати палива, а саме: використання сучасних керамоволокнистих матеріалів для футерування агрегатів, створення високоефективних рекуператорів, застосування плоскофакельних пальників, реалізацію імпульсного опалення і т.д [44 - 54].

Найбільш ефективним засобом підвищення коефіцієнту використання теплоти палива вважається рекуперація тепла за рахунок підігріву димовими газами печі компонентів горіння. Останнє інтенсифікує процеси їх сумішоутворення, скорочує час нагрівання паливо-повітряної суміші до температури спалаху і збільшує швидкість горіння. У свою чергу, це веде до скорочення довжини факела і можливості працювати з меншим надлишком повітря, дозволяє знизити собівартість нагріву за рахунок скорочення втрат тепла з відхідними газами [11].

В роботі [11] розглядається проблема використання оптимальних енергозберігаючих режимів нагріву в камерних печах, яка зводиться до розрахунку та реалізації такого процесу зміни температурного стану виробу, що нагрівається, у часі або за довжиною робочого простору, яка зводить

вартість нагріву до мінімуму. Особливістю енергозберігаючого режиму нагріву є його інтенсифікація на кінцевій стадії. У такому випадку зменшуються витрати теплової енергії на підтримання більш високої температури заготовок. Режим, що передбачає інтенсифікацію нагріву на завершальній стадії, дозволяє одночасно зменшити й втрати металу від окислення.

На жаль, в реальних виробничих умовах рекомендований розрахунковий режим нагріву складно реалізується через проблеми, які пов'язані з необхідністю урахування різних конструкційних та технологічних обмежень. Конструкція робочого простору печі для зменшення експлуатаційних витрат передбачає використання потужних однотипних пальників в усіх її зонах. А збільшення теплової потужності печі призводить до необхідності заміни кладки робочого простору в зонах інтенсивного нагріву на більш вогнетривку. Вона повинна витримувати збільшення температурних меж робочих режимів та мати відповідні теплоізолюючі властивості. Крім того, для забезпечення енергозберігаючого режиму обробки металу необхідно не тільки змінити конструкцію робочого простору печі, але ще і обов'язково мати оперативний прогноз загального проміжку часу знаходження кожної заготовки у робочому просторі (з похибкою не більше 2 %) з урахуванням всіх запланованих та випадкових зупинок технологічної установки [11].

В роботі [11] розглядається спосіб управління процесом згорання палива, що забезпечує об'ємну пропорційну витрату палива та повітря за рахунок стабілізації заданого поточного значення коефіцієнту витрати повітря. Хоча він і є найбільш розповсюдженим, але не відповідає достатній ефективності. Причина тому – нелінійність залежності необхідного значення коефіцієнту витрати повітря від поточного обсягу споживання палива. Забезпечення оптимального значення цього коефіцієнту вимагає безперервного оперативного втручання технолога-оператора у процес

управління при кожній зміні поточної витрати палива, що фізично реалізувати дуже складно.

Поліпшити техніко-економічні показники процесів теплової обробки матеріалів можливо також за рахунок збільшення конвективної тепловіддачі. На практиці це зазвичай досягається шляхом підвищення швидкостей і щільностей теплоносіїв, що обдувають поверхню металу. В даний час у якості одного із засобів покращення теплообміну використовують імпульсні режими нагріву печей, які дозволяють зменшити витрати палива більш ніж на 10 % [11]. Такий нагрів опалення має безперечні переваги перед традиційним безперервним, що зазвичай використовується задля забезпечення температурних режимів у теплових агрегатах. До цих переваг відносяться і рівномірність нагрівання усього обсягу садки металу, і відсутність критичних перепадів температури, і значне підвищення конвективної складової теплообміну за рахунок ліквідації «застійних» зон щодо аеродинаміки робочого обсягу агрегату. Забезпечується також автоматична організація оптимального рециркуляційного потоку гріючих газів, що призводить до скорочення тривалості теплової обробки металу і збільшує продуктивність агрегату за рахунок зменшення витрати газоподібного палива та більш раціонального використання його виробничої потужності [14]. Проте, незважаючи на зазначені переваги, на шляху широкого впровадження імпульсного опалення існує низка перешкод:

- наявні пальники, що встановлені на теплових агрегатах, як правило, не можуть працювати за такими режимами і реалізувати зазначене опалення;
- відсутня універсальна методика розрахунку тривалості подавання імпульсу палива, а також його відсутності, що не дозволяє ще на етапі розробки проекту підібрати необхідні пальники та систему автоматичного регулювання для конкретного агрегату;
- неможливо використати у широких масштабах напрацьований позитивний досвід впровадження цього методу через відсутність зазначеної

вище методики. В літературі [10] представлена лише деяка інформація щодо практичної реалізації таких режимів і не може вважатися універсальною.

На думку деяких авторів [10, 14] головною причиною перевитрати енергетичних ресурсів у камерних печах є недостатня утилізація теплоти їх відхідних газів. Застосування пристроїв регенеративного або рекуперативного типу [14] дає можливість в деякій мірі використовувати теплоту продуктів згоряння для підігрівання повітря та самого палива. Відомі деякі конструкції плавильних і нагрівальних печей, в яких застосовані регенератори у вигляді цегляних насадок Каупера або Сіменса. Але у сучасних агрегатах регенеративні теплообмінники практично не знаходять використання через нераціональну втрату палива, яка має місце при перекиданні клапанів, що є особливістю використання регенераторів.

Щодо рекуператору, то через різноманітність конструкцій промислових газових печей і показників їх роботи неможливо отримати найкраще рішення щодо його виду. Тому у кожному конкретному випадку це питання не є остаточно вирішеним. Серед конструкцій рекуператорів, що використовують, переважають керамічні (зі стандартних шамотних трубок) і сталеві гладкотрубні, недоліком яких є необхідні значні відносні габарити на кожну одиницю тепла, що утилізується.

На сьогодні ситуація на українських підприємствах характеризується в більшості випадків досить низькими показниками ефективності використання рекуператорів. В умовах дефіциту капіталовкладень доцільність підвищення енергетичної ефективності камерних печей за рахунок зазначених вище заходів викликає сумнів.

Також, одним із сучасних ефективних способів спалювання палива є його об'ємне горіння в робочому просторі печі, обладнаної сучасними утилізаторами теплоти пічних газів – регенераторами з насадкою, що має досить велику поверхню теплообміну або мінірегенераторами. Регенеративні пальники активно застосовувалися на печах різноманітного призначення і конструкцій: на скловарних печах і печах для плавлення алюмінію, в

методичних, прохідних і камерних нагрівальних печах, в повітрянагрівачах і котлах, в нагрівальних колодязях і печах для відпалу тощо [14]. Використання регенеративних пальників дозволяє знизити витрату палива на (30...50) % з одночасним підвищенням продуктивності зазначених технологічних агрегатів.

Проте, високотемпературний підігрів повітря має і ряд недоліків, до яких в основному відносяться:

- високий рівень оксидів азоту, який є головним забруднювачем атмосфери при спалюванні палива;
- інтенсифікація процесу утворення окалини при великих температурах факела, які характерні для високотемпературного підігріву повітря горіння. Швидкість цього процесу залежить ще і від загальної температури в печі та складу пічної атмосфери;
- збільшення нерівномірності нагрівання металу високотемпературним факелом як за поверхнею металу (нестандартність нагріву), так і за перетином виробів, які нагріваються, що відбувається за рахунок зростання теплового потоку на поверхні металу з боку факела.

При такому спалюванні палива з високотемпературним повітрям в печах спостерігається також місцевий перегрів і оплавлення металу високотемпературним факелом [10]. То ж всі перераховані недоліки пов'язані з надто концентрованим джерелом енергії.

В традиційних печах для досягнення рівномірності і стандартності нагрівання застосовують ще і внутрішню та зовнішню рециркуляцію, реверс пічних газів, зміну напрямку факелу струменем компресорного повітря або гойданням пальників, періодичною зміною якісного або кількісного складу реагентів згоряння і іншими способами управління температурним полем [14]. Всі ці методи спрямовані на усунення локальних високотемпературних зон факелу і створення для металу рівнозначних умов нагрівання, поліпшення теплообміну в робочому просторі печі, з переходом факельного спалювання палива в режими, наближені до об'ємного спалювання.

Аналіз наявних на сьогоднішній день публікацій, присвячених проблемам підвищення енергоефективності камерних печей, показав, що аеродинаміка останніх є нераціональною. Відомо, що впливати на напрям руху теплових потоків в печі можливо шляхом покращення її аеродинаміки за рахунок зміни положення пальників і витяжних вікон [55,56]. Так у роботі [57] наведено розраховану картину розподілу температурних зон у камері печі, за якою найбільша температура спостерігається в її верхній частині й зосереджена у об'ємі, що складає 41 % відносно загального, у той же час садка металу знаходиться в зоні зі значно меншою температурою.

Авторами зазначеної роботи була сформульована і розв'язана задача конструктивної оптимізації камерної печі за критерієм максимального збільшення температури у зоні, де розташовані заготовки, а відповідно і теплової енергії, що припадає на неї. Математично ця задача виглядає наступним чином:

$$\left\{ \begin{array}{l} N_3 \rightarrow \max \\ Q_x + Q_{екз} = Q_m + Q_d + Q_{кл} + Q_{тр} + Q_{ак}^{кл} + Q_{неврах} \\ Y_{min} \leq Y_{nn} \leq Y_{max} \\ Z_{min} \leq Z_{nn} \leq Z_{max} \\ Y_{min} \leq Y_{вв} \leq Y_{max} \\ Z_{min} \leq Z_{вв} \leq Z_{max} \\ \tau = \frac{F^2 \cdot \rho \cdot c}{3,6 \cdot k_{\phi} \cdot \lambda \cdot S_k} \cdot (\Phi_{кін} - \Phi_{поч}) \end{array} \right. \quad (1.2)$$

де

$$N_3 = \frac{V_3 \cdot c_3}{\sum_1^6 V_i \cdot c_i} \cdot 100. \quad (1.3)$$

У виразах (1.2, 1.3) N_3 – доля теплової енергії, що припадає на зону печі, де розміщені заготовки, %; F – товщина заготовки, м; $k_{\phi} = 1 -$ коефіцієнт форми; ρ – щільність тіла, т/м³; c – середня теплоємність металу в інтервалі температур від $t_{поч}$ до $t_{кін}$, (кДж / (кг · К); S_k – радіаційне число

Старка; $\Phi_{кон}, \Phi_{нач}$ – початкове та кінцеве значення температурного фактору в залежності від температури і конвективного числа Біо; V_i та V_z – об'єми i -ої розглядуваної зони та тієї, де розташовані заготовки; C_i та C_z – середня теплоємність газів в i -й зоні та тій, де розташовані заготовки, ($\frac{Дж}{кг \cdot K}$).

Авторами було проведено моделювання температурних зон у камері печі, що відповідає оптимальному розташуванню пальників і витяжних вікон. З'ясувалося, що суттєво збільшити температуру в місці реального розташування садки за рахунок зазначених конструктивних змін не вдається. Розмістити ж останні у зоні, на яку припадає найбільший відсоток загальної теплової енергії є технічно складним завданням, а концентрувати теплоту там, де розташовані заготівки без суттєвої зміни напрямку теплового потоку неможливо. На жаль, у даній роботі не проведено моделювання циркуляційного руху пічних газів у камері печі [57].

У роботі [58] досліджено вплив зовнішнього електричного поля на характеристики тепломасообміну в камері згоряння, тракт охолодження якої заповнений пористим матеріалом. Встановлено, що у випадку застосування до камери згоряння постійного негативного потенціалу 900 В потік тепла від продуктів згоряння до вогневої стінки збільшується (приблизно у 2,7 рази).

Для дослідження впливу зовнішнього електричного поля на особливості процесу передачі тепла від газоподібних продуктів згоряння до вогневої стінки авторами була розроблена експериментальна установка (рис. 1.8), яка включала в себе камеру згоряння, магістралі подачі газоподібного окислювача (повітря) і пального (пропану), охолоджуючого компонента (повітря), а також системи вимірювання та реєстрації.

Електричне поле створювалося між електрично ізольованими перфорованою пластиною (8, рис. 1.8) і корпусом камери згоряння за рахунок застосування постійної напруги 900 В. Аналіз результатів досліджень авторів показав, що при позитивному потенціалі на камері згоряння зареєстровано розширення меж стійкості полум'я, яке можна

оцінити по збільшенню швидкості зриву V_b полум'я від 1,61 м/с ($U = 0$) до 1,95 м/с ($U = 0,9$ кВ).

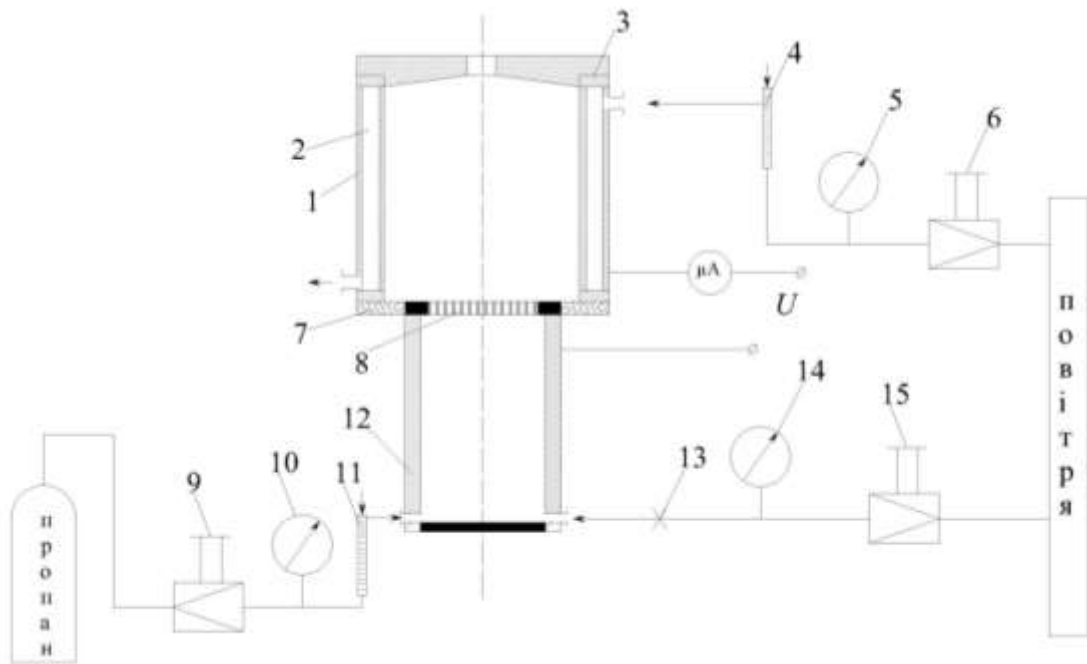


Рисунок 1.8 – Схема установки:

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

У разі зміни полярності інтенсифікуючий вплив зовнішнього електричного поля на процеси запалення й горіння виявився менш значним: $V_b = 1,76$ м/с. З аналізу залежності іонізаційного струму від часу (рис. 1.9) випливає, що збільшення його значень якісно відповідає характеру збільшення температури охолоджуючого теплоносія і, отже, вогневої стінки камери згоряння.

До камери згоряння з прикріпленим нижнім фланцем, який одночасно служив електричною ізоляцією між камерою змішання і камерою згоряння, з огляду на розглянуті вище дані, прикладався негативний потенціал. Результати показують, що температура вогневої стінки збільшується на $\sim 31\%$ (рис. 1.10).

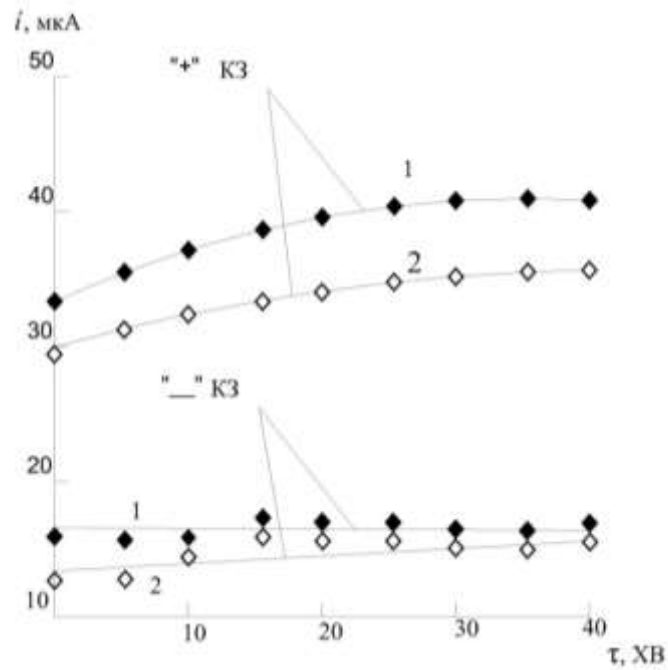


Рисунок 1.9 – Іонізаційний струм у полум'ї $\dot{m}_f = 0.108$ г/с; $\alpha = 0.42$, $T^* = 1600$ К; $\dot{m}_a$, г/с: 1-0,084; 2-0.15 [58]

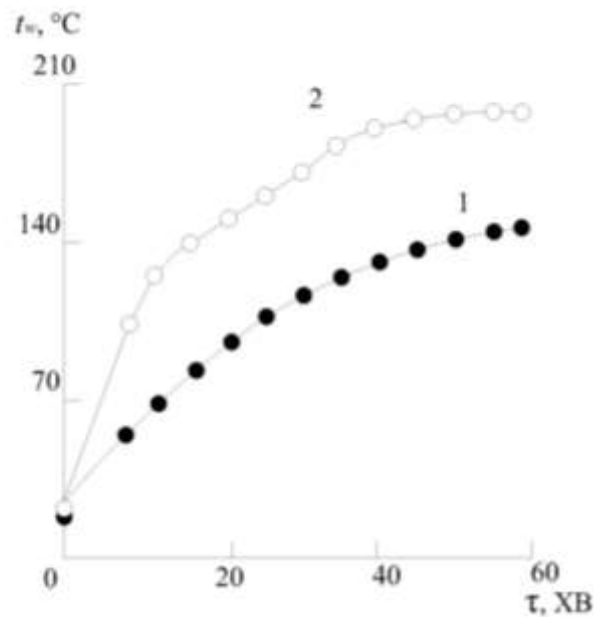


Рисунок 1.10 – Зміна температури вогневої стінки в залежності від часу:
1- без подачі напруги, 2 - під напругою 0,9 кВ [58]

Отримані результати свідчать про інтенсифікацію процесів тепломасообміну, займання і горіння палива, які могли бути викликані наступними причинами. При створенні різниці потенціалів між

перфорованою пластиною і стінкою камери виникає спрямований рух вільних електронів до анода і позитивних іонів до катода. Причому потік рухомих позитивних іонів утворює іонний вітер, який захоплює мікрооб'єми продуктів згоряння. Авторами роботи [58] експериментально встановлено, що накладення зовнішнього електричного поля призводить до збільшення або зменшення теплового потоку від продуктів згоряння до вогневої стінки в залежності від полярності прикладеної напруги. Зміни в значеннях щільності конвективного потоку можуть бути пояснені впливом іонного вітру, який, взаємодіючи з приграничним шаром стінки, обумовлює зміну його геометричних і теплофізичних параметрів.

1.4 Висновки до розділу і постановка завдань дослідження

Оскільки у перспективі маловірогідним є зменшення кількості нагрівальних печей у вітчизняній промисловості, інноваційні напрацювання щодо підвищення енергоефективності зазначених теплових агрегатів набувають першочергового значення. Незважаючи на те, що питання вдосконалення теплової роботи печей вивчаються протягом багатьох десятиліть вітчизняними і зарубіжними вченими, існує значний розрив між обсягами наукових досліджень і практичними показниками роботи існуючих печей. Навіть за швидкої окупності заходів щодо реконструкції промислових печей з метою енергозбереження їх впровадження в даний час 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. 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.

Оскільки енергоефективність камерної печі залежить від щільності теплового потоку у зазначеній зоні – першочерговим завданням є отримання полів температур пічних газів в об'ємі камери, що дозволило б розробити економічно доцільний і технічно не складний в реалізації спосіб управління ними. Враховуючи те, що на сьогодні загальновідомими способами змінити перешкоджання руху теплових потоків у небажаному напрямку є створення теплового бар'єру, виникає необхідність реалізувати це у найбільш сприятливому для цього місці об'єму печі. Цікаво також з'ясувати чи достатньо і доцільно використати у якості джерела такої завіси, окрім додаткових газових пальників, іонізовані частки продуктів горіння, направляючи їх у необхідному напрямку електричним полем.

На основі зроблених за результатами виконаного аналізу висновків, сформульовані наступні завдання досліджень:

1. Виконати чисельне моделювання швидкостей пічних газів у камері печі.
2. Розробити та створити експериментальну нагрівальну установку для дослідження обсягу іонізації продуктів згоряння на відстані від пальника.
3. Розробити математичну модель щодо розподілу температури в камері нагрівальної установки з урахуванням впливу створеного в ній електричного поля.
4. Розробити алгоритм управління процесом нагріву металу у камерній печі на основі використання керованих електричних полів.
5. Провести аналіз та визначити раціональні параметри нестационарного електричного поля.
6. Виконати розрахункову та промислову оцінки щодо доцільності подальшого використання результатів дослідження.

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО УПРАВЛІННЯ НАПРЯМКОМ І ШВИДКІСТЮ ПІЧНИХ ГАЗІВ У КАМЕРІ ПЕЧІ

2.1 Аналіз методів математичного моделювання процесів тепломасобміну у промислових печах

Метою сучасної теорії конструювання і модернізації печей є забезпечення якісної теплової обробки матеріалів, підвищення енергоефективності та ресурсозбереження шляхом управління процесами тепломасопереносу. На сьогоднішній день розроблені теоретичні положення та методи моделювання роботи сучасних печей з можливістю управління температурним полем, яке формується під дією таких факторів, як умови спалювання палива і рух газів в робочому просторі.

Як відомо, конструювання сучасних печей різної продуктивності і призначення включає в себе передпроектне дослідження, яке полягає у комп'ютерному моделюванні комплексу пов'язаних теплообмінних процесів: циркуляції пічних газів, горіння палива, теплообміну і температурного поля газів в робочому просторі печі [1]. До змінних експлуатаційних і конструктивних параметрів установки при моделюванні відносять: вид палива, геометричні параметри робочого простору, схему циркуляції пічних газів, одиничну потужність, кількість і розташування пальників, швидкість палива і повітря на виході з пальникових каналів, а також взаємне розташування каналів для введення у піч палива і повітря.

З огляду на рівень розвитку обчислювальної техніки та програмування, перевага віддається програмним розрахунковим комплексам, що базуються на вирішенні складних мультифізичних завдань з використанням чисельних методів. Одним з основних напрямків розвитку методів математичного моделювання складних теплофізичних процесів натеper є розробка і застосування необхідного програмного забезпечення.

Математичні моделі теплофізичних процесів, що протікають у промислових печах, давно і широко використовуються для вдосконалення конструкцій і режимів роботи промислових печей [59 - 64]. При цьому найбільш важливими практичними завданнями зазначеного вдосконалення є зменшення угару металу у печах, економія палива та зменшення кількості парникових газів, що утворюються під час горіння. Однак якість цих моделей не можна вважати задовільною з точки зору можливості надійного вирішення багатьох практичних завдань, а найголовніше – математичного опису руху газів у робочих камерах печей. Без вирішення цього завдання неможливо з достатньою точністю і достовірністю описати процеси променево-конвективного перенесення теплоти і маси, які грають важливу роль у формуванні полів концентрації компонентів газового середовища і температури. Зазначена обставина зумовлена надзвичайною складністю процесу турбулентної течії газу в камерах при наявності процесів горіння і теплообміну.

В роботі [65] відзначають, що інженерні розрахунки можуть бути використані лише для отримання орієнтовних даних, в той час як застосування підходу до розрахунків топкових агрегатів CFD моделювання (Computational Fluid Dynamics) дозволяє істотно підвищити якість розглянутих математичних моделей. Зазначене моделювання у цілому – це побудова мереж, в вузлах яких виконується чисельне рішення систем рівнянь з урахуванням відповідних граничних умов. Проаналізувавши зарубіжну літературу, автори наголошують, що будь-яка серйозна реконструкція металургійної печі повинна мати в якості необхідної складової розробку математичної моделі на базі зазначеного вище програмно-обчислювального комплексу.

В роботах [66 - 71] також розглядається застосування сучасних методів моделювання з метою розрахунку теплової роботи паливних нагрівальних печей. Відмічено, що при врахуванні процесів горіння палива, сучасні моделі складного променево-конвективного теплообміну дають

можливість оцінити вплив кількості пальників, їх розташування та конструктивні особливості на якість спалювання палива і нагрівання виробів в теплотехнічних установках різних типів. Вказано, що для спрощення завдань з метою визначення напрямків руху вони використовують рівняння Нав'є-Стокса для рідини, що не стискається, які вирішуються в примітивних змінних із застосуванням рознесених сіток для компонентів швидкості. Одночасно з процесами теплообміну необхідно дати оцінку і гідроаеродинаміці потоків поряд з визначенням локальних характеристик. Зазначено, що на теперішній час існує ряд потужних комерційних програмних комплексів (Phoenix, Deform, Fluent, Ansys, Comsol та ін.), які можуть застосовуватися при розв'язанні зазначених завдань.

Розглядаючи дане питання слід зазначити, що моделювання процесів теплообміну є складним та потребує багато ресурсів, особливо при розгляді нестационарних трьохмірних задач. Можливо цим можна пояснити намагання деяких дослідників зробити проекцію моделі теплообміну в шарі на високотемпературні конструкції [11]. В таких спрощених моделях передача тепла від носія енергії відбувається завдяки конвективним явищам та променистій тепловіддачі, а самі спрощення стосувались геометричних форм тіл, їх мас, спрощення крайових умов, визначення температури у шарі протягом процесу [11]. На нашу думку, через такі спрощення складно отримати стабільні результати та використати їх на практиці. Проте, розвиток сучасних технологій та програмного забезпечення дозволяє вирішувати розглядувані нестационарні багатомірні задачі числовими та наближеними аналітичними методами [11].

У роботі [72] для розв'язання задач теплопровідності автори використовували метод кінцевих різниць. При розрахунках у цих задачах для вибору необхідних параметрів їхні значення визначають після отримання попередньо результатів з наступним корегуванням вихідних параметрів на величину похибки. У якості таких вихідних параметрів беруть

точки в просторових координатах, часові інтервали та ступінь неявності системи різницевих рівнянь.

Для різних високотемпературних нагрівальних агрегатів автори [73] використовували метод наближеного розрахунку температурних полів з використанням алгоритмів кінцево-різницевих схем. Відмінністю цього підходу є те, що диференціальні рівняння в частинних приводяться до лінійного вигляду. При цьому при розрахунках теплообміну враховується тип джерела тепла.

У роботі [74] автори використовують метод дискретного аналогу, який враховує функції теплових джерел та неявність різницевої схеми. Цей метод також базується на застосуванні кінцево-різницевих схем.

Виконаний аналіз відомих методів математичного моделювання теплової роботи високотемпературних нагрівальних і термічних печей показав, що поряд з традиційними методами розв'язання задач теплопровідності поширене використання знаходять наразі програмні комплекси, які дозволяють враховувати ряд складних теплофізичних і гідродинамічних процесів, що відбуваються в високотемпературних теплотехнологічних установках.

2.2 Аналіз існуючих математичних моделей камерних нагрівальних печей

Зазвичай задача забезпечення заданого рівня якості теплової обробки матеріалів розділяється на дві складові [11]:

- визначення раціональних (оптимальних) параметрів температурного поля і теплового впливу, які дозволяють досягти заданого рівня якості;

- забезпечення підтримки заданих параметрів теплового впливу за перебігом реального процесу теплової обробки. На сьогодні одним з найбільш ефективних інструментів вирішення першої підзадачі є метод

математичного моделювання. Незважаючи на технологічні, конструктивні та інші відмінності нагрівальних печей камерного типу на теперішній час вже визначено єдині підходи до організації та дослідження їх теплової роботи, а також типові системи автоматичного контролю й регулювання [11]. В основу практично усіх математичних моделей нагрівання термічно масивних тіл покладено диференціальне рівняння нестационарної теплопровідності з відповідними умовами однозначності [10]. При цьому можливі пряма і зворотна постановки задачі. У першому випадку визначається яке температурне поле матиме місце при заданих параметрах теплового впливу. Зворотня задача дозволяє визначити параметри цього впливу (теплові потоки, розподіл температур гріючого або охолоджуючого середовища), що забезпечують задане температурне поле. Питання ж контролю і регулювання вирішуються сьогоденні засобами АСУ ТП, при цьому важливе місце і у цьому разі займає математична модель теплового процесу.

За допомогою моделі теплової роботи камерної печі, в якій нагріваються злитки перед їх механічною обробкою, у роботі [11] визначали залежність продуктивності, питомої витрати палива, питомого виходу термічних оксидів азоту, втрат металу з окалиною від теплової потужності зазначеного агрегату. В якості критерія оптимальності використовувався комплексний енергоекономічний показник роботи печі.

Чисельні методи, якими вирішуються нелінійні задачі теплопровідності є менш переконливими [75], але більш прийнятними для реалізації їх на ЕОМ. Такі методи моделювання теплової роботи вищезазначених теплотехнічних установок потребують обґрунтування вибору необхідного підходу для виконання розрахунків, враховуючи обсяги затрат та точність одержаного результату.

У роботі [11] представлена математична модель нагрівальної печі методом застосування розподіленого згоряння палива, при якому якість нагрівання забезпечується шляхом створення рівномірного температурного поля та рівноцінних умов теплообміну.

У публікації [76] розглядається оптимальний за вартістю двокомпонентної суміші газоподібного палива режим нагрівання. Встановлено, що обсяги компонентів палива необхідно вибирати виходячи зі ступенів температурно-часового режиму, а також вирішено задачу вибору теплотворної властивості газоподібного палива.

У роботі [77] визначено оптимальні режими функціонування нагрівальних печей камерного типу за критеріями енергоефективності, розглядається управління їх тепловою роботою з метою забезпечення заданої точності нагрівання. В задачах оптимізації за часом нагрівання (швидкісне нагрівання) отримані ступінчасті теплові режими, тобто релейні закони зміни теплового навантаження, які повністю відповідають теоремі Фельдбаума щодо « n » інтервалів управління.

У роботі [78] представлено математичну модель оптимізації режимних параметрів теплоенергетичної установки, як вирішення задачі теплообміну в системі «гріючі гази - кладка печі - метал». Металеву заготовку розглядають як пористе тіло з ефективними теплофізичними параметрами. Під час розв'язання задачі оптимізації коефіцієнт передачі теплоти розраховують у нульовому наближенні, а потім уточнюють під час розрахунків. Складні обчислення полів температури для металу, який нагрівається та кладки печі дозволяють визначити тривалість періодів термічної обробки заготовок.

З метою вирішення прикладних задач оптимізації запропоновано спрощений алгоритм розрахунків щодо теплообміну в промислових технологічних пристроях з урахуванням неізотермічності об'єму, що нагрівають [79], згідно якому, як і раніше, потрібно вирішувати систему нелінійних диференціальних рівнянь з використанням простої інтеграції.

В роботі [80], де розглядається нагрів металу з мінімальною витратою палива, представлена модель камерної термічної печі, що працює в усадочному режимі з відповідними періодами нагріву та витримки металу. При цьому ставиться обмеження щодо температури поверхні металу, яке не

повинно перевищувати попередньо задане кінцеве значення, а перепад температур за товщиною в кінці нагріву – максимальне допустиме значення. Зазначена модель будується на основі вирішення сполученої задачі теплообміну в системі «газ – кладка – метал» за умови радіаційно-конвективного нагріву на внутрішній поверхні кладки та теплосприймаючій поверхні металу з граничними умовами третього роду щодо зовнішньої поверхні кладки. Поверхня металу, що звернена до поду печі, вважається адіабатною.

При визначенні температурних полів металу та кладки вони розглядаються як безкінечні пластини. Газовий об'єм в робочому просторі печі вважається ізотермічним, а випромінювання газу, кладки та металу – сірим. Розроблену математичну модель рекомендується використовувати у розрахунках технічно обґрунтованих норм витрат палива і при складанні технологічних карт нагріву металу в камерних термічних і нагрівальних печах, що працюють в усадочному режимі. Для оптимізації режиму роботи печі запропоновано використовувати універсальний генетичний алгоритм, який дозволяє суттєво скоротити час розрахунку в порівнянні з методом перебору варіантів.

При розв'язанні задачі оптимального управління нагрівом металу [80] запропоновано використати математичну модель на основі наступних рівнянь:

1) нагріву металу

$$\frac{dx_1}{d\tau} = \mu \cdot (t_z - x_1); \quad \mu = \frac{\alpha \cdot F_m}{M \cdot c_m \cdot m}; \quad (2.1)$$

2) високотемпературного окислення сталі (рівняння Вагнера)

$$\frac{dx_2}{d\tau} = \frac{[\chi \cdot \exp(-\frac{\beta}{t_{ноб} + 273})]^2}{2 \cdot x_2}, \quad (2.2)$$

де α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К); m – коефіцієнт масивності; β , χ - величини, які залежать від складу сталі і пічної атмосфери (величини β і χ представлені лінійними функціями, що залежать від коефіцієнта витрати повітря U_3 і вмісту доменного, коксового і природного газів у складі змішаного палива), К, кг/(м²·с^{0,5}); $t_{нов} = \frac{1}{m} \cdot [x_1 + t_{\Gamma} \cdot (m-1)]$ - температура поверхні металу, °С;

3) рівнянням зміни витрат на енергоносії

$$\frac{dx_3}{d\tau} = U_1 \cdot S_n + U_1 \cdot U_2 \cdot S_{\kappa} + U_1 \cdot V_{c.пг} \cdot S_{c.пг}, \quad (2.3)$$

де $V_{c.пг}$ - питома витрата стисненого повітря, що використовується для допалювання продуктів неповного згорання палива.

Система рівнянь (2.1 - 2.3) доповнена крайовими умовами

$$x_1(0) = x_{1H}, \quad x_2(0) = x_{2H}, \quad x_3(0) = 0, \quad x_1(\tau_{\kappa}) = x_{1\kappa} \quad (2.4)$$

і рівнянням теплового балансу робочого простору печі

$$Q_{\pi}^p U_1 = U_1 Q_x (1 - k_p) + Q_{n.в.} + \frac{\alpha \cdot F_M}{m} (t_{\varepsilon} - x_1) + K \cdot F_{\kappa l} (t_{\varepsilon} - t_{н.с.}) + U_1 c_{\varepsilon}' t_{\varepsilon} V_{\varepsilon} (1 - k_p), \quad (2.5)$$

де Q_x - хімічний недопал палива представлено функцією, яка залежить від U_3 ; V_{ε} - питомий об'єм продуктів згорання представлений функцією, що залежить від U_2 і U_3 .

На управляючі впливи і температуру середовища, що гріє, накладені обмеження

$$U_{1min} \leq U_1 \leq U_{1max}; U_{2min} \leq U_2 \leq U_{2max}; U_{3min} \leq U_3 \leq U_{3max}; t_{2min} \leq t_2 \leq t_{2max}. \quad (2.6)$$

Задача сформульована таким чином: потрібно нагріти метал від початкового стану $x_1(0) = x_{1H}$; $x_2(0) = x_{2H}$; $x_3(0) = 0$ до кінцевого стану $x_1(\tau_k) = x_{1K}$ з урахуванням обмежень (2.6) за заданий інтервал часу τ_k . При цьому витрати на нагрів мають бути мінімальними. За критерій оптимальності W прийнято вартість витрачених на нагрів палива, кисню та стисненого повітря, а також вартість металу, втраченого з окалиною

$$W = \int_0^{\tau_k} (U_1 \cdot S_n + U_2 \cdot S_k + U_3 \cdot V_{c.n\theta} \cdot S_{c.n\theta}) d\tau + E \cdot \int_0^{\tau_k} \frac{[\chi \cdot \exp(-\frac{\beta}{t_{nos} + 273})]^2}{2 \cdot x_2} d\tau, \quad (2.7)$$

де $E = F_m(S_m - S_{ок})$ – коефіцієнт, що визначає втрати металу від окислення ($m^2 \cdot \text{грн.}$)/кг.

Розв'язання задачі виконано з використанням принципу максимуму Понтрягіна Л.С. [81], відповідно до якого оптимальними є допустимі за обмеженням управління U_1^* , U_2^* , U_3^* , які в кожен момент часу максимізують Понтрягіан Π

$$\Pi = \sum_i^3 P_i \cdot \frac{dx_i}{d\tau}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (2.8)$$

Для даної задачі функція Π має вигляд

$$\begin{aligned} \Pi = P_1 \cdot \mu \cdot \left\{ \frac{U_1 \cdot [Q_n^p - Q_x \cdot (1 - k_p)] - Q_{n.\theta} + \frac{\alpha \cdot F_m}{m} \cdot x_1 + K \cdot F_{кл} \cdot t_{н.с.}}{\frac{\alpha \cdot F_m}{m} + K \cdot F_{кл} + U_1 \cdot c'_e \cdot V_e \cdot (1 - k_p)} - x_1 \right\} + \\ + P_2 \cdot \frac{[\chi \cdot \exp(-\frac{\beta}{t_{nos} + 273})]^2}{2 \cdot x_2} + P_3 \cdot U_1 \cdot (S_n + U_2 \cdot S_k + V_{c.n\theta} \cdot S_{c.n\theta}), \end{aligned} \quad (2.9)$$

де P_1 , P_2 , P_3 – змінні, що визначаються з розв'язання диференціальних рівнянь

$$\frac{dP_i}{d\tau} = -\frac{\partial \Pi}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (2.10)$$

з урахуванням початкових і граничних умов

$$P_1(0) = P_{1H}; \quad P_2(\tau_K) = -E; \quad P_3(\tau_K) = -1. \quad (2.11)$$

Розв'язання даної задачі виконано числовим методом. Аналіз результатів розрахунку дозволив встановити:

1) оптимізація режиму нагріву металу в продуктах неповного згорання палива призводить до необхідності проводити нагрів в умовах наростаючої теплової потужності із зсувом максимальних теплових навантажень на завершальну стадію;

2) збільшення кількості задіяних в процесі нагріву управляючих впливів дозволяє зменшити затрати на нагрів;

Для прийнятих умов досліджувався також вплив різних режимних параметрів на економічні показники нагріву. Встановлено:

1) зниження заданої кінцевої температури нагріву металу з 1250 °С до 1200°С зменшує загальні затрати на 10,5 %, а збільшення температури посадки металу від 20 °С до 500 °С – на 18,5 %;

2) зниження рівня максимально допустимої температури середовища, що гріє, зменшує ефект від оптимального управління процесом нагріву металу. Так, зниження зазначеної температури з 1350 °С до 1300 °С збільшує втрати від окалиноутворення на 17 %, затрати енергоносіїв – на 3,7 %, загальні затрати – на 5,2 %;

3) збільшення коефіцієнта рекуперації тепла і зростання ціни кисню підвищує результативність витрати палива як управляючого впливу і знижує ефективність застосування кисню.

У даній роботі отримано теоретичні висновки та встановлено функціональний зв'язок між складом палива, коефіцієнтом витрати повітря, витратами палива й кисню, що дозволило визначити оптимальні

технологічні режими нагріву металу та оцінити вплив теплотехнічних і економічних параметрів на вибір раціонального складу палива, а також визначити ефективність використання кисню. Розроблено також математичну модель нагріву металу в двокамерній нагрівальній печі, на основі якої виконано числові дослідження впливу довжини факела на теплопоглинання та рівномірність нагріву металу, а також виконано оцінку ефективності різних способів опалення. Встановлено перевагу імпульсного способу опалення, який дозволяє знизити кінцевий перепад температури поверхні металу відносно температури витримування.

Нагрівання термічно тонких тіл за нелінійних граничних умов із урахуванням втрат теплоти через кладку печі розглянуто у роботі [11]. Невизначеність теплофізичних параметрів металу, умовність використаних механізмів передавання теплоти знижують практичну цінність одержаних результатів, оскільки не дозволяють отримати кількісні параметри.

Проблемою розглянутих моделей нагрівання печей зазначеного типу є невизначеність ідентифікації, а також задання температурної залежності теплофізичних параметрів металу. Аналіз відомих публікацій показав, що більша частина робіт цього напрямку в основному пов'язана з побудовою спрощених моделей, які тільки частково відображають процеси, що відбуваються в нагрівальних та термічних печах і описують лише їх деякі складові. Такі математичні аналоги не дають повної, об'ємної картини зміни температури і теплового потоку. Зазвичай розглядаються одно- або двовірні стаціонарні поля. Опису ж динамічних процесів в тривимірному просторі поки не приділялося належної уваги і тому це питання потребує подальших досліджень.

2.3 Моделювання циркуляційного руху пічних газів у зоні розташування заготовок

Аналіз відомих моделей, розглянутих у роботах [82 - 85] показав, що останні не враховують розподіл теплових потоків і не дозволяють створити досконаліші методики проектування та управління для газових нагрівальних

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

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

Для вирішення поставленої задачі дослідження були прийняті наступні основні допущення:

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

Граничні умови. На рисунку 2.1 наведено розрахункову схему камери типової печі, що розглядається у двомірній постановці.

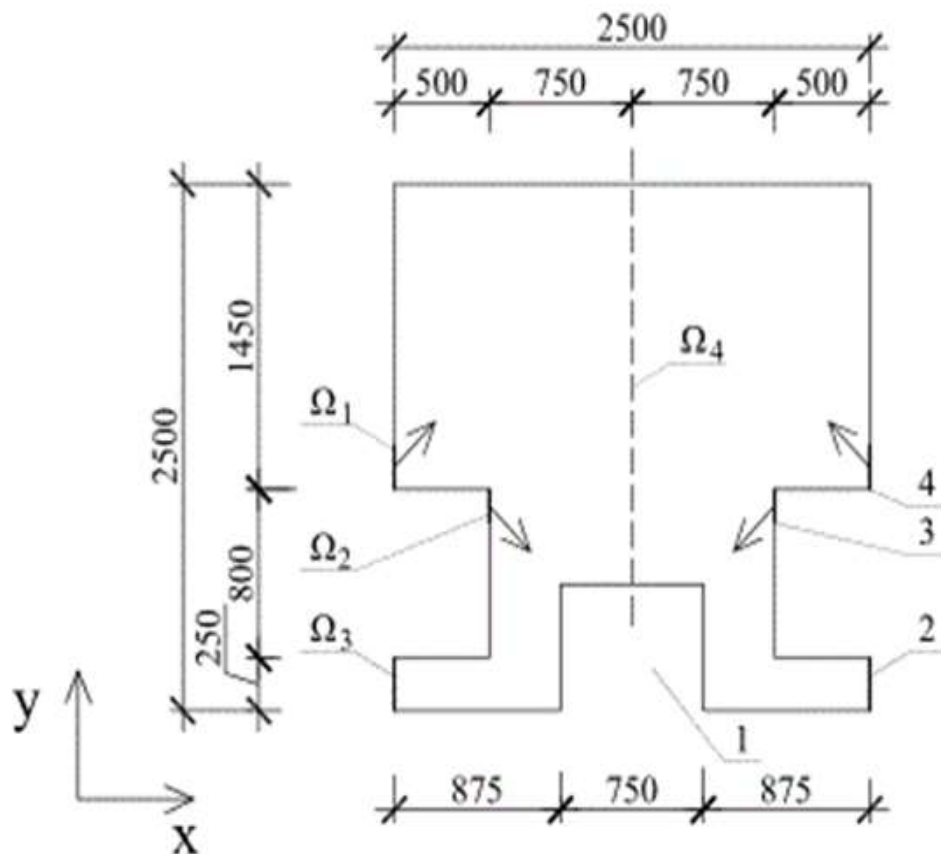


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема камери печі:

1 – садка металу, 2 – димовий канал, 3 – умовний пальник теплової завіси,
4 – реальний пальник печі

На границях Ω_1 та Ω_2 (вхід моделі) задаються значення компонентів вектору швидкості U_{in} , V_{in} , значення кінетичної енергії турбулентності k_{in} та швидкості дисипації кінетичної енергії турбулентності ε_{in} . На границі Ω_3 (вихід моделі) задаються значення градієнтів параметрів $\varphi = \{U, V, P, k, \varepsilon\}$, де $\partial\varphi/\partial x = 0$. На границі Ω_4 (вісь симетрії камери) задаються значення градієнтів $\partial\varphi/\partial y = 0$. На всіх інших границях (тверді поверхні) задаються наступні значення швидкостей і тиску $U = V = \partial P/\partial n = 0$, де n – нормаль до поверхні. Для моделі турбулентності використовується стандартна функція стінки [94].

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

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V) = 0; \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho UU) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho VU) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial U}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial U}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial x}; \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho UV) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho VV) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_t \frac{\partial V}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_t \frac{\partial V}{\partial y} \right) - \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (2.14)$$

де y, x – координати;

U, V – складові вектора швидкості;

P – тиск;

ρ – щільність;

μ_t – турбулентна динамічна в'язкість.

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

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.15)$$

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

Значення k і ε отримано з рівнянь:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U k) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V k) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + G - \rho \varepsilon; \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho U \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho V \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.17)$$

де μ – молекулярна динамічна в'язкість;

G – генерація турбулентної кінетичної енергії;

σ_k – турбулентне число Прандтля для дифузії k ;

σ_ε – турбулентне число Прандтля для дифузії ε ;

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

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

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

Для моделювання полів швидкостей газів у камері було використано комплекс програм для чисельного моделювання, які дозволяють розрахувати рух газів з урахуванням турбулентності [94]. На рисунку 2.2 представлені результати моделювання вектору швидкості в центральній частині камерної печі.

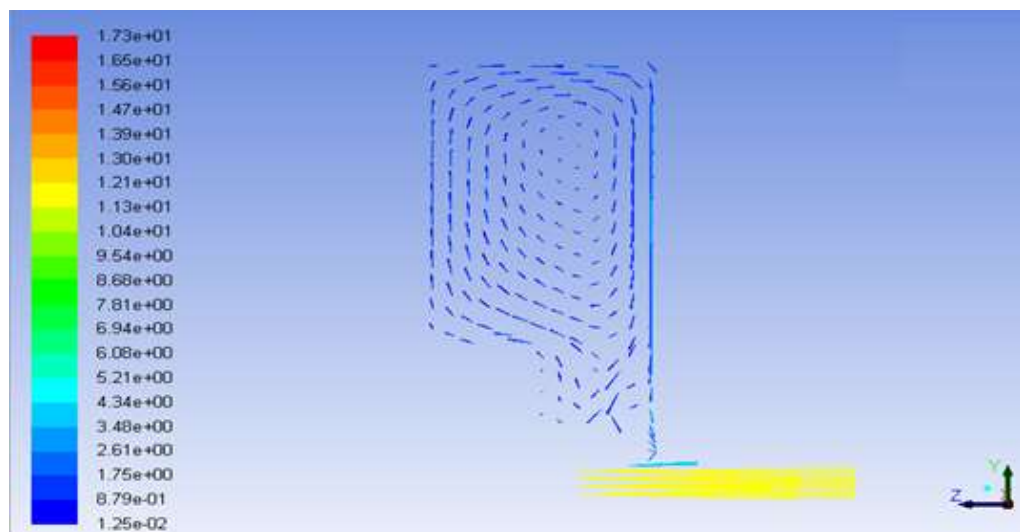


Рисунок 2.2 – Вектор швидкості в центральній частині печі

На рисунку 2.3 представлені результати моделювання ліній току пічних газів у робочому об'ємі печі.

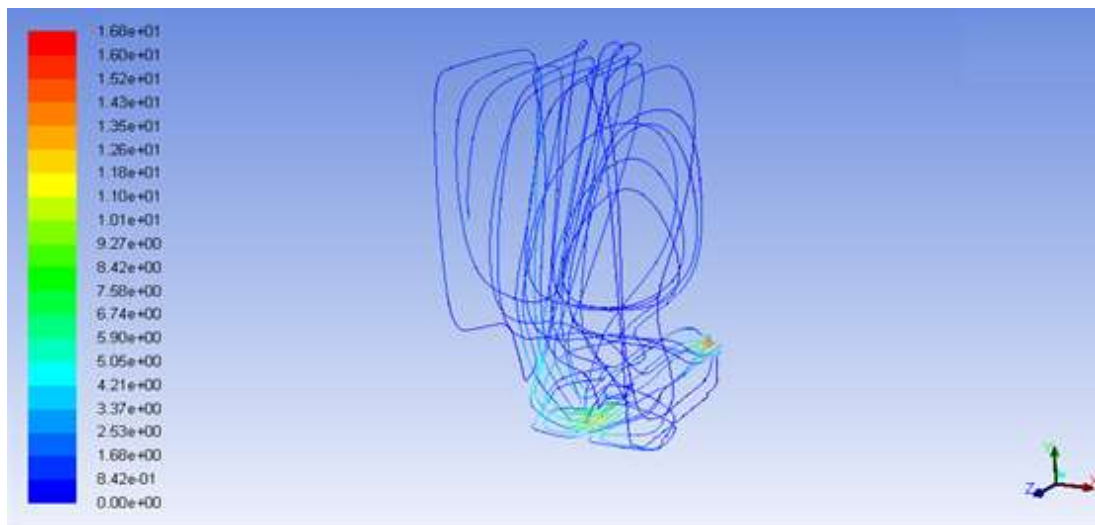


Рисунок 2.3 – Лінії току пічних газів у робочому об'ємі печі

У якості прикладу на рисунках 2.4 та 2.5 представлені результати зазначених розрахунків при швидкості газової струї на виході з сопла пальника $w_T = 100$ м/с. Приведена лише половина розрізу робочого простору печі, тому що розв'язувалась симетрична задача [94].

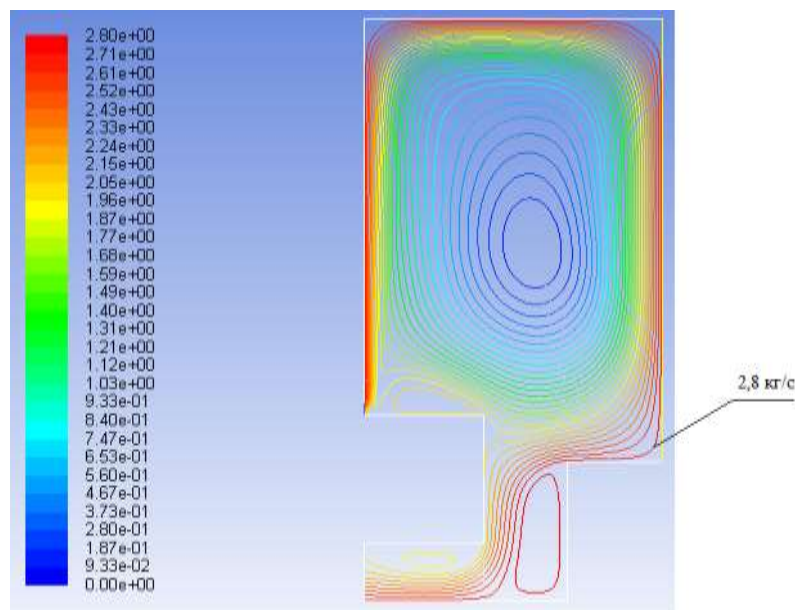


Рисунок 2.4 – Результати моделювання масових витрат пічних газів у камері без теплового бар'єру

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

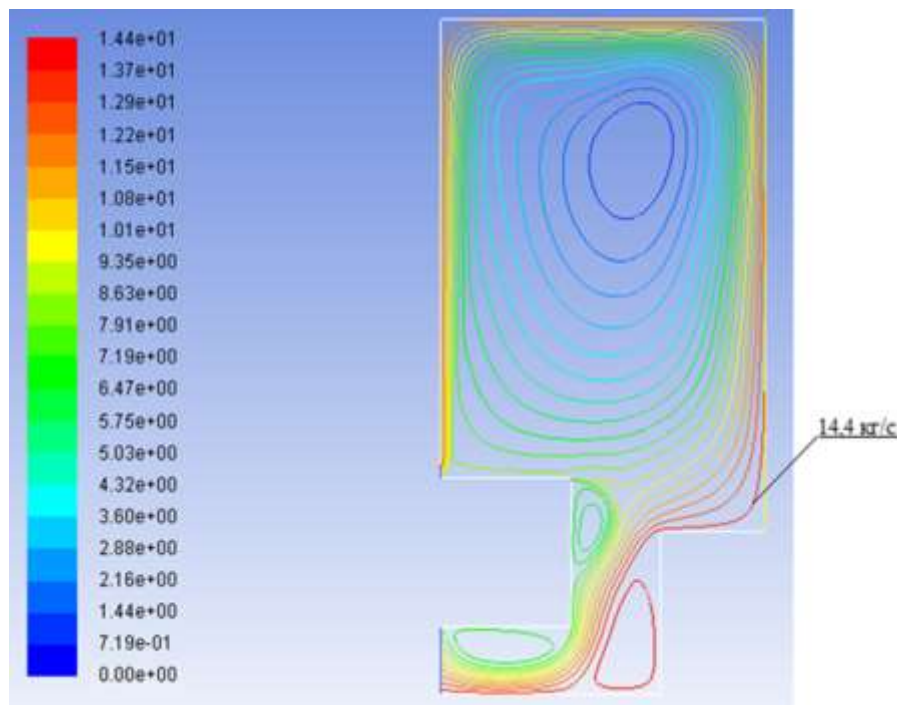


Рисунок 2.5 – Результати моделювання масових витрат пічних газів у камері з тепловим бар'єром

Аналіз результатів, одержаних за умови створення додаткового штучного теплового бар'єру показав, що масові витрати пічних газів у місці розташування садки з металом збільшується. Як видно з рисунку 2.5 створюються додаткові циркуляції пічних газів, що перешкоджають тепловому потоку відразу направлятися до димових вікон, чим і створюється більша їх щільність біля садки. Це дійсно може забезпечити більш ефективне

використання теплоти у місці розташування металу та економію витрати палива і високу рівномірність нагрівання.

На рисунку 2.6 наведені, отримані в результаті проведених числових експериментів, масові обсяги пічних газів поблизу садки з металом при швидкостях газової струї на виході з сопла пальника 50 і 100 м/с при різних відсотках їх витрат на тепловий бар'єр у порівнянні з обсягами поблизу пальника.

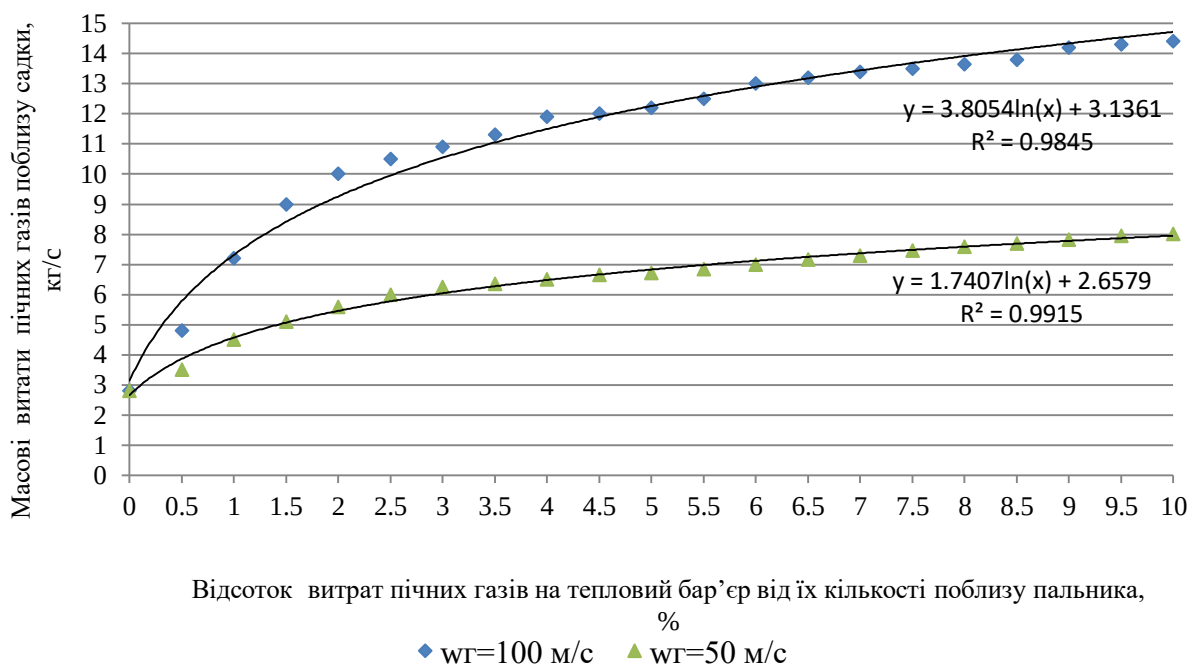


Рисунок 2.6 – Залежність масової витрати пічних газів у місці розташування металевих виробів від відсотка їх витрат на тепловий бар'єр

Для уникнення струминного нагріву, який може порушити технологію термічної обробки металу та вплинути на його якість, на рисунку 2.6 прийнято максимальні витрати пічних газів на теплову завісу у порівнянні з їх кількістю поблизу пальника – 10 %. Аналіз отриманих залежностей дозволяє зробити висновок, що навіть невеликий зазначений відсоток достатній для значного зростання швидкості пічних газів у зоні розташування металу.

Таким чином, з метою більш ефективного використання теплової енергії у робочому просторі печі необхідно впровадження інноваційних

способів управління тепловими потоками. То ж науковий інтерес викликає ідея створення теплової завіси у камері реально діючої печі задля збільшення масових витрат пічних газів у зоні розташування садки з металом шляхом руху іонізованих часток продуктів згоряння у необхідному напрямку під дією електричного поля.

2.4 Висновки до розділу

1. Відомі математичні моделі камерних газових печей вибірково відображають процеси, що відбуваються в таких об'єктах та не дають повної, об'ємної картини розподілу теплових потоків у робочому просторі.

2. Чисельне моделювання поля швидкостей пічних газів у камерній печі може бути виконано за допомогою рівняння Нав'є-Стокса для нестисливої рідини і рівняння нерозривності. Турбулентність руху в'язкого газу при цьому враховується за допомогою RNG $k-\epsilon$ моделі.

3. Аналіз результатів моделювання полів швидкостей газів в робочому об'ємі, представлений на рисунку 2.4 свідчить про те, що більша кількість останніх нагріває верхню частину печі та видаляється через димові вікна, не віддавши теплоти металу, що нагрівається.

4. Те, що зазначене збільшення масових витрат пічних газів у зоні розташування відбувається за малих обсягів витрат на тепловий бар'єр в порівнянні з кількістю продуктів згоряння поблизу пальників печі, свідчить про можливість використати для створення цієї завіси не додаткові менш потужні пальники, а ту невелику кількість іонізованих часток, що є у зазначених продуктах згоряння, направивши їх у необхідному напрямку електричним полем.

5. За відсутності інформації щодо реальної кількості іонізованих часток у продуктах згоряння палива в нагрівальній печі і наскільки швидко вона зменшується при віддаленні від пальника, необхідно з'ясувати це питання шляхом проведення відповідних експериментів на фізичній моделі об'єкта, що розглядається.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЩОДО ФОРМУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПОЛЕМ

3.1 Обґрунтування можливості корегування напрямку теплового потоку електричним полем

Існує велика кількість публікацій, присвячених дії електричних полів на процес горіння [95 - 98], але щодо їх впливу на теплові потоки питання залишається відкритим. Тож з'ясування можливості впливання на рух пічних газів зазначеним чином потребує подальших досліджень.

Більшість будь-яких хімічних реакцій є складними, тобто включають в себе деяку кількість взаємопов'язаних елементарних стадій. Для розрахунку їх кінетики при фіксованій температурі потрібно проінтегрувати повну систему рівнянь, яка складається з відповідних залежностей для кожної молекули або атому. Дані рівняння повинні враховувати моменти утворення і зникнення хімічних з'єднань впродовж усіх елементарних перетворень у пічних газах.

Складність отриманої системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку можна зменшити на число лінійно незалежних рівнянь збереження елементарного складу. Але знайти аналітичне рішення зазначеної системи, що описує реакцію горіння у камері печі, вдається лише в найбільш простих випадках. Значно частіше доводиться застосовувати наближені методи щодо цього рішення. Ситуація ще більше ускладнюється якщо враховується неізотермічність процесів, тоді отриману систему кінетичних залежностей необхідно об'єднувати з рівнянням енергетичного балансу.

Одним з найбільш уживаних наближених методів є сформульований Боденштейном метод стаціонарних концентрацій [99]. Його суть полягає у тому, що концентрації активних проміжних речовин (іонів, радикалів), вважаються стаціонарними, тобто їх похідні за часом в кінетичних залежностях вважаються рівними нулю. В результаті відповідні

диференціальні рівняння замінюються алгебраїчними співвідношеннями, що дозволяє знизити загальний порядок системи.

Метод стаціонарних концентрацій ґрунтується на високій реакційній здатності проміжних активних компонентів, які швидко вступають в реакції з іншими речовинами таким чином, що впродовж незначної зміни концентрації палива і продуктів горіння різниця швидкостей утворення і зникнення активних проміжних центрів стає малою у порівнянні зі швидкістю кожної реакції.

Схематично розвиток окислення водню зображено на рисунку 3.1. Стрілки показують, в які реакції вступають частки, що беруть участь у взаємодії речовин. У середині зони займання достатньо одного атома водню, щоб викликати появу лавини активних частинок, утворення яких припиняється лише після використання усіх початкових речовин. Самоприскорення розгалуженої ланцюгової реакції пов'язане з тим, що швидкість зникнення активних частинок зазвичай значно менша швидкості їх утворення [99].

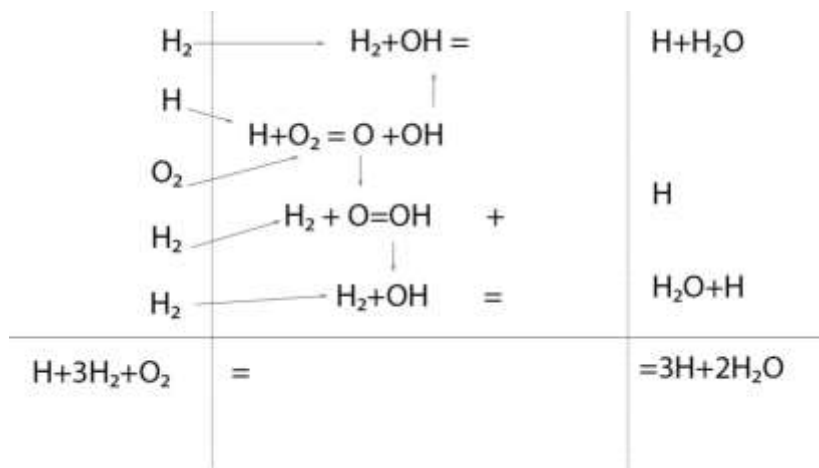


Рисунок 3.1 – Схема розвитку реакції окислення водню

Звертає на себе увагу і те, що на початковій стадії реакції, коли відбувається наростання концентрації атомів водню (H), тепла виділяється мало. В основному воно починає з'являтися тільки тоді, коли кількість атомів водню стає близькою до максимальної і починається їх рекомбінація,

що і спричиняє суттєвий тепловий ефект. У початковій же стадії реакції хімічна енергія вихідних речовин переходить не в тепло, а в енергію активних частинок - атомів, що й обумовлює швидкий перебіг цієї реакції.

Механізм окислення окису вуглецю має також характер ланцюгової реакції. Можна уявити окислення вуглецю самою простою схемою:

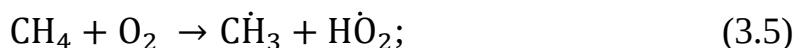


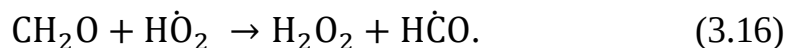
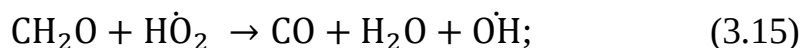
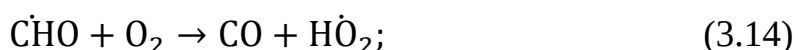
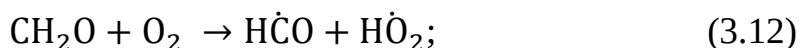
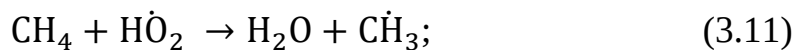
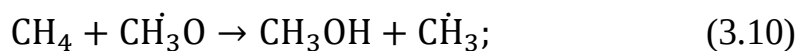
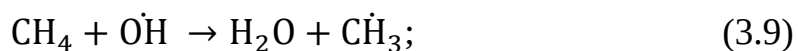
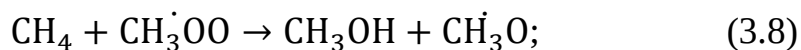
Водень надалі окислюється до води. Однак енергія активації цієї реакції велика і швидкість її незначна. Вирішальну роль грає тут гідроксил, а ланцюгова реакція йде за схемою:



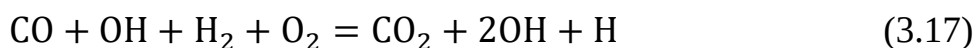
Дослідження показують що окислення вуглеводнів в цілому має деяку схожість з окисленням водню і окису вуглецю і, крім того, включає ці процеси як складову частину. Проте окислення вуглеводнів значно складніше, і тому не дозволяє створити надійні схеми, що об'єктивно відображають картину в цілому. Дослідження ведуться за двома основними напрямками: вивчається дійсний механізм, набір, а також послідовність реакцій і емпірично підбираються сумарні хімічні формули, які б досить добре описували явища в середньому і дозволяли проводити відповідні розрахунки.

На прикладі окислення метану можна спостерігати, наскільки складний цей процес. Схема являє набір таких елементарних реакцій [99]:





Це лише приблизний механізм реакції, і тому він не пояснює всі різноманітні прояви високотемпературного окислення. Сумарна підсумкова реакція може бути записана так [99]:



Видно, що одночасно з утворенням вуглекислого газу збільшується кількість гідроксилу – активного центру – і утворюється водень. Лише при об'єднанні H і OH реакція стає нерозгалуженою. Однак при невеликих концентраціях водню асоціація не грає великої ролі. Реакція в цілому тоді розгалужується.

Відомо, що при хімічному перетворенні, яке відбувається в результаті ланцюгового розгалуженого процесу, інтенсифікувати реакцію можна введенням в газову суміш активних центрів (радикалів, атомів, іонів). Останні вступають у взаємодію з великою активністю - часто практично з нульової енергії активації. Швидкість цих актів визначається частотою зіткнень зазначених центрів з іншими складовими елементарних процесів. При цьому сумарна швидкість хімічного перетворення виявляється великою навіть при незначній концентрації активних часток. Отже, впливаючи на

частоту зіткнень активних центрів електричним полем, можна регулювати швидкість процесу горіння [99, 100].

Хоча стаціонарне гомогенне полум'я в цілому є електрично нейтральним, проте в ньому є протилежні заряджені частинки, які до того ж розподілені нерівномірно. Зона реакції і зовнішній конус характеризуються переважно позитивним зарядом, а внутрішній – негативним. Такий поділ різнойменних зарядів викликаний різною рухливістю позитивних іонів і негативних частинок – електронів. І це побічно підтверджує, що джерелом наелектризованості полум'я є хімічна реакція, яка розвивається у його фронті [99, 100].

Утворені в результаті горіння позитивні іони через їх малу рухливість залишаються переважно у місці свого виникнення, тоді коли одночасно отримані більш рухливі електрони швидко залишають фронт полум'я і утворюють переважно негативний заряд у внутрішньому конусі [89-93,100]. Тож наявність у полум'ї заряджених частинок в досить великих (порівняно з рівноважною) концентраціях і обумовила пропозицію щодо можливості впливу електричним полем на процес горіння за рахунок його локальної дії на присутні у полум'ї заряджені компоненти.

В принципі, зазначений електрофізичний вплив може бути здійснено двома шляхами: накладанням на полум'я електричних, магнітних і комбінованих полів, чи введенням в нього заряджених частинок ззовні. Тож у роботі [100] розглянуті різні можливі механізми іоноутворення в полум'ї й доведено, що саме механізм хеміонізації відповідальний за високу концентрацію іонів в ньому.

У процесах горіння частинки зазнають хімічне перегрупування, при якому звільняється така кількість енергії, яка достатня для іонізації одного з продуктів реакції.

Роботи [101 - 104] присвячені підвищенню конвективної тепловіддачі електричним полем за рахунок іонного вітру, який викликаний направленим рухом іонізованих частинок шляхом впливу на них силових ліній поля.

Зробивши аналіз робіт різних авторів [96, 97, 100], які присвячені утворенню іонів в полум'ї, можна прийняти висунуту ними гіпотезу та вважати встановленим той факт, що максимум іонізації відповідає фронту полум'я, де протікають хімічні процеси, причому концентрація заряджених часток різко падає після виходу в зону продуктів згорання. І це при тому, що там ще зберігається досить велика температура.

У публікації [100] представлені варіанти накладання повздовжнього електричного поля на полум'я і можливості зміни його полярності. Тут у першому варіанті поле створюється негативно зарядженим пальником і позитивним електродом, встановленим у "хвості" полум'я. В результаті виникає рух позитивних іонів до пальника вниз і електронів вгору. У другому варіанті позитивно зарядженим є пальник, а негативно - електрод. В цьому випадку створюється протилежний потік електронів, а позитивні іони отримують додаткову кількість руху по ходу потоку [100].

За третім варіантом пальник має негативний заряд, отже, позитивні іони з об'єму полум'я будуть прямувати до пальника. У останньому ж варіанті буде спостерігатися зворотна картина - до позитивно зарядженого пальника з полум'я спрямується потік електронів [100]. Передбачається, що даний процес найбільш ефективно протікатиме при накладанні електричного поля за варіантом, коли потік електронів розганяється в напрямку до позитивно зарядженого пальника, тобто назустріч потоку горючої суміші.

Існує також припущення, що в установках та апаратах, які передбачають спрямовану передачу теплоти від продуктів згорання до теплоконтактної поверхні, у разі накладання на останню електричного потенціалу, тепловий потік щільніше прилягатиме до неї. Це обумовлюватиметься тим, що наелектризовані ще частки продуктів згорання наближатимуться до зазначеної поверхні і створюватимуть біля неї додаткову температурну зону, що сприятиме підвищенню швидкості її нагріву [100]. Тобто, механізм можливого впливу електричного поля на розповсюдження теплового потоку передбачає, що заряджені частинки,

набуваючи достатньої енергії поступального руху, в процесі непружних зіткнень між собою та з поверхнею нагріву створюватимуть нові активні центри у вигляді вільних атомів, радикалів, нових заряджених або збуджених часток. В результаті такої взаємодії і відбудеться інтенсифікація процесу теплообміну [16, 100, 102]. Але питання в тому, що кількість таких іонізованих часток в продуктах згорання надто мала, щоб створити суттєвий тепловий потік у необхідному напрямку для передачі ними теплоти поверхні, що нагрівається. Тому, аналізуючи наведене вище, можна зробити припущення, що штучне утворення теплових бар'єрів дозволить вирішити поставлену задачу. Тож зважаючи на те, що в більшості промислових печей в якості енергоресурсу використовується природний газ, вартість якого постійно зростає, подальші дослідження в даному напрямку безперечно є актуальними. Однією з причин можливості впливу

3.2 Математичне планування експериментів

На даний час існує чимало підходів для розв'язання складних наукових задач і, як правило, вони потребують експериментального підтвердження теоретичних досліджень. Проте, проведення експериментів пов'язане з чималими фінансовими витратами і часто вимагають тривалого часу. Наприклад, нагрів або охолодження енергетичної установки, зокрема, камерної печі є довготривалим процесом. Тому при підготовці до експериментів, доцільно використовувати математичний апарат, направлений на мінімізацію кількості експериментів без втрати якості і достовірності результатів. Саме за вирішення цієї задачі виступає математичне планування експериментів [105].

Згідно поставлених у даній роботі задач та проведених теоретичних досліджень науковий інтерес представляє визначення взаємозв'язків між температурою досліджуваного об'єкта (пластини, садка) та напруженістю прикладеного електричного поля, відстані об'єкта від другого електроду

(пальника), кутом нахилу об'єкта. Зауважимо, що саме ці фактори було обрано у якості предикторних змінних з метою перевірки теоретичних досліджень. Інші можливі фактори, такі як, зміна розташування пальників, конфігурація печі, тощо не розглядалися за причинами, зазначеними у попередніх розділах.

Слід зазначити, що при теоретичних дослідженнях для визначення предикторних змінних стикнулися з дилемою. З одного боку, як відомо, напруженість електричного поля функціонально залежить від напруги та відстані, причому лінійно. Інакше кажучи, при збільшенні відстані необхідно збільшити прикладену напругу, утримуючи необхідну напруженість. Тобто на перший погляд може здатися логічним виключити таку змінну, як відстань, тим самим спростивши поставлену задачу. Проте з іншого боку, такий підхід не є однозначним, оскільки рух продуктів згоряння є складним і частина теплової енергії втрачається ще на шляху до об'єкта. Таким чином, у даній задачі виникає необхідність враховувати такий фактор, як відстань між електродами.

При постановці задачі планування експериментів з математичної точки зору виходили з таких міркувань. Напруженість E впливає на тепломасообмін і згідно нашого припущення температура об'єкта збільшується при збільшенні E . Тому цей показник має бути, можливо максимальним $E \rightarrow \max$. Міжелектродна відстань H представляє інтерес з енергетичної точки зору, тобто при зменшенні відстані дозволяє зменшувати і прикладену напругу, а значить, й енерговитрати. Цей показник цікавий лише з теоретичної точки зору і необхідний для перевірки зроблених припущень щодо впливу електричних полів на розподіл температурних полів в печі. Тому при плануванні експериментів було прийнято рішення враховувати цей фактор. В реальних же умовах пальник («+» електрод) та садка («-» електрод) мають стаціонарне розміщення, тому регулювати напруження електричного поля можливо лише напругою. І, нарешті, третій показник, кут нахилу пластин α .

Таким чином, приходимо до завдання, коли розглядуваний процес оцінюється за трьома показниками. З погляду на теорію планування експерименту і не обмежуючи спільності розгляду, вважатимемо, що кожний з трьох показників необхідно отримати, якомога менше.

Позначимо через x вектор технологічних параметрів, а якість дотримання температурного режиму $F_i(x), i=\overline{1,3}$. У математичному плані переходимо до завдання векторної оптимізації

$$\begin{pmatrix} -F_1(x) \\ F_2(x) \\ F_3(x) \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad (3.18)$$

за умови $x \in X$, де X – область допустимих параметрів технологічного процесу нагріву об'єкта.

Необхідно відзначити, що функції $F_i(x), i=\overline{1,3}$ невідомі та їх значення при конкретному x можуть бути визначені тільки на підставі відповідного експерименту. Зауважимо, що множина $X_* \subseteq X$ є рішенням задачі векторної оптимізації (3.18), якщо будь-яка точка $x_* \in X_*$ є ефективною і будь-які дві точки з X_* при цьому незрівняні між собою за Парето. Значення множини X_* дозволяють в просторі функціоналів $F_i(x), i=\overline{1,3}$ побудувати деяку поверхню, що відображає взаємозв'язок між цими трьома показниками [106-108].

Хай $\tilde{F}_i(x), i=\overline{1,3}$ функції апроксимацій, тоді для них розглядається завдання:

$$\begin{pmatrix} -\tilde{F}_1(x) \\ \tilde{F}_2(x) \\ \tilde{F}_3(x) \end{pmatrix} \rightarrow \min \quad (3.19)$$

за умови $x \in X$. Вирішивши це завдання, отримуємо множину $\tilde{X}_* \subseteq X$, яка з певною точністю є наближенням множини X_* . Виконаний експеримент навколо початкової точки $x(0)$ дозволяє оцінити градієнти функцій $F_i(x)$ в даній точці і отримати конус напрямків зменшення всіх трьох функцій.

Вибравши напрямки з даного конуса, обчислюємо наступну точку планування експерименту за формулою:

$$x(1) = x(0) + g(0)t, \quad (3.20)$$

де $g(0)$ - напрямок з конуса убуття, вершина якого знаходиться в точці $x(0)$;

t - крок.

Таку процедуру необхідно продовжувати, поки не буде виконано співвідношення:

$$\alpha_1 g_1 + \alpha_2 g_2 + \alpha_3 g_3 = 0, \quad (3.21)$$

де $\alpha_i > 0$, g_i - градієнти, що оцінюються за результатами експерименту.

Після того, як буде виконано співвідношення (3.21) по всіх точках даного процесу виконуємо побудову функцій $\tilde{F}_i(x)$, а потім вирішуємо задачу (3.19).

Щодо невідомих функцій $F_i(x), i=\overline{1,3}$ припускаємо, що вони є квадратичними. Дане припущення дозволяє визначати мінімальне число експериментів. Для спрощення викладу теоретичного матеріалу покажемо технологічний процес, який визначається двома параметрами x_1 та x_2 . Тим більше, що з технологічної точки зору це не є порушенням, оскільки в реальних умовах садка займає горизонтальне положення і змінювати її просторову орієнтацію є недоцільним, тобто кут α прийме «нульове» положення і факторів залишиться два. Таким чином, в загальному виді функції $F_i(x)$ матимуть вигляд:

$$F(x_1, x_2) = a_{11}x_1^2 + 2a_{12}x_1x_2 + a_{22}x_2^2 + a_{10}x_1 + a_{02}x_2 + a_{00}$$

Звідки витікає, що число експериментів повинне бути не меншого шести, щоб можна було визначити коефіцієнти a_{ij} , $i, j = 0, 1, 2$.

У математичному експерименті приймаємо:

$$F_1(x_1, x_2) = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2)^2 + 100;$$

$$F_2(x_1, x_2) = (x_1 - 3)^2 + (x_2 - 2)^2 + 200;$$

$$F_3(x_1, x_2) = (x_1 - 3)^2 + (x_2 - 4)^2 + 300.$$

Вибираємо як початковий центр експерименту точку $x(0) = [5, 7]$. З кроком 0,5 будуємо повний факторний план експерименту навколо вибраної точки. Опускаючи проміжні розрахунки, отримані результати заносимо до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати розрахунків функціоналів

№ п/п	x_1	x_2	F_1	F_2	F_3
1	4,5	6,5	132,48	222,54	308,49
2	5,5	6,5	140,51	226,50	312,47
3	4,5	7,5	142,53	232,15	314,53
4	5,5	7,5	150,49	236,52	318,50

На підставі результатів даного експерименту обчислюємо градієнти функцій в точці $x(0)$.

$$g_1(x(0)) = \nabla F_1(x(0)) = (8; 10);$$

$$g_2(x(0)) = \nabla F_2(x(0)) = (4; 10);$$

$$g_3(x(0)) = \nabla F_3(x(0)) = (4; 6).$$

На рисунку 3.2 представлені отримані вектори.

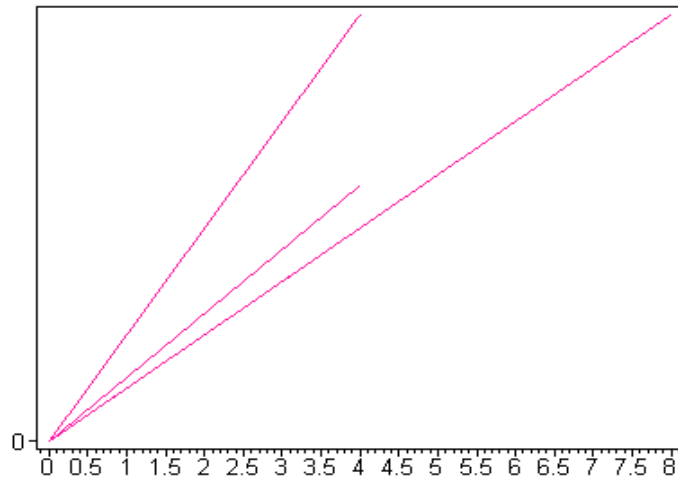


Рисунок 3.2 – Розташування градієнтів в початковій точці [108]

Як випливає із значень градієнтів і рис. 3.2 градієнти $g_1(x(0))$ та $g_2(x(0))$ визначають конус убуття всіх функцій F_1, F_2, F_3 .

Вибираємо напрям g переходу в новий центр експерименту таким чином:

$$g = -(g_1(x(0)) + g_2(x(0))) / 2 = (-6; 10).$$

У даному напрямі з кроком 0,5 обчислюємо нову точку центру експерименту $x(1)$.

$$x(1) = x(0) + 0.5g = (2; 2).$$

Навколо точки $x(1)$ виконуємо експеримент, і результати представляємо в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку функціоналів після уточнення

№ п/п	x_1	x_2	F_1	F_2	F_3
1	1,5	1,5	100,5	202,5	308,5
2	1,5	2,5	100,5	202,5	304,5
3	2,5	1,5	102,5	200,5	306,5
4	2,5	2,5	102,5	200,5	302,5

Значення градієнта в точці $x(1)$ за даними таблиці 3.2 дорівнюють

$$\begin{aligned}g_1(x(1)) &= (2; 0); \\g_2(x(1)) &= (-2; 0); \\g_3(x(1)) &= (-2; -4).\end{aligned}$$

На рисунку 3.3 представлено взаємне розташування даних векторів.

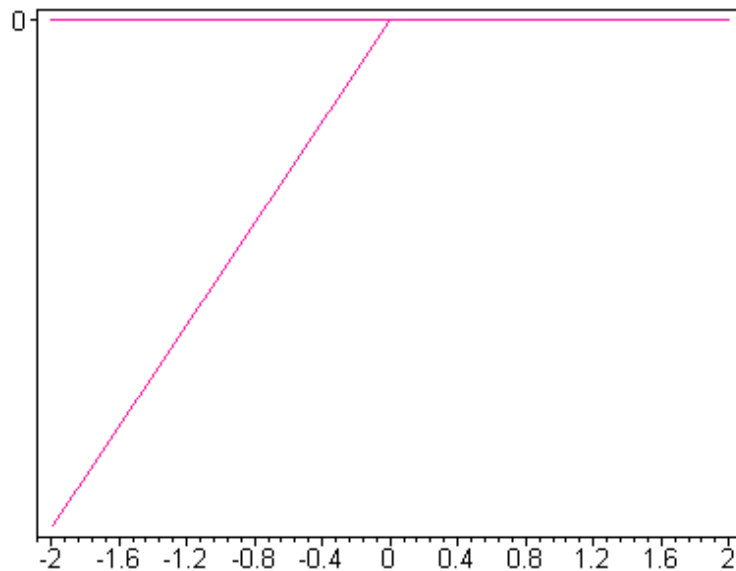


Рисунок 3.3 – Розташування градієнтів в наступній точці [108]

За результатами експериментів виконаємо апроксимацію у вигляді квадратичних форм.

На рисунках 3.4...3.6 дано графічне представлення результатів апроксимації.

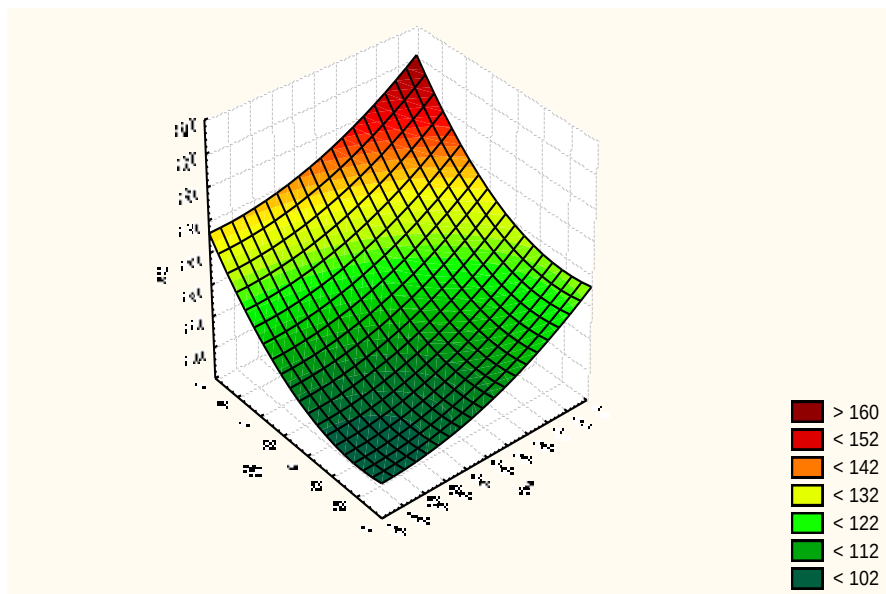


Рисунок 3.4 – Апроксимація функціонала F1

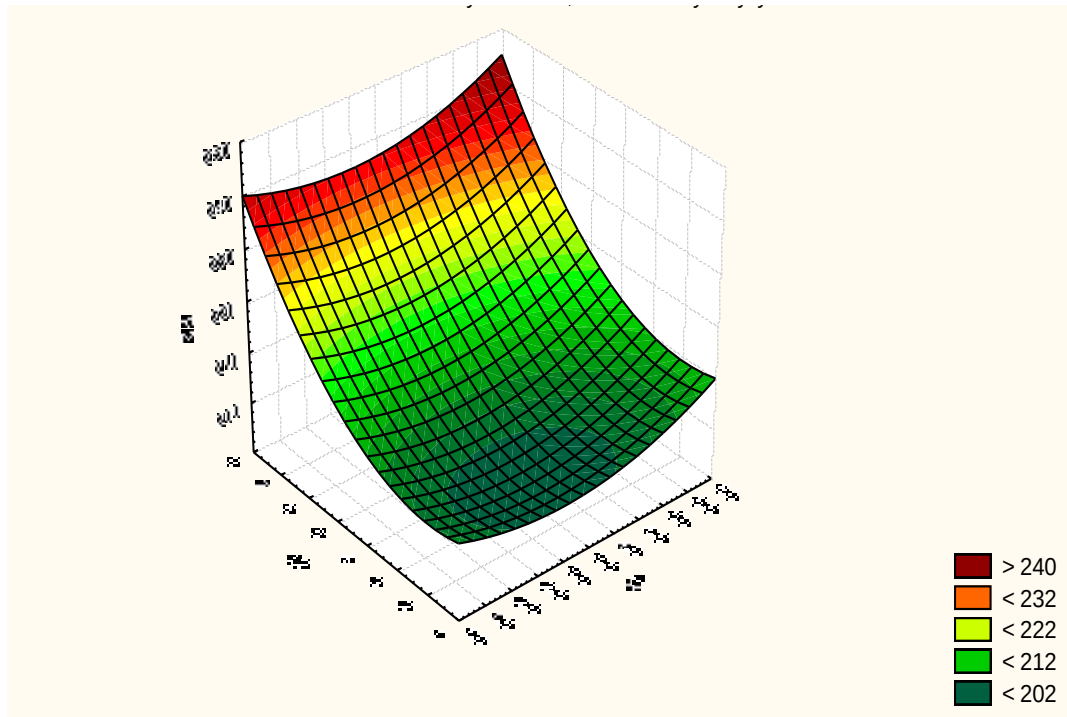


Рисунок 3.5 – Апроксимація функціонала F2

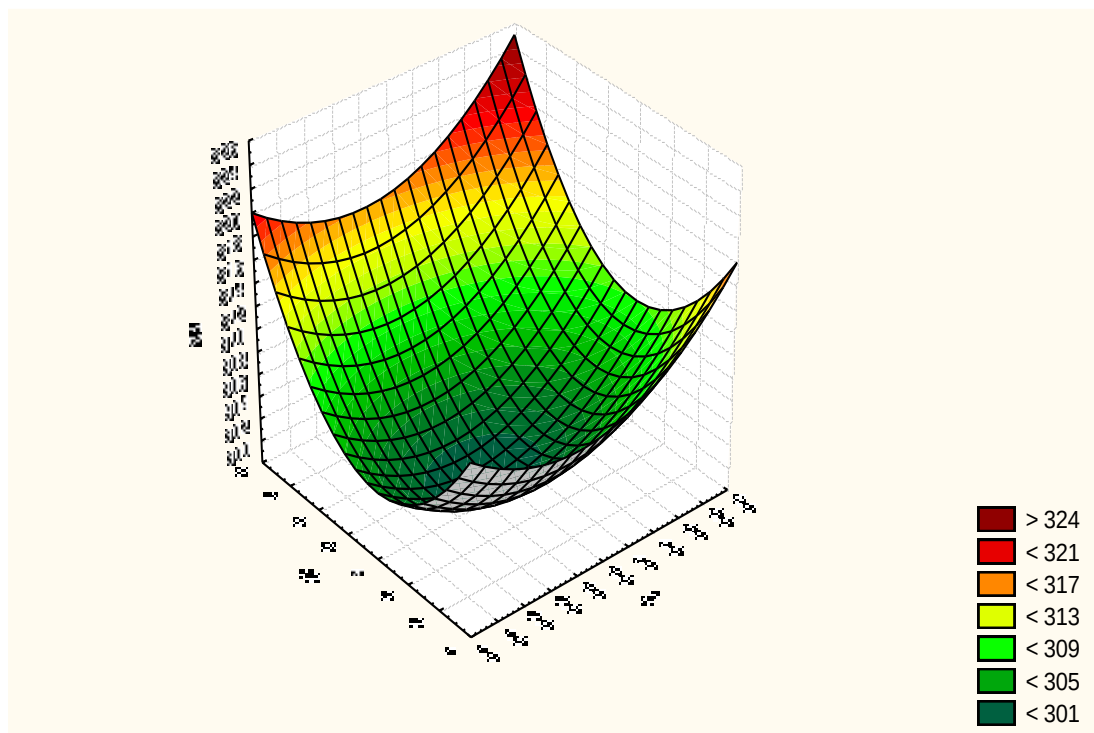


Рисунок 3.6 – Апроксимація функціонала F3

Використовуючи прийняті позначення, результати апроксимації можна записати у вигляді

$$\begin{aligned}\tilde{F}_1 &= 105 - 2x_1 - 4x_2 + x_1^2 + 4.6 \cdot 10^{-12} x_1 x_2 + x_2^2; \\ \tilde{F}_2 &= 213 - 6x_1 - 4x_2 + x_1^2 + 7.25 \cdot 10^{-13} x_1 x_2 + x_2^2; \\ \tilde{F}_3 &= 325 - 6x_1 - 8x_2 + x_1^2 + 6.6 \cdot 10^{-13} x_1 x_2 + x_2^2.\end{aligned}$$

Як впливає з даного представлення доданками з добутком $x_1 x_2$ можна нехтувати і для подальшого аналізу прийняти залежності

$$\begin{aligned}\tilde{F}_1 &= 105 - 2x_1 - 4x_2 + x_1^2 + x_2^2; \\ \tilde{F}_2 &= 213 - 6x_1 - 4x_2 + x_1^2 + x_2^2; \\ \tilde{F}_3 &= 325 - 6x_1 - 8x_2 + x_1^2 + x_2^2.\end{aligned}$$

По даних залежностях визначаємо межі області рішення задачі (3.19).

З рівняння

$$\nabla \tilde{F}_1 + \lambda \nabla \tilde{F}_2 = 0, \text{ при } \lambda \geq 0$$

отримуємо

$$\begin{pmatrix} -2 + 2x_1 \\ -4 + 2x_2 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -6 + 2x_1 \\ -4 + 2x_2 \end{pmatrix} = 0$$

звідки визначаємо параметричне завдання межі

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1+3\lambda}{1+\lambda} \\ x_2 = 2 \end{cases}$$

При $\lambda = 0$ маємо $x_1 = 1$, $x_2 = 2$, а при $\lambda \rightarrow \infty$ отримуємо $x_1 = 3$, $x_2 = 2$.

Таким чином, відрізок між цими точками складає частину межі множини рішення задачі (2).

Розглянувши рівняння:

$$\nabla \tilde{F}_1 + \lambda \nabla \tilde{F}_3 = 0$$

і рівняння

$$\nabla \tilde{F}_2 + \lambda \nabla \tilde{F}_3 = 0$$

знаходимо решту меж множини рішень задачі (3.19). Рішення задачі (3.19) представляє собою прямокутний трикутник, який є набором раціональних параметрів технологічного процесу, тобто будується область допустимих

параметрів, з якої необхідно вибирати значення параметрів при реалізації заданого технологічного процесу.

Тепер розглянемо ситуацію, коли значення $F_i, i=\overline{1,3}$, що визначають з експерименту містять адитивну похибку. Вважаємо, що вимірювання не містять систематичних помилок, а саму помилку моделюватимемо випадковою величиною з математичним очікуванням рівним нулю і має обмежену дисперсію. Отже, кожне значення результату експерименту можна представити у вигляді:

$$\tilde{F}_i = F_i + \xi_i, \quad i=\overline{1,3},$$

де ξ_i - похибка вимірювання, така що $M[\xi_i]=0$, $D[\xi_i]<\infty$.

Результати моделювання експерименту з урахуванням похибок представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати моделювання експерименту з урахуванням похибок

№ п/п	x_1	x_2	F_1	F_2	F_3
1	0,5	1	100,9	206,6	314,1
2	1	2	100	203,6	207,2
3	1	3	101,2	204,7	304,4
4	2	3	102,4	201,9	301,6
5	3	4	108,8	204,5	300
6	4	3	110,8	202,4	302,1
7	4	5	119,19	210,73	302,42
8	5	7	142,83	230,42	313,98

Виконавши квадратичну апроксимацію, отримуємо наступні залежності:

$$\tilde{F}_1 = 104.4 - 1.8x_1 - 3.8x_2 + 1.1x_1^2 - 0.03x_1x_2 + 1.02x_2^2;$$

$$\tilde{F}_2 = 212.1 - 5.6x_1 - 4x_2 + 0.9x_1^2 - 0.02x_1x_2 + 1.03x_2^2;$$

$$\tilde{F}_3 = 323.6 - 7x_1 - 7.7x_2 + 1.0x_1^2 - 0.02x_1x_2 + 1.0x_2^2.$$

Визначаємо межі області незрівняних варіантів по Парето, вирішуючи рівняння:

$$\nabla \tilde{F}_1 + t \nabla \tilde{F}_2 = 0, \text{ при } t \geq 0$$

$$\nabla \tilde{F}_1 + t \nabla \tilde{F}_3 = 0$$

$$\nabla \tilde{F}_2 + t \nabla \tilde{F}_3 = 0$$

отримуємо параметричне представлення меж рішення задачі векторної оптимізації:

$$\left\{ x_1 = \frac{116568t^2 + 152864t + 37053}{41199 + 81584t + 40372t^2}; x_2 = 2 \frac{38947 + 78751t + 39566t^2}{41199 + 81584t + 40372t^2} \right\}$$

$$\left\{ x_2 = 2 \frac{38947 + 117906t + 79136t^2}{41199 + 80792t + 39572t^2}; x_1 = \frac{117164t^2 + 158804t + 37053}{41199 + 80792t + 39572t^2}; \right\}$$

$$\left\{ x_1 = \frac{29291t^2 + 58535t + 29142}{10093 + 20010t + 9893t^2}; x_2 = \frac{19783 + 58607t + 39568t^2}{10093 + 20010t + 9893t^2} \right\}$$

Геометричним представленням даної області є трикутник (рис. 3.7):

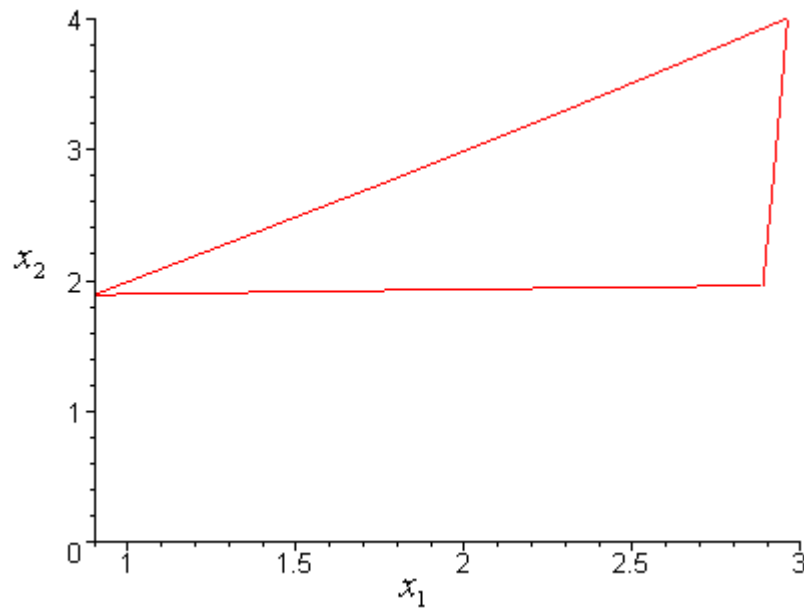


Рисунок 3.7 – Наближене представлення множини Парето [108]

Чисельні значення точного і наближеного рішення представлені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Чисельні значення точного і наближеного рішення

Точні значення		Наближені значення		Точні значення			Наближені значення		
x_1	x_2	x_1	x_2	F_1	F_2	F_3	$\tilde{F}_1$	$\tilde{F}_2$	$\tilde{F}_3$
1	2	0.89	1.89	101	205	309	100.8	204.69	308.80
3	2	2.89	1.96	103	201	305	103.01	200.96	304.96
3	4	2.96	3.99	109	203	301	108.79	203.09	300.58

Як впливає з таблиці 3.4, максимальна похибка не перевищує 3,8 %.

У загальному вигляді стійкість рішення квадратичної векторної оптимізації дозволяє побудувати межу через наближені значення. Дійсно, якщо наближені значення мають вигляд:

$$F_1 = a_{11}x_1^2 + 2a_{12}x_1x_2 + a_{22}x_2^2 + a_{10}x_1 + a_{02}x_2 + a_{00}$$

$$F_1 = b_{11}x_1^2 + 2b_{12}x_1x_2 + b_{22}x_2^2 + b_{10}x_1 + b_{02}x_2 + b_{00}$$

тоді параметричне завдання межі є:

$$x_2 = -\frac{1}{2} \left(-a_{12}a_{10} - a_{12}tb_{10} + a_{11}a_{02} + a_{02}tb_{11} + tb_{02}a_{11} + t^2b_{02}b_{11} - tb_{12}a_{10} - t^2b_{12}b_{10} \right) /$$

$$/ \left(a_{11}a_{22} + a_{22}tb_{11} + tb_{22}a_{11} + t^2b_{22}b_{11} - t^2b_{22}b_{11} - t^2b_{12}^2 - 2tb_{12}a_{12} - a_{12}^2 \right)$$

$$x_1 = \frac{1}{2} \left(-a_{10}a_{22} + a_{12}a_{02} + tb_{12}a_{02} + t^2b_{12}b_{02} + a_{12}tb_{02} - tb_{10}a_{22} - t^2b_{10}b_{22} - a_{10}tb_{22} \right) /$$

$$/ \left(a_{11}a_{22} + a_{22}tb_{11} + tb_{22}a_{11} + t^2b_{22}b_{11} - t^2b_{12}^2 - 2tb_{12}a_{12} - a_{12}^2 \right)$$

Це дозволяє, знаючи похибки коефіцієнтів, оцінити похибки побудови меж області рішення задачі векторної оптимізації в квадратичній формі.

На підставі представленого вище теоретичного матеріалу, у даній роботі було розвинено ці дослідження з планування експерименту. Так, підвищення ефективності експерименту можна досягти шляхом вибору оптимального плану, пред'являючи до нього низку додаткових вимог. Наприклад, можна ставити за мету забезпечення мінімально можливої кількості дослідів і при цьому забезпечуючи можливість створення найбільш простої, але адекватної моделі з найбільшою точністю всіх коефіцієнтів. Іншим підходом є вимога, щоб експериментальні дані були мінімально залежними від впливу систематичних неконтрольованих ефектів, і щоб точність очікуваних результатів була максимальна. Однак, всі ці вимоги в цілому суперечливі і одночасно задовольнити їх неможливо.

Як відомо, в теорії планування експерименту дуже часто на етапі постановки завдання об'єкт дослідження представляють у вигляді «чорного

ящика», що означає кібернетичну модель маловивчених об'єктів, в якій обрані незалежні змінні (вхідні) $x_1, x_2 \dots x_n$ впливають на кожну вихідну змінну $y_1, y_2 \dots y_n$ (відклику), при цьому математична модель - невідома. Набір змінних $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots x_n)$ будемо називати факторами, якими можна керувати (рис. 3.8).

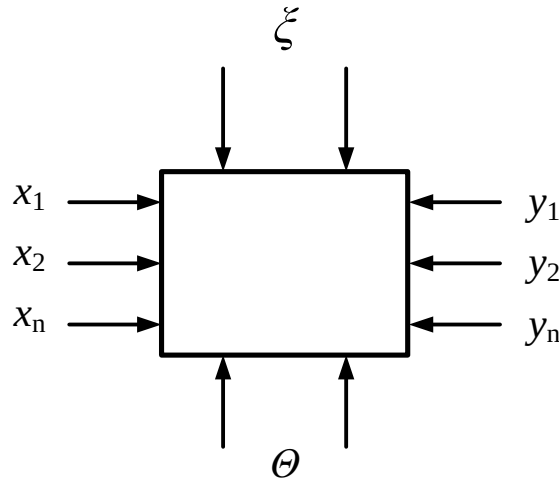


Рисунок 3.8 – Представлення кібернетичної моделі досліджуваних об'єктів

На рисунку 3.8 окрім зазначених позначень факторів x також показано:

$\bar{y} = (y_1, y_2, \dots y_n)$ - відклики;

$\bar{\xi} = (\xi_1, \xi_2, \dots \xi_n)$ - відомі фактори, але якими немає можливості керувати;

$\bar{\theta} = (\theta_1, \theta_2, \dots \theta_n)$ - невідомі фактори.

Таким чином, виникає задача визначення залежності $\bar{y} = f(\bar{x}, \bar{\xi}, \bar{\theta})$.

Для виконання експериментів необхідно задовольнити такі умови:

- 1) Результати спостережень відклику $\bar{y}$ - представляють незалежні нормально-розподілені випадкові величини, тобто на них впливають нормально розподілені перешкоди $\bar{\xi}$ з математичним очікуванням $M(\bar{\xi}) = 0$.
- 2) Дисперсії $\delta^2(y_i)$ рівні між собою, а це означає, що при проведенні багаторазових повторних спостережень має місце відтворюваність з

однаковою точністю. Також перед плануванням експерименту необхідно визначити, в якому класі мають бути функції.

Розглянемо лінійну модель:

$$y = \beta_0 + \beta x_1 + \beta_1 x_2 + \dots + \beta_n x_n \quad (3.22)$$

Необхідно визначити такий вектор $x^* \in X \subset E_n$, щоб відповідний відгук y_* був би max (min). У виразі (3.22) коефіцієнти β_i невідомі, що дещо ускладнює завдання, оскільки якби вони були задані, то стояло б завдання математичного програмування. Складемо матрицю планування експерименту (табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Матриця планування експерименту

	x_1	x_1	$\dots$	x_n	y
1	x_{11}	x_{12}	$\dots$	x_{1n}	y_1
2	x_{21}	x_{22}	$\dots$	x_{2n}	y_2
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
N	x_{N1}	x_{N2}	$\dots$	x_{Nn}	y_n

Нехай значення $\{X_{ij}\} i = 1, n ; j = 1, n$ обрані, тоді коефіцієнти β_k , $k = \overline{0, n}$, у виразі (3.22) визначимо за методом найменших квадратів так, щоб:

$$S^2 = \sum_{i=1}^N (y_i - \sum_{k=0}^n b_k x_{ik})^2 \quad (3.23)$$

де b_k – оцінка невідомого параметра моделі.

Введемо $x_0 = 1$ – фіктивну змінну. З необхідних умов випишемо систему:

$$\frac{\sigma S^2}{\sigma b_v} = -2 \sum_{i=1}^N \left(y_i - \sum_{k=0}^n b_k x_{ik} \right) X_{iv} = 0$$

$$\sum_{i=1}^N y_i x_{iv} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=0}^n b_k x_{ik} x_{iv}$$

$$\sum_{k=0}^n b_k \sum_{i=1}^N x_{ik} x_{iv} = \sum_{i=1}^N y_i x_{iv} \quad (3.24)$$

Таким чином приходимо до необхідності рішення системи лінійних алгебраїчних рівнянь (3.24). Доберемо x_{ik} таким чином, щоб рішення (3.24) було простішим. З цією метою зробимо низку припущень:

1) Відносно множини X .

Нехай X - це n - мірний паралелепіпед, тобто, якщо $x_i \in X$, то виконується нерівність:

$$\underline{x_i} \leq x_i \leq \overline{x_i}; \quad i = 1, n.$$

2) Переходимо до безрозмірних величин так, щоб область X перейшла в куб з довжиною ребра, що дорівнює 2.

За допомогою нормування отримаємо вираз:

$$Z_k = \frac{x_i - \frac{\overline{x_i} + \underline{x_i}}{2}}{\frac{\overline{x_i} - \underline{x_i}}{2}}$$

За таким нормуванням очевидно, всі $|Z_k| \leq 1$, $k = \overline{0, n}$. В цьому випадку всі фактори, що формують таблицю експерименту будуть безрозмірними і змінюватись від -1 до +1.

3) Вимагатимемо, щоб:

4)

$$a) \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{iv} = \begin{cases} 0 & k \neq v \\ c & k = v \end{cases}$$

тоді:

$$\sum_{i=1}^N b_v x_{i0}^2 = \sum_{i=1}^N y_i x_{iv}$$

$$b_i = \frac{\sum_i y_i x_{iv}}{\sum_i x_{iv}^2}$$

б) кожен фактор x_{iv} приймає би тільки +1 або -1, тоді коефіцієнти $\{b_v\}$ будемо визначати із умови:

$$b_v = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (3.25)$$

Алгоритм пошуку максимуму всередині області:

- 1) беремо деяку початкову точку Mo та покриваємо її квадратом;
- 2) плануємо експеримент;
- 3) виконуємо його та отримуємо значення відклику;
- 4) розраховуємо $\{b_v\}$ й на підставі значення $\{b_v\}$ визначаємо подальший напрямок;
- 5) процедура повторюється до тих пір, поки не знайдемо максимум всередині області X або поки не потрапимо на межу.

Наприклад, якщо побудувати повний факторний експеримент для двох факторів (табл. 3.6), то

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2$$

і якщо $x_0 = 1$, то:

$$y = \sum_{i=1}^2 \beta_i x_i$$

$$|x_i| \leq 1$$

Таблиця 3.6 – Матриця повного факторного експерименту

	x_0	x_1	x_2	y_i
1	1	1	1	y_1
2	1	-1	1	y_2
3	1	1	-1	y_3
4	1	-1	-1	y_4

Тоді коефіцієнт $\{b_k\}$ визначаємо, використовуючи (3.25):

$$b_0 = \frac{1}{4}(y_1 + y_2 + y_3 + y_4);$$

$$b_1 = \frac{1}{4}(y_1 - y_2 + y_3 - y_4);$$

$$b_2 = \frac{1}{4}(y_1 + y_2 - y_3 - y_4).$$

Тобто повний факторний експеримент реалізує всі можливі комбінації n незалежних керованих факторів. Число таких комбінацій $N = 2^n$. Щоб перевірити гіпотезу про адекватність моделі, достатньо оцінити:

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{m}{N - d} \sum_{i=1}^N (y_i - y(x_i))^2$$

де m – число факторів;

N – число експериментальних значень;

d – число членів апроксимуючого многочлена (значущих оцінок коефіцієнта моделі об'єкта).

3.3 Постановка задач і послідовність експериментальних досліджень щодо можливості керування тепловими потоками електричним полем

Виходячи із вищезазначеного, для реалізації поставленої мети слід вирішити низку першочергових задач, а саме:

- експериментально на фізичній установці перевірити можливість перерозподілу теплових потоків за допомогою створеного електричним способом теплового бар'єру з іонізованих часток, які присутні у продуктах горіння;

- дослідити, на якій відстані від пальника ще зберігаються іонізовані частки і зіставити її з реальними розмірами промислових печей;
- дослідити, як впливатимуть кути нахилу поверхні заготовок, що нагріваються, на перерозподіл теплового потоку у камері печі.

Послідовність проведення експериментальних досліджень така:

- 1) В нагрівальній камері створеної експериментальної установки на двох вибраних відстанях від пальника у напрямку руху відхідних газів розміщують пластини-електроди з можливістю змінювати їх положення і кут нахилу по відношенню до повздовжньої вісі камери.
- 2) В місцях розташування зазначених пластин створюють оглядові віконця, достатні за розміром для вимірювання їх температури безконтактним приладом (лазерним пірометром).
- 3) Фіксують положення верхньої пластини на одній з двох можливих відстаней від повздовжньої вісі камери.
- 4) Встановлюють кут нахилу пластини $\angle 0^\circ$ по відношенню до повздовжньої вісі камери.
- 5) Вимірюють температуру, яку мають пластини на початку досліджень.
- 6) Підключають обрані пластини-електроди до джерела постійної напруги, яка дозволяє змінювати останню у межах 0-1000 В.
- 7) Розігрівають камеру експериментальної установки протягом 15 хв., після чого вимірюють температуру пластин.
- 8) Охолоджують кладку установки до початкового стану і збільшують напругу на заздалегідь вибрану величину ΔU .
- 9) Повторюють пункти 7, 8 до досягнення максимальної напруги у 1000 В.
- 10) Змінюють положення пластин на друге з можливих і повторюють пп. 7- 9.
- 11) Послідовно збільшують нахил пластин на заздалегідь вибрану величину до досягнення значення $\angle 90^\circ$.

- 12) При кожному збільшенні кута нахилу пластин повторюють виконання пп. 7- 9.
- 13) Після відключення верхніх пластин від джерела постійної напруги до нього підключають іншу – більш віддалену (нижню) пару.
- 14) Повторюють пп. 3-12.
- 15) Після виконання пунктів 11, 12 джерело постійної напруги вимикають і охолоджують установку.

Зазначену вище послідовність дій щодо проведення експериментальних досліджень треба виконати за двома варіантами джерела напруги: на пальнику створюється полярність ”–“, а на пластині - полярність ”+“ і навпаки.

Тож при проведенні досліджень було обрано кілька параметрів, які можуть впливати на розподіл температури всередині установки, а саме:

E – напруженість електричного поля (В/м),

H – відстань між пластинами-електродами (м),

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

Також враховувалась і полярність поданої напруги. Діапазон змінення зазначених параметрів наведено у таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Діапазон можливих значень параметрів, що враховуються в експериментах

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

3.4 Експериментальна установка для проведення досліджень щодо впливу електричного поля на теплові потоки

Для проведення зазначених експериментальних досліджень щодо оцінки впливу електричного поля на розподіл теплових потоків у камері нагріву, було розроблено і створено спеціальну пічну установку [109], загальний вигляд якої показаний на рисунку 3.9, а принципову схему – на рисунку 3.10.

Енергетична установка має робочу камеру з внутрішніми розмірами $0,192 \times 0,192 \times 1,1$ м. Футеровка установки виконана з вогнетривкої цегли. Дистанційне вимірювання температури здійснювалося через спеціальні отвори з вогнетривкого скла. Максимальна теплова потужність пальника складала 77 кВт. Газовим лічильником Gallus 2000 G4 вимірювали витрату повітря та природного газу, при цьому витрата останнього складала $0,04 \text{ м}^3/\text{хв}$. Електрична установка дозволяла змінювати напругу у відповідності до необхідної напруженості в діапазоні $0 \dots 1000 \text{ В}$ [109].



Рисунок 3.9 – Загальний вигляд експериментальної установки

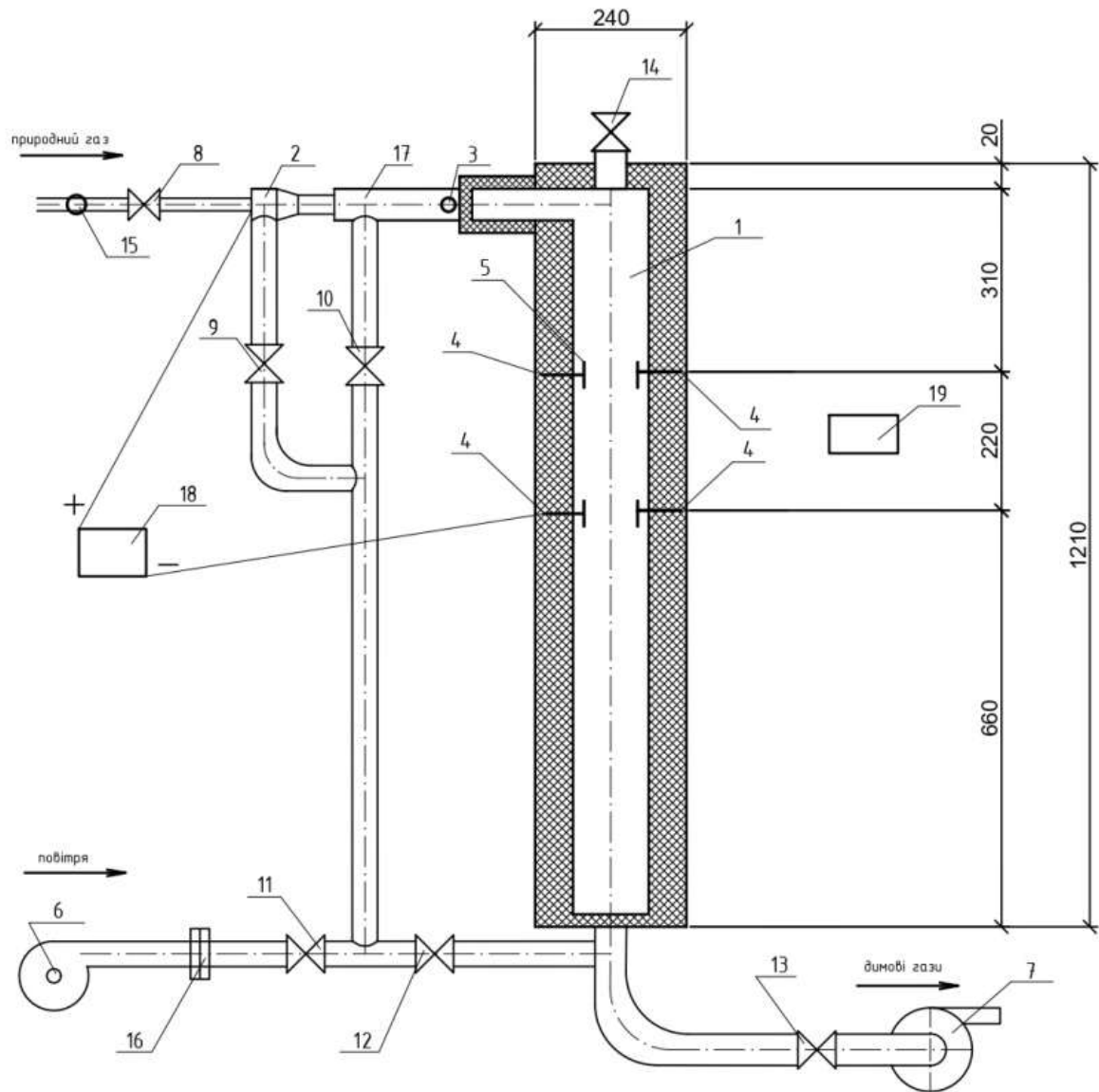


Рисунок 3.10 – Принципова схема експериментальної енергетичної установки:

1 – теплоізольована камера печі; 2 – пальник; 3 – електроіскровий запальник; 4 – електроди; 5 – рухлива пластина під напругою; 6 – повітродувка; 7 – димосос; 8 – 14 – арматура регулювання процесом горіння; 15 – газовий лічильник; 16 – вимірювальна діафрагма; 17 – додаткова камера; 18 – джерело електричної напруги; 19 – прилад для вимірювання температури, безконтактний

Схему та загальний вигляд електричного пристрою експериментальної установки, який використовувався при проведенні досліджень, показано на рисунках 3.11 та 3.12.

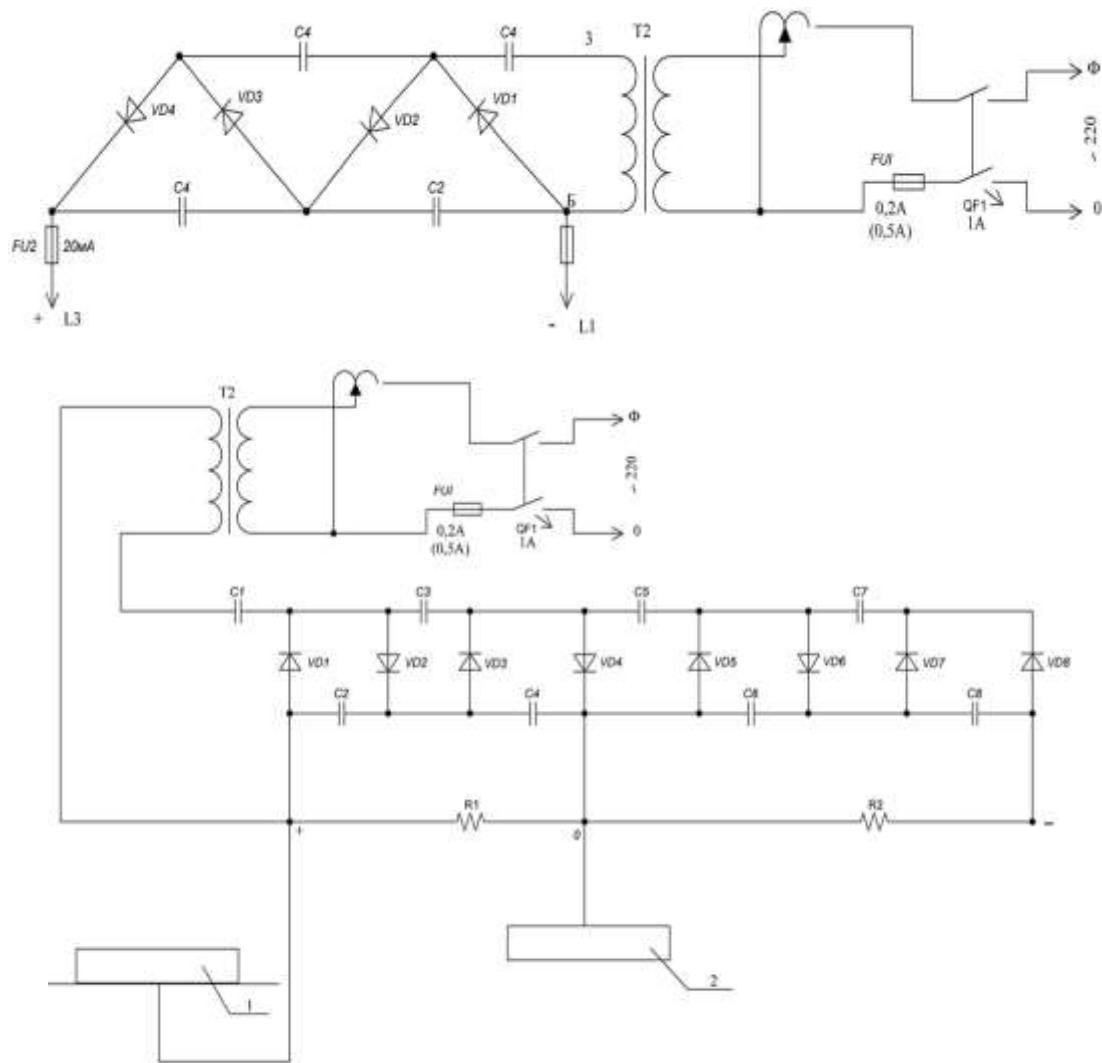


Рисунок 3.11 – Схема електричного пристрою для отримання постійної напруги з можливістю змінювати її величину у межах 0-1000 В:

1 – пальник; 2 – пластина-електрод

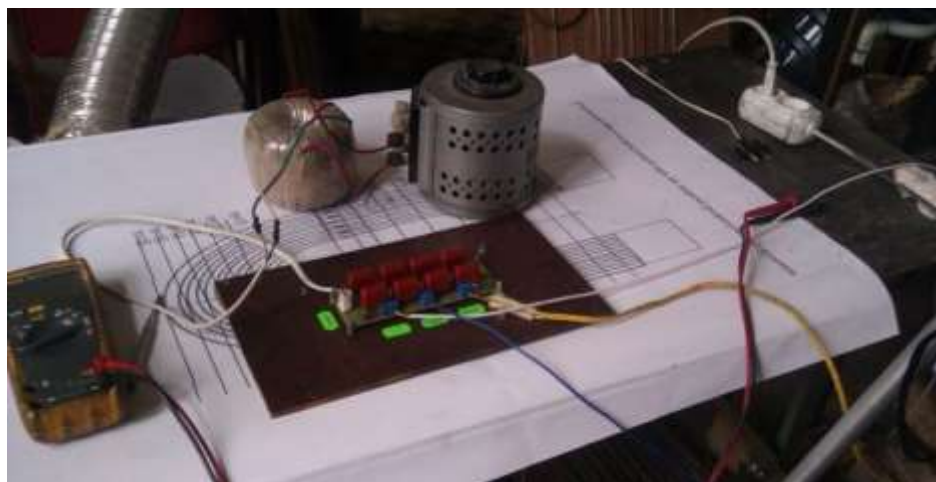


Рисунок 3.12 – Загальний вигляд електричного пристрою

3.5 Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень

В результаті проведення експерименту було набрано достатню кількість статистичних даних щодо залежності температури пластин, на які подавалась напруга, від величини та полярності останньої, а також визначено динаміку нагріву в конкретних точках пічного простору [109]. Це дозволило зробити висновки щодо можливості та ефективності керування тепловими потоками електричними полями. Результати дослідження представлено на рисунках 3.13 та 3.16.

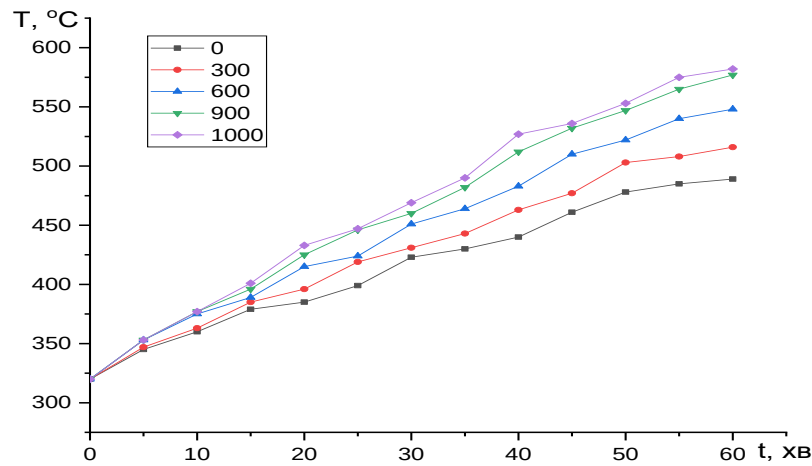


Рисунок 3.13 – Температура верхніх пластин.
Напруга на верхніх пластинах

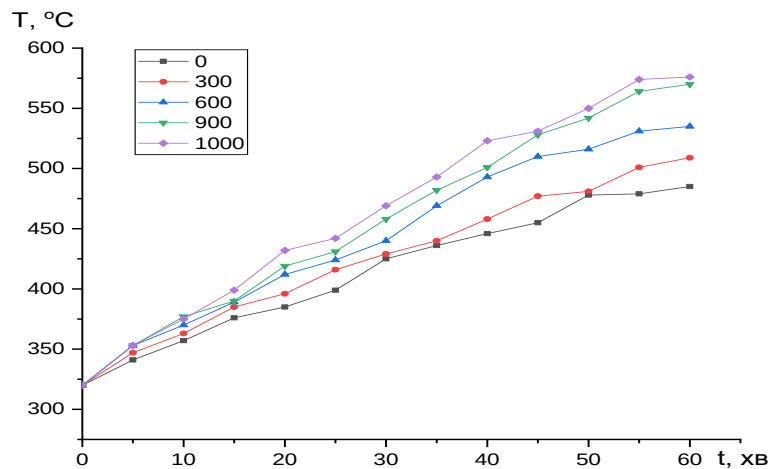


Рисунок 3.14 – Температура нижніх пластин.
Напруга на верхніх пластинах

Як видно з наведених графіків, температури пластин зростають, але спостерігається різна динаміка їх нагріву у відповідності з величиною прикладеної напруги. На верхніх пластинах спостерігається дещо більший ефект (рис. 3.13). Це пояснюється тим, що за відсутності електричного поля повздовжня швидкість теплового потоку викликана лише аеродинамічною складовою і буде значною у верхній частині пічного простору, а з подальшим проходженням димових газів по камері печі вона зменшується.

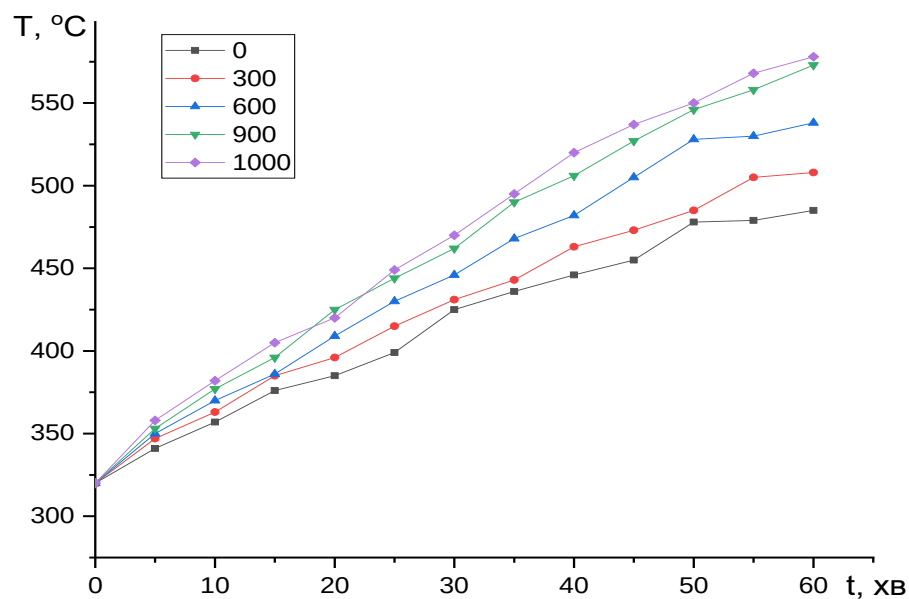


Рисунок 3.15 – Температура верхніх пластин.
Напруга на нижніх пластинах

Під дією потенціалу з'являється поперечна електрична сила, яка залежить від його величини і змушує заряджені частинки певного знаку відхилятися від прямолінійної траєкторії, перегороджуючи шлях для іншої частини потоку. А, отже, ефект від запропонованого способу керування тут буде більший. Можна припустити, що достатній ефект впливу електричного поля зберігається і на більшій відстані пластин від пальника за умови забезпечення заданої напруженості електричного поля, що дуже важливо для практичного застосування цього способу.

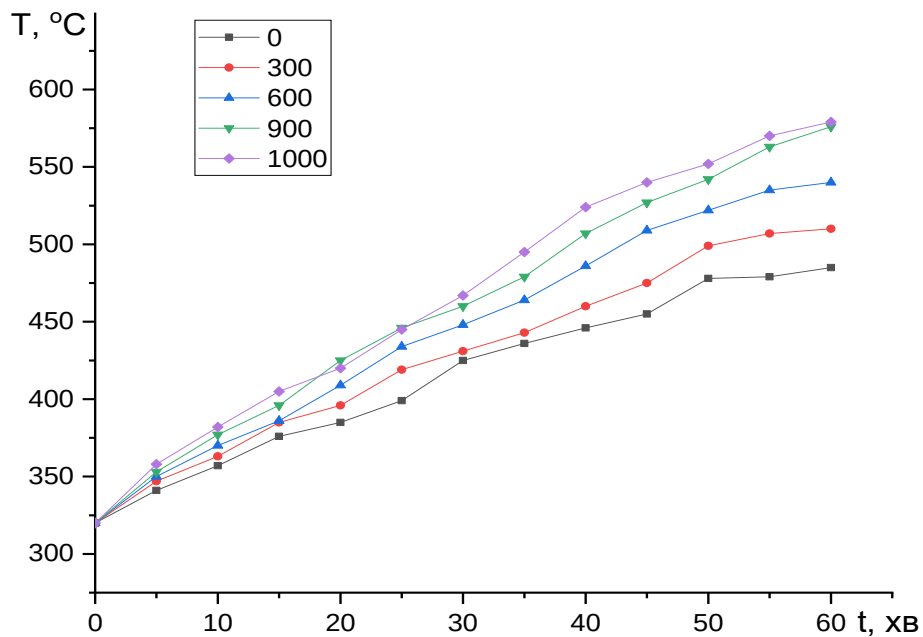


Рисунок 3.16 – Температура нижніх пластин.

Напруга на нижніх пластинах

В ході проведення експериментальних досліджень було підтверджено можливість отримувати очікуваний ефект, змінюючи як відстань між пластинами-електродами, так і напругу між ними, тобто напруженість електричного поля. Проте, з технологічної точки зору, змінювати відстань між електродами є недоцільним через додаткові ускладнення конструкції нагрівальної установки. Крім того, в ході виконання експериментів, при зміні відстані між електродами, було виявлено додаткові ефекти при русі продуктів згоряння, які ускладнювали аналіз отриманих результатів. Спираючись на зазначене, було прийнято рішення використовувати напругу як головний чинник регулювання напруженості електричного поля.

Таким чином, на фізичній моделі експериментально підтверджено можливість перерозподілу теплового потоку електричним способом [110]. Іонізовані частки, які присутні у продуктах згоряння створюють тепловий бар'єр основному тепловому потоку, і він щільніше прилягає до пластини, значно більше нагріваючи її. Кількість заряджених частинок продуктів

згорання у тепловому потоці на відстані 0,5...2 м від пальника є достатньою для отримання зазначеного теплового бар'єра.

3.6 Синтез математичної моделі пічної установки з електричним полем

Для отримання повного уявлення про вплив електричного поля на теплові процеси у камері нагрівальної установки розроблена математична модель, яка дозволяє визначити температуру нагрівання у заданому місці камери при різних значеннях електричних і технологічних параметрів [110 - 114]. Для цього були проведені відповідні дослідження з урахуванням специфіки поставленого завдання, зазначених у попередніх розділах. Для підвищення ефективності експерименту здійснено його планування з метою досягнення максимальної точності прогнозування при мінімальній кількості проведених операцій і збереженні статистичної достовірності результатів. Для розробки матриці дробного факторного експерименту типу 2^n за відомими методиками [115 - 118] було обрано 3 зазначених раніше параметри ($n = 3$), які можуть впливати на розподіл температури всередині установки.

За результатами проведеного у відповідності зі складеною задля цього матрицею експерименту одержана регресійна залежність:

$$T = f(E, H, \alpha) = b_0 + b_1 E + b_2 H + b_3 \alpha + b_4(E \cdot H) + b_5(E \cdot \alpha) + b_6(H \cdot \alpha) + b_7(E \cdot H \cdot \alpha), \quad (3.26)$$

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

У результаті математичної обробки результатів досліджень за допомогою програми STATISTICA 13 було отримано регресійну залежність з відповідними коефіцієнтами (3.27).

$$T = f(E, H, \alpha) = 496,1 + 0,089E - 34,8H + 0,02(E \cdot H) \quad (3.27)$$

Графічне зображення множини рішень отриманої регресійної залежності при зміні положення пластин H представлено на рисунку 3.17.

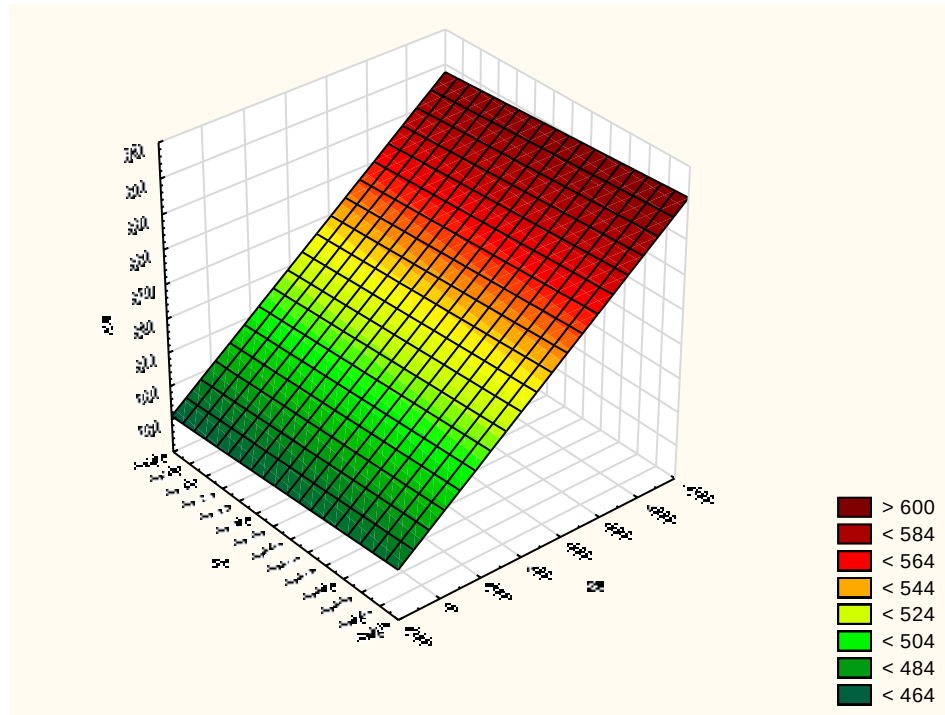


Рисунок 3.17 – Графічне зображення множини рішень регресійної залежності за умови зміни H

Графічне зображення множини рішень отриманої регресійної залежності при регулюванні кута нахилу пластин α представлено на рисунку 3.18.

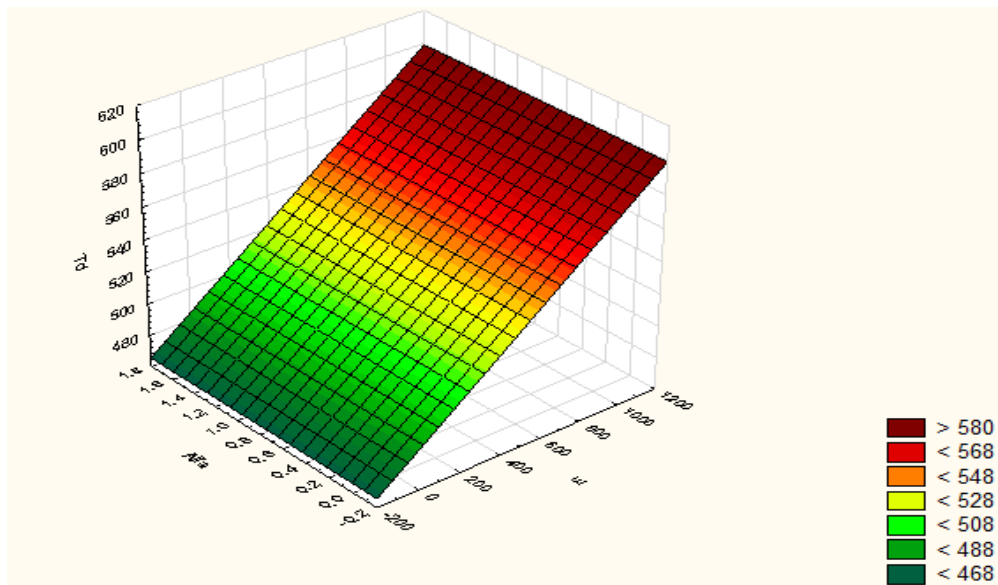


Рисунок 3.18 – Графічне зображення множини рішень регресійної залежності за умови зміни α

Як можна бачити, кут нахилу пластин на процеси розподілу температури у камері суттєво не впливають. Дане припущення зроблено за конкретних умов проведених експериментів.

Похибка прогнозування температури всередині нагрівальної установки за наявності електричного поля визначалась за допомогою отриманої математичної моделі згідно [115 - 118]. Відповідність прогнозованої температури пластини T_n дійсній T_∂ одержано у вигляді:

$$T_n = \alpha_0 + \alpha_1 T_\partial, \quad (3.28)$$

де $\alpha_0 = \overline{T_n} - r_{T_\partial T_n} \sigma_{T_n} / \sigma_{T_\partial} \overline{T_\partial}$; $\alpha_1 = r_{T_\partial T_n} \sigma_{T_n} / \sigma_{T_\partial}$.

Тут $\overline{T_n}, \overline{T_\partial}$ – середні значення прогнозованих і дійсних температур пластини;

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

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

α_0, α_1 - емпіричні коефіцієнти при розрахунку прогнозованих температур.

Зазначені величини обчислено за формулами:

$$r_{T_n T_\partial} = \frac{\sum_1^L \left(T_\partial - \overline{T_\partial} \right) \cdot \left(T_n - \overline{T_n} \right)}{L \cdot \sigma_{T_n T_\partial}}; \quad (3.29)$$

$$\sigma_{T_\partial} = \sqrt{\sum_1^L \left(T_\partial - \overline{T_\partial} \right)^2 / (L-1)}; \quad (3.30)$$

$$\sigma_{T_n} = \sqrt{\sum_1^L \left(T_n - \overline{T_n} \right)^2 / (L-1)}, \quad (3.31)$$

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

Середньоквадратична абсолютна похибка вимірів визначалася як:

$$\Delta T_n = t_p \sigma_{T_n}^*, \quad (3.32)$$

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

$$\sigma_{T_n}^* = \sqrt{\sum_1^L (T_n - T_n^*)^2 / (L-1)}. \quad (3.33)$$

У результаті середньоквадратична відносна похибка прогнозу визначена в такий спосіб:

$$\delta_{T_n} = |\Delta T_n| / T_{n\max} \cdot 100\%, \quad (3.34)$$

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

У результаті перевірки математичної моделі камерної печі підтверджена її адекватність реальному процесу. Середньостатистична відносна похибка прогнозу не перевищила 4%. Наявність отриманої регресійної залежності дозволяє більш ефективно визначати доцільну напруженість електричного поля в камері печі.

3.7 Висновки до розділу

Аналіз проведених досліджень показав, що продукти горіння палива дійсно іонізуються та мають позитивно й негативно заряджені складові, на основі чого була висунута та підтверджена гіпотеза, що за рахунок створення електричного поля у камері печі залишки іонізованих часток продуктів горіння у пічних газах будуть рухатися за напрямом прикладеного

потенціалу і створювати тепловий бар'єр основному потоку безпосередньо у зазначеному місці камери.

Тож експериментально на фізичний моделі підтверджено можливість перерозподілу теплового потоку у камері нагрівальної установки електричним способом, завдяки чому щільність зазначеного потоку є більшою у місці розташування заготовок (пластин), що нагріваються.

У якості висновків щодо проведених досліджень можна зазначити наступне:

1. На відстані 0,53 м від пальника зберігається достатня кількість заряджених частинок задля створення електричним способом теплового бар'єра потоку відхідних газів печі.
2. Перерозподіл температури поблизу заготовок за рахунок створення теплових бар'єрів шляхом застосування електричних полів дозволяє підвищити її температуру майже на 8 % у порівнянні зі звичайним нагрівом.
3. Керувати процесом нагрівання металевих виробів у камерній печі можна шляхом зміни напруги на пластині, що знаходиться поруч з садкою.
4. В ході теоретичних досліджень зроблено припущення, що кут нахилу пластин на очікуваний ефект суттєво не впливає. Дане ствердження дозволяє спростити розробку регресійної залежності. З іншого боку, проведені експерименти підтвердили, що кут нахилу пластин дійсно на процеси розподілу температури у камері не має суттєвого значення. Можливо це пов'язано з обмеженням допустимих розмірів дослідних пластин.
5. Зазначене керування електричним полем у печі доцільно здійснювати на основі використання отриманої регресійної залежності, приклад і матриця для отримання якої наведені у цьому розділі.

РОЗДІЛ 4 ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ ВПЛИВУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ НА ТЕМПЕРАТУРНЕ ПОЛЕ ГАЗІВ У КАМЕРНІЙ ПЕЧІ

4.1 Загальна характеристика підприємства і об'єкта досліджень

На сьогодні ТОВ «Запорізький титано - магнієвий комбінат» (рисунок 4.1) єдиний виробник титанової губки в Європі, а його нова продукція – титан глибокої переробки, що відкриває для підприємства нові ринки збуту в Європі та Азії. Титанові злитки, а також сляби (злитки прямокутного перерізу) широко застосовуються у якості конструкційного матеріалу в атомній енергетиці, хімічному машинобудуванні, суднобудуванні та в багатьох інших промислових галузях. Запустивши промислове виробництво нової продукції, титановий бізнес Group DF вийшов на новий перспективний ринок. При проектній потужності 20 тис. тонн, підприємство поки що випускає не більше 10 тис. тонн титанової губки на рік. Це пов'язано з фізично застарілим обладнанням та з високою часткою вартості природного газу та електроенергії в структурі собівартості продукції [119]. Якість продукції ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» гарантується сертифікованою системою управління якістю відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 9001, EN 9100, ISO 14001, ISO 50001 та ISO 45001.

ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» потужний і високотехнологічний комбінат, який має стратегічне значення для економічної безпеки держави. Комбінат постійно шукає шляхи для підвищення ефективності виробництва, проводить технічну модернізацію, удосконалює технологію виробництва, ефективно працює над підвищенням якості продукції [119].



Рисунок 4.1 – ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат»

Основна продукція комбінату має доволі широкий спектр [119]:

- титан губчастий;
- тетрахлорид титану очищений;
- виливки титанові фасонні;
- титанові злитки;
- феротитан;
- шлак титановий;
- гідрид титану губчастого;
- діоксид германію;
- германій полікристаличний зоноочищений;
- литі кремнієві вироби;
- вироби з германію для оптичних деталей.

Процес виробництва титанового шлаку полягає в відновлювальній руднотермічній електричній плавці ільменітового концентрату з вуглецевим відновником – вугіллям, коксом або антрацитом. В результаті отримують титан-губчасту продукцію.

Кошторис витрат на виробництво загалом по підприємству наведений у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Кошторис витрат на виробництво ТОВ «ЗТМК»

Стаття кошторису	2017 р.	2018 р.	Питома вага, %
1	2	3	4
Сировина та основні матеріали	156398	161125	15,3
Допоміжні матеріали	100706	97854	9,3
Паливо	63854	51340	4,9
Енерговитрати	110639	427559	40,7
у т.ч. електроенергія	101144	423267	40,3
Фонд оплати праці	257974	196939	18,7
Відрахування на соцпотреби	94993	69790	6,6
Амортизація основних фондів	28775	28151	2,7
Роботи та послуги виробничого характеру	5832	4986	0,5
Інші витрати	11530	12958	1,2
Всього витрат	830701	1050702	100

З таблиці 4.1 видно, що дане виробництво вважається енергоємним, оскільки на споживання паливно-енергетичних ресурсів припадає 45,6 %, а на споживання електроенергії – 40,3 % виробничих витрат.

Завданням ливарного виробництва підприємства є виготовлення з металу виливків, які мають різноманітні форми і призначені для використання в різних сферах. Для отримання цих виробів використовуються різні види енергоресурсів.

Основні енергоносії, які використовуються у ливарному виробництві:

- природний газ;
- електрична енергія;
- стиснене повітря;
- питна та технічна вода.

Структура собівартості 1 тони виробів представлена на рисунку 4.2.

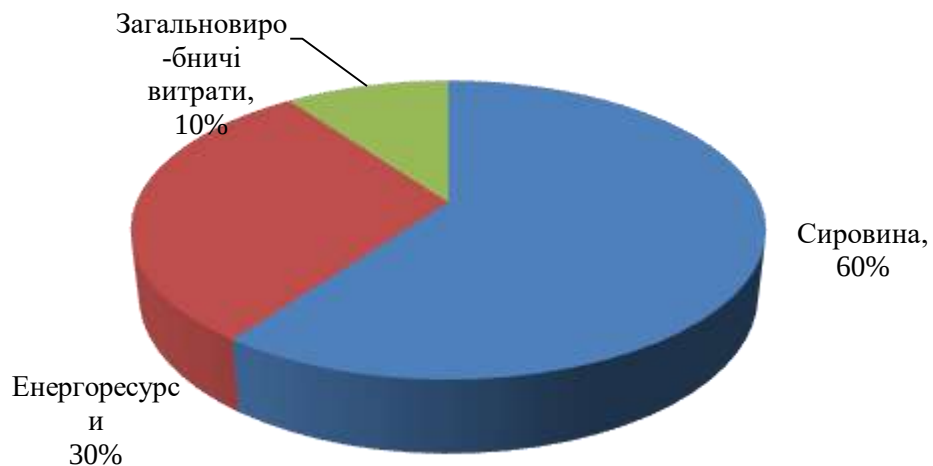


Рисунок 4.2 – Структура собівартості 1 тони виробів

Структура енергоресурсів для виготовлення 1 тони виливок представлена на рисунку 4.3.

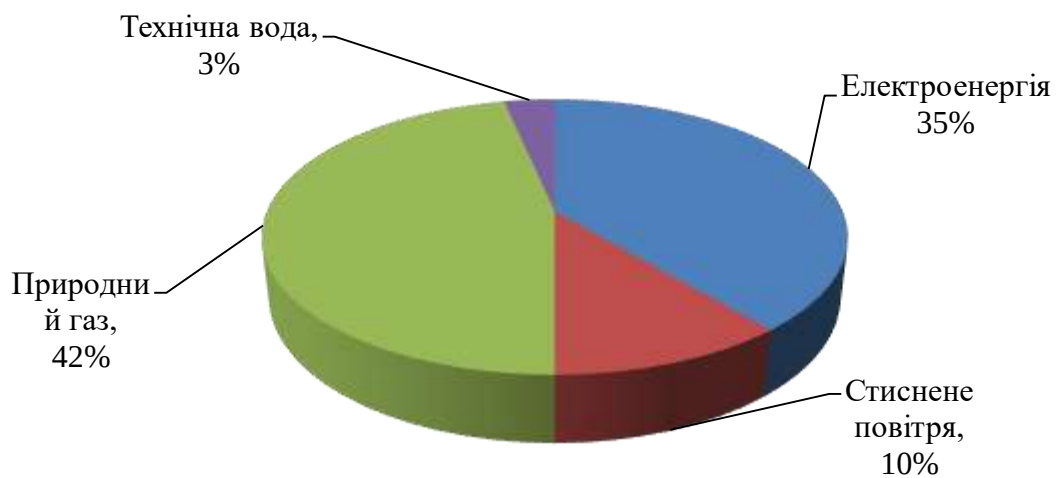


Рисунок 4.3 – Структура енергоресурсів для виготовлення 1 тони виливок

Спеціалізована на термічній обробці піч повинна забезпечувати заданий технологією температурно-часовий режим обробки виробів і їхню високу рівномірність нагріву. При нагріванні як злитків, так і заготовок абсолютне значення перепаду температури за обсягом садки металу може бути 50...70 °С, а у нагрівальних печах розкид температур сягає 80...100 °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 4.4 зображено габаритні розміри такої печі, а на рисунку 4.5 – 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 заготовок в умовах розглядуваного підприємства максимальне допустиме відхилення за температурою складає ± 40 °С. Але для особливих випадків або за вимогами замовника для отримання необхідної мікроструктури металу допустиме відхилення температури становить лише ± 20 °С.

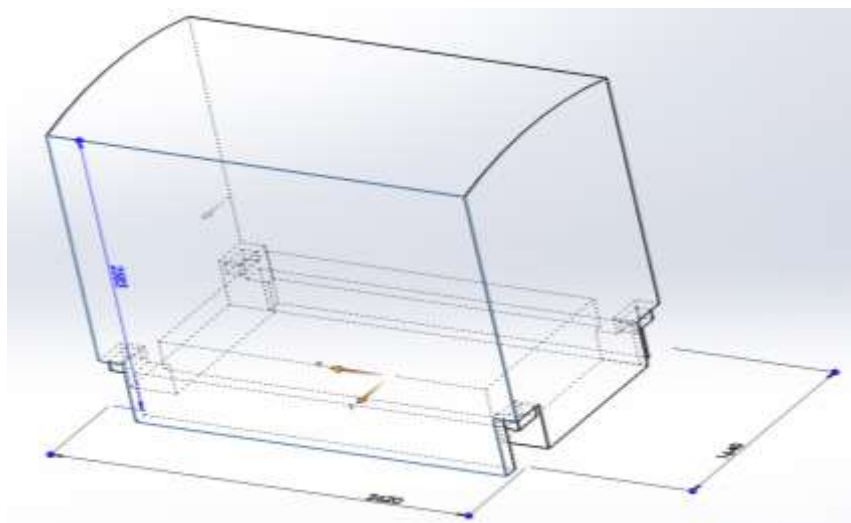


Рисунок 4.4 – Габаритні розміри камерної печі

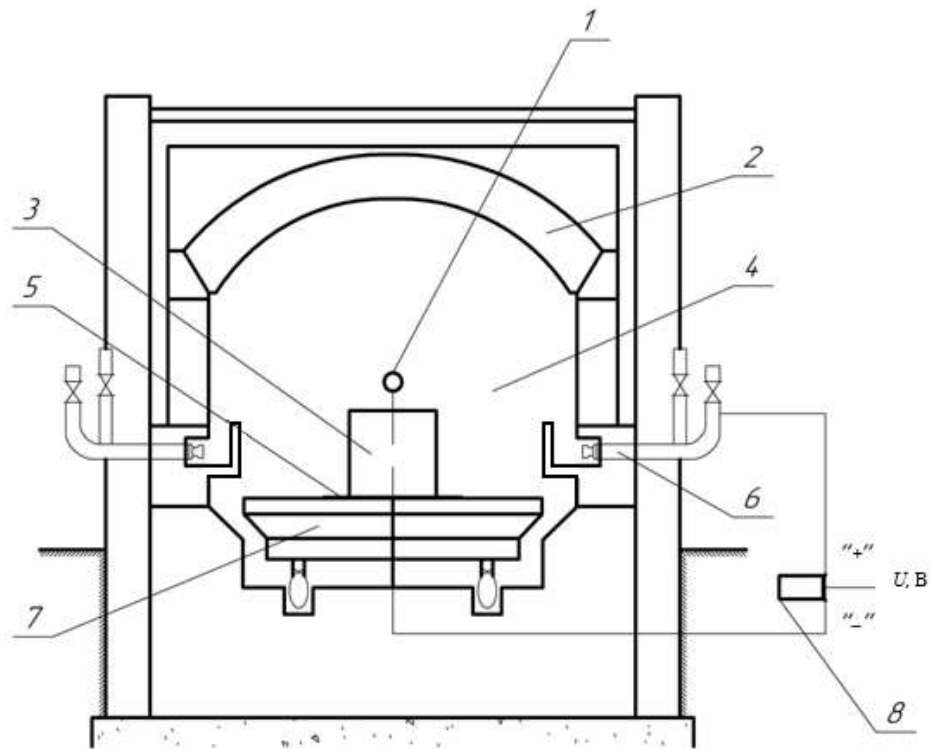


Рисунок 4.5 – Схема поперечного перерізу камерної печі:

- 1 – отвір для термопар, через який безконтактно вимірюється температура металу; 2 – склепіння; 3 – метал, що нагрівається; 4 – робочий простір;
 5 – електропровідна пластина; 6 – пальник;
 7 – викатний під; 8 – електрична частина

Загальний вигляд камерної печі з викатним подом представлено на рисунках 4.6 та 4.7.



Рисунок 4.6 – Загальний вигляд відкритої камерної печі з подом



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд камерної печі під час відпалу металу

Результати теплотехнічних випробувань камерної печі наведені у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Основні показники, що характеризують камерну піч з викатним подом

Назва параметра	Величина
1	2
Паливо (природний газ)	
Низька теплота згоряння природного газу, ккал/м ³	8091
Витрати природного газу (за зворотнім балансом), м ³ /год	81,62
Барометричний тиск, мм.рт.ст.	754,3
Тиск газу в колекторі, кгс/см ²	0,3+0,4

Продовження таблиці 4.2

1	2
Тиск газу перед пальниками, кгс/см ²	0,2+0,4
Щільність газу, кг/м ³	0,691
Повітря	
Температура повітря на спалювання, °С	40
Теоретично необхідна кількість повітря для спалювання 1 м ³ газу, м ³ /м ³	9,64
Теплообмін	
Теплоємність повітря, ккал/(м ³ ·°С)	0,31
Продуктивність печі, кг/год	910
Угар металу, кг/кг	0,02
Теплоємність металу, ккал/(кг·°С)	0,16
Початкова температура металу, °С	25
Кінцева температура металу, °С	925
Об'єм кладки, м ³	11,67
Середня щільність вогнетриву, кг/м ³	1900
Середня теплоємність кладки, ккал/кг·°С	0,223
Середня температура шару шамоту, °С	450
Площа бокових поверхонь, м ²	23,78
Площа передньої та задньої поверхні, м ²	22,34
Площа склепіння, м ²	15,79
Питомий тепловий потік бокових поверхонь, ккал/(м ² ·год)	651

Продовження таблиці 4.2

1	2
Питомий тепловий потік передньої та задньої поверхні, ккал/(м ² ·год)	850
Питомий тепловий потік склепіння, ккал/м ² ·год	1390
Тепло, витрачене на нагрів транспортувальних пристроїв, Гкал/год	21344
Маса транспортувальних пристроїв, кг/год	186
Середня теплоємність транспортувальних пристроїв, ккал/кг·°С	0,17
Температура транспортувальних пристроїв початкова, °С	25
Температура транспортувальних пристроїв кінцева, °С	700
Втрати тепла з відхідними газами, ккал/год	267163
Об'єм відхідних газів, м ³ /м ³	24,25
Середня теплоємність відхідних газів, ккал/(м ³ ·°С)	0,34
Температура відхідних газів, °С	397
Невраховані втрати тепла, ккал/год	73551
Коефіцієнт використання палива, %	60,94
Коефіцієнт корисної дії, %	18,50
Питома витрата палива, м ³ /кг	0,0897
Питома витрата умовного палива, кг.у.п./кг	0,1037
Хімічний склад відхідних газів	
- вуглекислий газ, %	4,6
- кисень, %	12,8
- оксид азоту, ppm	43

Продовження таблиці 4.2

1	2
-оксид вуглецю, ppm	31
Коефіцієнт витрати палива	2,41
Екологія	
Фактична концентрація шкідливих речовин:	
- оксид азоту, мг/м ³	88,15
- оксид вуглецю, мг/м ³	38,75
Масова концентрація шкідливих речовин, приведена до $\alpha = 1$:	
- оксиди азоту, мг/м ³	220,7
- оксиди вуглецю, мг/м ³	96,9
Питомий викид речовин на одиницю виробленої продукції:	
- оксид азоту, г/кг	0,209
- оксид вуглецю, г/кг	0,092
Питомий викид шкідливих речовин на 1 тис. м ³ використаного газу:	
- оксид азоту, кг/тис. м ³	2,318
- оксид вуглецю, кг/тис. м ³	1,017
Секундний викид шкідливих речовин:	
- оксид азоту, г/с	0,0528
- оксид вуглецю, г/с	0,0232

На рисунку 4.8 показано схему замірів вимірюваних параметрів камерної печі відповідними приладами при проведенні натурних експериментів.

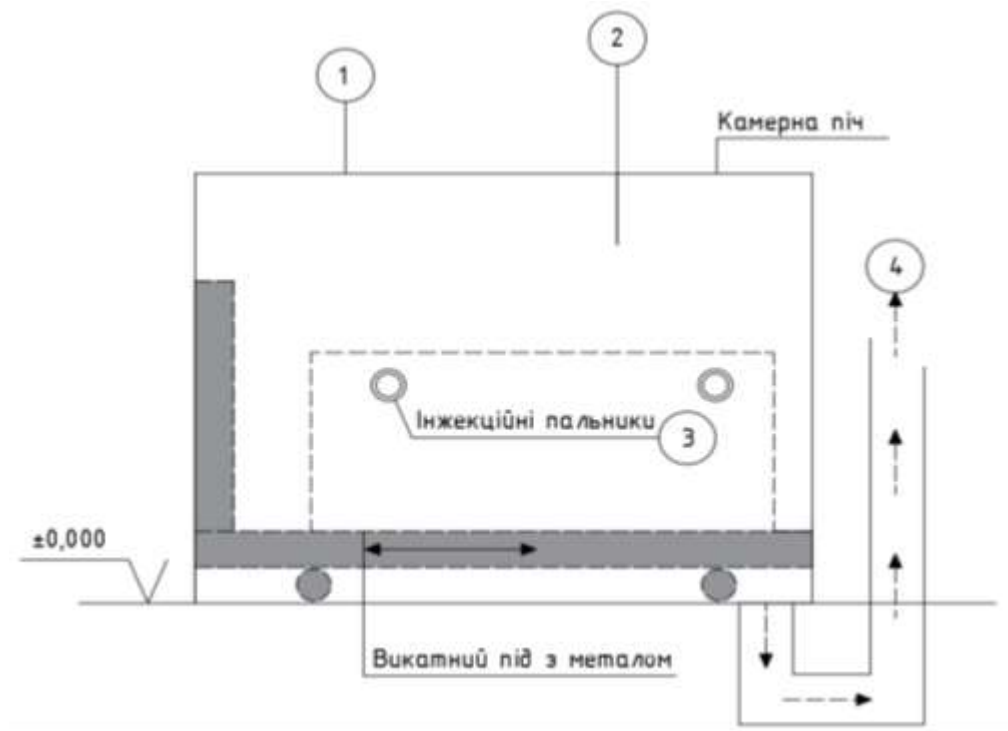


Рисунок 4.8 – Схема точок замірів робочих параметрів камерної печі:

1 - температура зовнішньої поверхні; 2 - температура в печі;
 3 - тиск; температура природного газу перед пальниками; 4 - хімічний склад
 відхідних газів (CO_2 , O_2 , CO , NO_x), коефіцієнт витрат повітря, температура
 відхідних газів

Перелік вимірювальних приладів, які використовувались при проведенні теплотехнічних випробувань камерної печі на ТОВ "Запорізький титано - магнісвий комбінат" наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Перелік приладів для теплотехнічних випробувань камерної печі

№ п/п	Найменування	Найменування приладу	Межа вимірювання	Клас точності
1	2	3	4	5
1	Тиск газу в колекторі, перед піччю	МПЗ	0...1 кгс/см ²	1,5
2	Тиск газу в колекторі, перед пальниками	МПЗ	0...1 кгс/см ²	1,5

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5
3	Розрядження у печі	ТНМП-52	-12,5...12,5 кгс/м ²	2,5
4	Температура у печі	Ш4500 Ш4500	0...1300°C 0...1100°C	0,5
5	Температура поверхні агрегату	ТТ	0...100°C	1°C
6	Температура повітря на горіння	SPECTRA 1600 GL TT	0...650°C 0...100°C	±1°C 1°C
7	Температура відхідних газів	SPECTRA 1600 GL	0...650°C	±1°C
8	Хімічний склад відхідних газів	SPECTRA 1600 GL	CO, 0...10000 ppm Nox, 0...2000 ppm O ₂ , 0...21% CO ₂ , 0...20%	±5% ±5% <0,2% ±0,3%

Результати розрахунку горіння природного газу на 100 м³ представлено у таблиці 4.4. Методика розрахунку ґрунтувалася на стехіометричних рівняннях горіння.

Таблиця 4.4 – Результати розрахунку горіння природного газу на 100 м³

Природний газ		Повітря, м ³			Продукти згорання, м ³				
Хім. склад газу	Об'єм, %	O ₂	N ₂	Всього	CO ₂	H ₂ O	O ₂	N ₂	Всього
CH ₄	96,97	193,94	O ₂ x 3,76	N ₂ + O ₂	96,97	193,94	-	з повітря + N ₂ газу	CO ₂ +H ₂ O+N ₂
C ₂ H ₆	1,39	4,87			2,78	4,17	-		
C ₂ H ₈	0,47	2,35			1,41	1,88	-		
C ₂ H ₁₀	0,16	1,04			0,64	0,8	-		
C ₂ H ₁₂	0,04	0,32			0,2	0,24	-		
N ₂	0,87	-			-	-	-	0,87	-
CO ₂	0,10	-			0,1	-	-	-	-
При α=1	1,00	202,52 21,00	761,48 79,00	964,00 100,00	102,1 9,60	201,03 18,90	-	762,35 71,50	1065,48 100,00
При α=2,41 Піч відпалу лиття	м ³	488,07 21,00	1835,2 79,00	2323,23 100,00	102,1 4,21	201,03 8,30	285,55 11,80	1836,03 75,70	2424,71 100,00

4.2 Аналіз енергоефективності камерної печі, що працює в умовах ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат»

Для виявлення причин низької енергоефективності камерної печі на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат», визначення основних втрат теплоти з його робочого простору та шляхів їх усунення розраховано тепловий баланс камерної печі, в якому враховані такі складові [121]:

$$Q_{\Gamma} + Q_{\text{в.ф.}} + Q_{\text{екз}} = Q_{\text{м}} + Q_{\text{ак}}^{\text{кл}} + Q_{\text{кл}} + Q_{\text{тр}} + Q_{\text{д}} + Q_{\text{неврах}}, \quad (4.1)$$

де Q_{Γ} – хімічне тепло палива, кДж;

$Q_{\text{в.ф.}}$ – тепло, яке вноситься повітрям, кДж;

$Q_{\text{екз}}$ – тепло екзотермічних реакцій окислення заліза, кДж;

$Q_{\text{м}}$ – витрати тепла на нагрів металу, кДж;

$Q_{\text{ак}}^{\text{кл}}$ – тепло, акумульоване кладкою камерної печі, кДж;

$Q_{\text{кл}}$ – втрати тепла теплопровідністю через кладку камерної печі, кДж;

$Q_{\text{тр}}$ – втрати тепла на нагрів транспортуючих пристроїв, кДж;

$Q_{\text{д}}$ – тепло, що втрачається з продуктами згоряння, кДж;

$Q_{\text{неврах}}$ – невраховані теплові втрати, кДж.

Розрахунок теплового балансу камерної печі з викатним подом виконано на основі даних таблиці 4.2 [120 - 122]. Результати отриманих даних зведені в таблицю 4.5.

Виконаний розрахунок теплового балансу камерної нагрівальної печі, що працює в умовах ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат», підтверджує її низьку енергоефективність переважно через великі втрати тепла з продуктами згорання [15].

У розділі 2 було проведено аналіз методів математичного моделювання у промислових печах. Для математичної постановки задачі управління напрямком і швидкістю пічних газів визначено, що найбільш доцільно використовувати RNG k-ε модель.

Таблиця 4.5 – Тепловий баланс камерної печі (без електричного поля)

Статті приходу теплоти	Величина,		Статті витрати теплоти	Величина,	
	кДж	%		кДж	%
Хімічна теплота палива	2764776	93,21	Витрати теплоти на нагрів металу	548612	18,51
Теплота, що вносить повітря	98431	3,32	Теплота, що акумульована кладкою печі	665476	22,43
Теплота екзотермічних реакцій	102865	3,47	Втрати теплоти теплопровідністю через кладку печі	236200	7,96
			Втрати теплоти на нагрівання транспортуючих пристроїв	89360	3,01
			Теплота, що втрачається з відхідними газами	1118504	37,71
			Невраховані теплові втрати	307920	10,38
Разом	2966072	100,0	Разом	2966072	100,0

Для більшої наглядності у відсотках результати теплового балансу представлені діаграмою на рисунку 4.9.

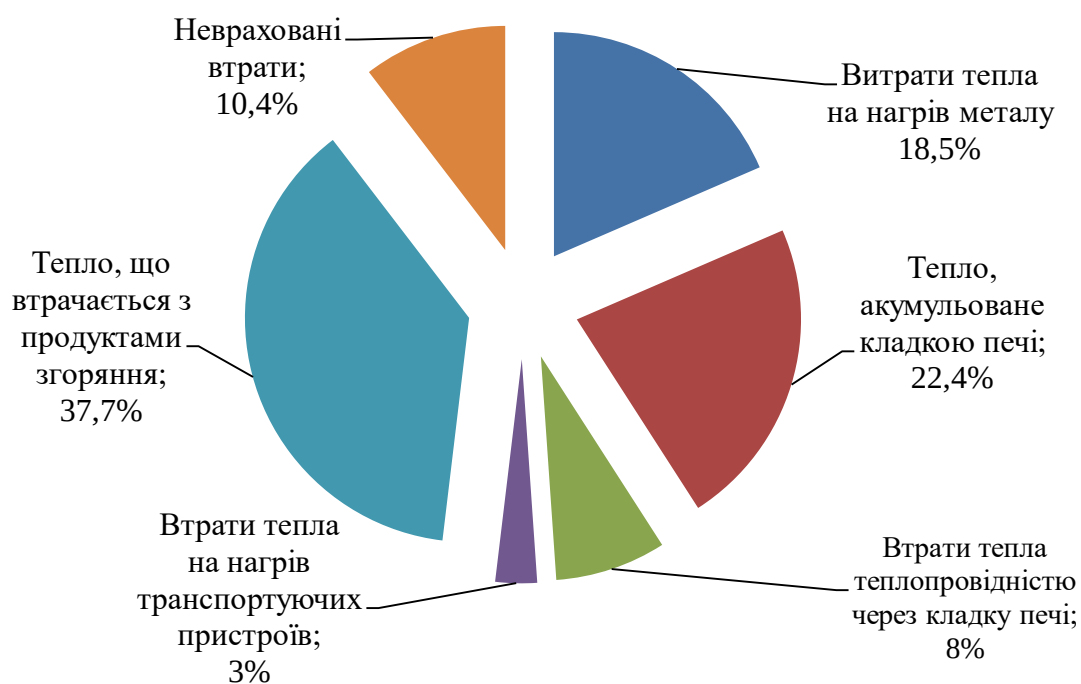


Рисунок 4.9 – Діаграма статей витрат тепла камерною піччю

Також визначені турбулентні числа і константи, які використовувались для побудови комп'ютерної моделі нагріву печі, що встановлено на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат».

На рисунку 4.10 представлена комп'ютерна модель робочого об'єму камерної печі на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» з розрахунковою сіткою. Сітка – гексаедрична частково структурована. Кількість розрахункових елементів 160010. Було включено функцію автоматичного зменшення сітки поблизу димоходу для зменшення похибки моделювання ліній току пічних газів.

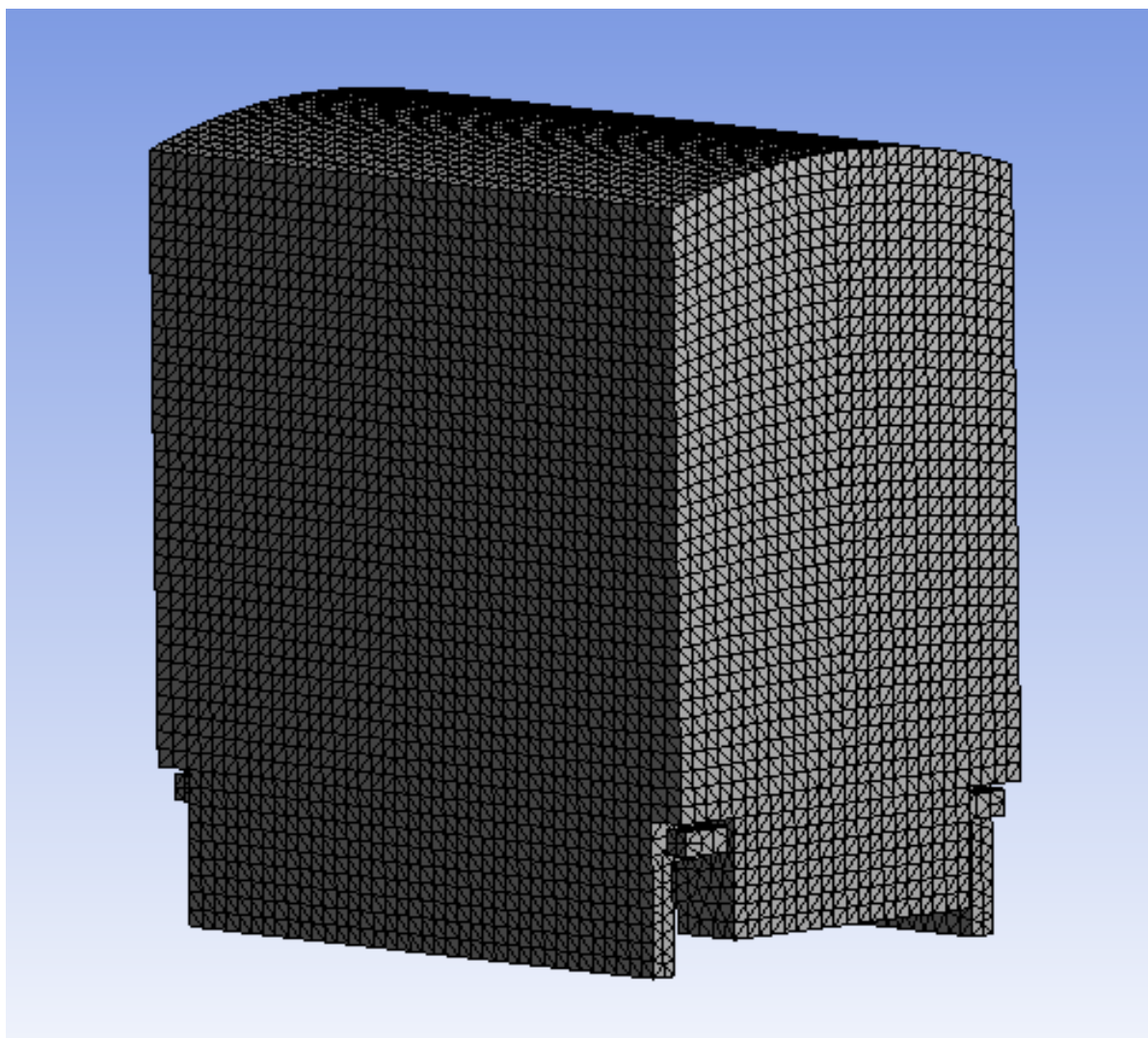


Рисунок 4.10 – Комп'ютерна модель робочого об'єму печі
з розрахунковою сіткою

Комп'ютерна модель внутрішнього об'єму печі з позначеними площинами входу та виходу пічних газів зображена на рисунку 4.11. Дана CAD модель була інтегрована у програмний комплекс типу CAE. Були задані граничні та початкові умови, а також умови закінчення розрахунку. Також для всієї моделі було задано гравітаційні сили та склад димових газів. Для входу димових газів задавалася масова витрата, а для виходу – відносний тиск (згідно даних таблиці 4.2)

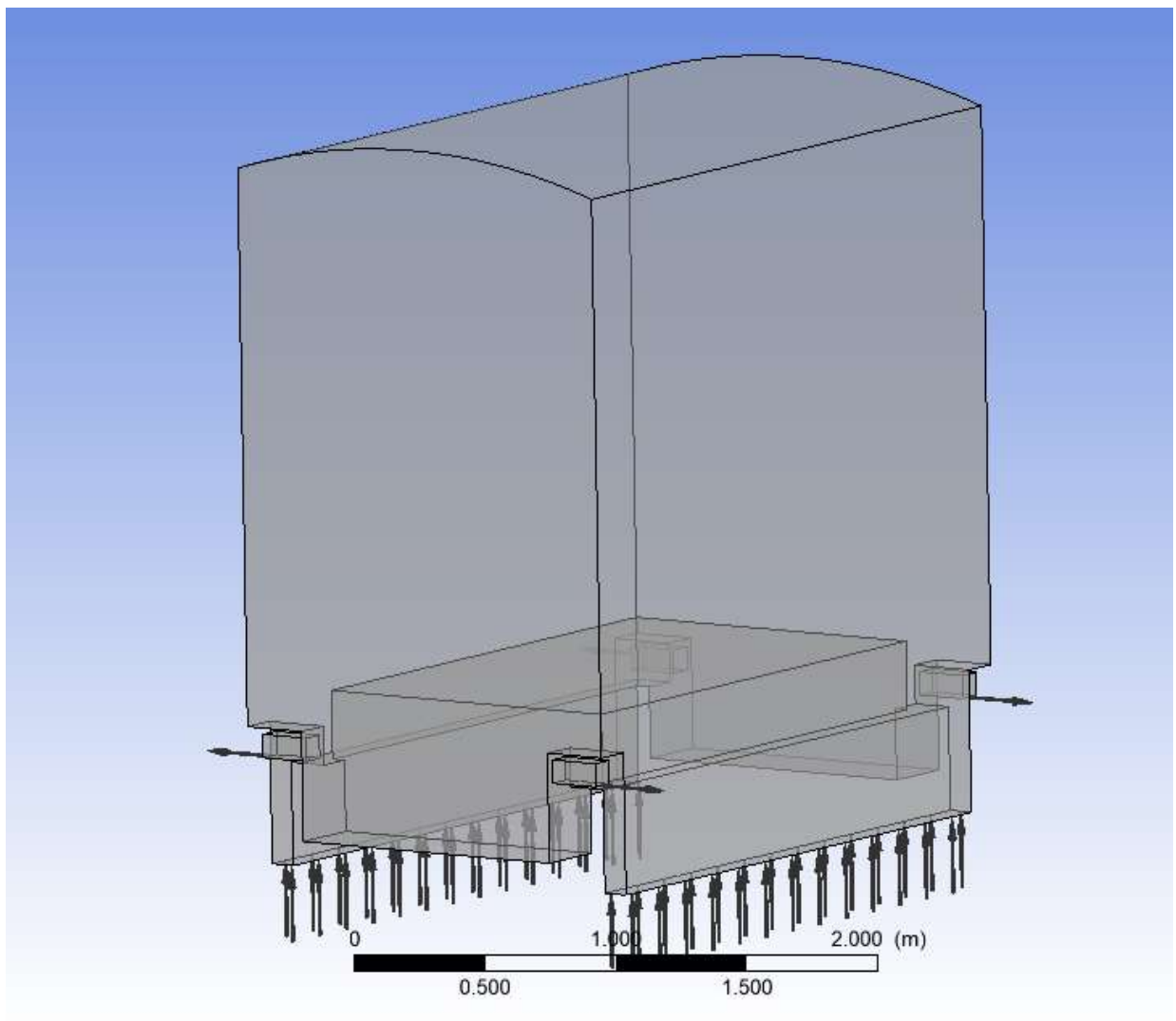


Рисунок 4.11 – Комп'ютерна модель внутрішнього об'єму печі з позначеними площинами входу та виходу пічних газів

На рисунку 4.12 представлені лінії току пічних газів по робочому об'єму камерної печі на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат». З

результатів досліджень можна побачити нерівномірність руху пічних газів по робочому об'єму печі. Несиметричність руху пояснюється високою турбулентністю потоку та великими флуктуаціями складових пічних газів. Нерівномірність руху газів сприяє нерівномірному нагріванню садки металу, а також значним витратам частини пічного газу через димохід.

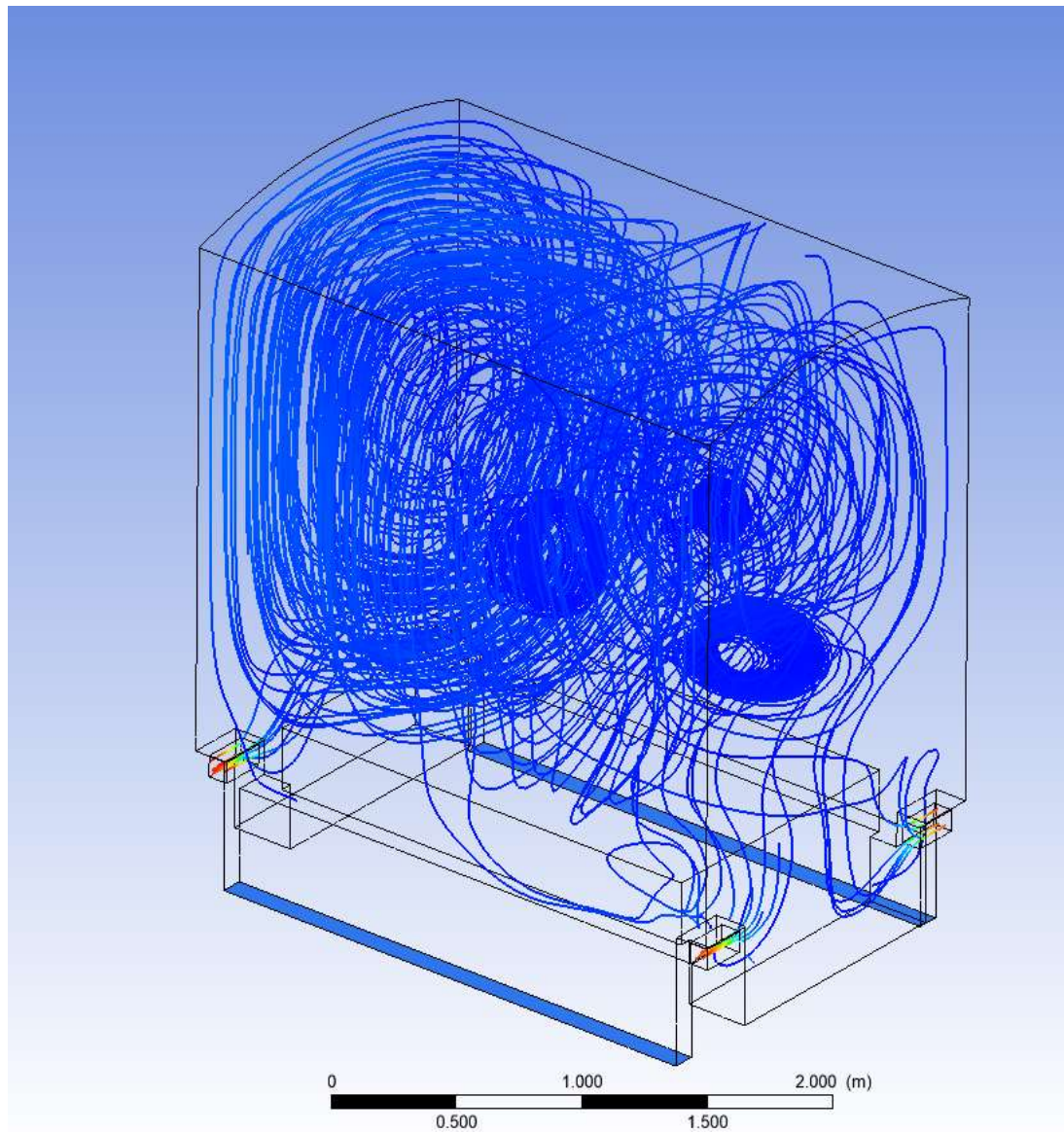


Рисунок 4.12 – Лінії току пічних газів по робочому об'єму камерної печі

Метод підвищення енергоефективності печей зазначеного типу, випробовування яких проводилося на цьому підприємстві, і передбачає перерозподіл втрат з відхідними газами на користь витрат тепла для нагріву металу.

4.3 Налаштування нагрівальної печі перед проведенням експерименту

В рамках підготовки натурних експериментів на викатний під камерної печі (рис. 4.4...4.7), площею близько 5 м^2 , було встановлено електропровідну пластину, яка за розміром не перевищувала нижню площину садки металу і витримувала температуру, що є у нагрівальній камері. До пластини приєднувався ізолюваний провідник струму (перетином $2,5 \text{ мм}^2$), який виводився через вертикальний отвір у поді назовні так, щоб не виникав контакт з корпусом поду. Садку металу, масою близько 4500 кг , розміщували на викатному поді таким чином, щоб між нею і пластиною зберігався електричний контакт. Через спеціальний отвір у передній загороджувальній стінці поду лазерним пірометром визначалась температура садки металу в процесі нагріву. Інший ізолюваний провідник струму з таким же перетином закріплювався на пальнику таким чином, щоб забезпечувався його електричний контакт з останнім. Протилежні кінці зазначених провідників струму приєднувалися до випрямляча з напругою таким чином, щоб на пальнику був позитивний потенціал. Напруга на пластину подавалася впродовж усього технологічного процесу нагріву садки за виключенням режиму «охолодження» металу, який здійснювався безпосередньо в печі [123 - 125].

Витрата природного газу в процесі випробувань вимірювалась газовим лічильником типу РГ 40, значення температур садки та склепіння – безконтактними лазерними пірометрами Optris LaserSight. Експерименти проведено з дотриманням встановленого технологією температурно-часового режиму відпалу металу [124]. На рисунку 4.13 наведені отримані у часі графіки температури відпалу металу без подачі на піч напруги та при різних значеннях останньої. Лінії тренду побудовані для режиму нагріву садки металу.

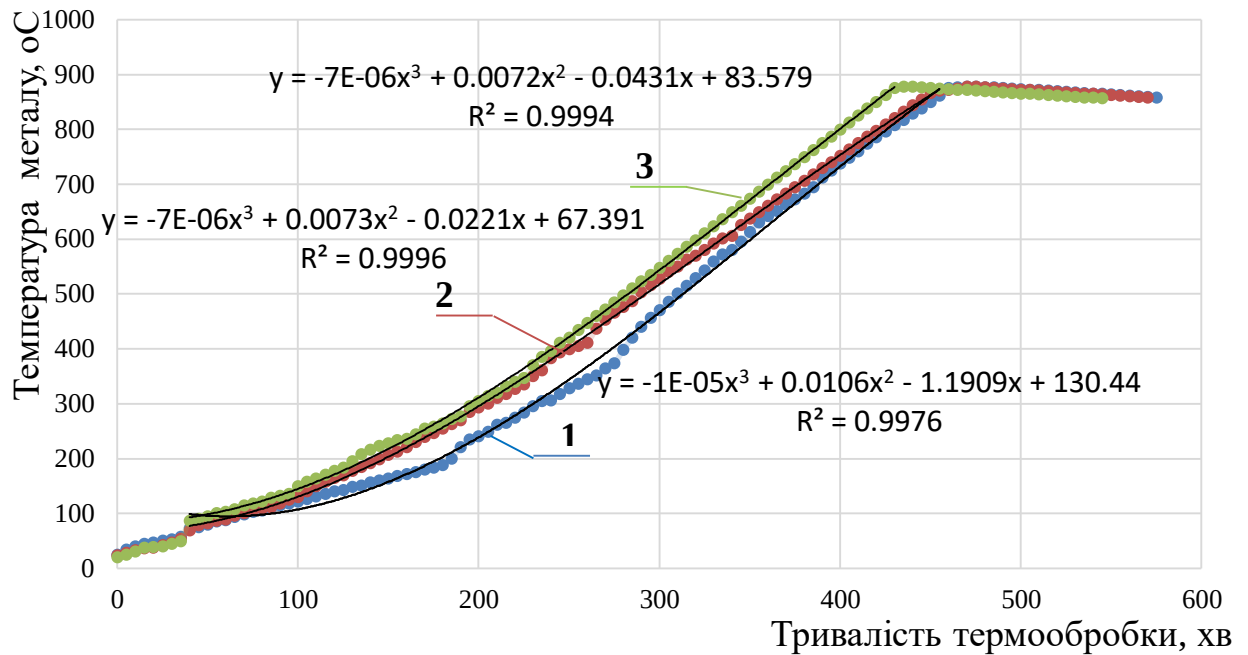


Рисунок 4.13 – Залежності експериментальних значень температур відпалу металу:

- 1 – без подачі напруги, 2 – під напругою 300 В на садку металу,
3 – під напругою 1000 В на садку металу

4.4 Аналіз отриманих результатів проведених випробувань

Аналіз отриманих графіків показує, що за умови використання електричного поля, як додаткового впливаючого фактору деталі в камерній печі швидше досягають необхідних за технологією температур та спостерігається більш прямолінійна крива відпалу металу. Все це свідчить про більш високу рівномірність нагріву садки, що забезпечує кращу якість відпалу.

На рисунку 4.14 показано динаміку витрат природного газу у базовому режимі та за умови подачі напруги 300 В та 1000 В на садку металу у процесі нагрівання і витримки. Стрибки на графіках відповідають почерговому включенню додаткових пальників.

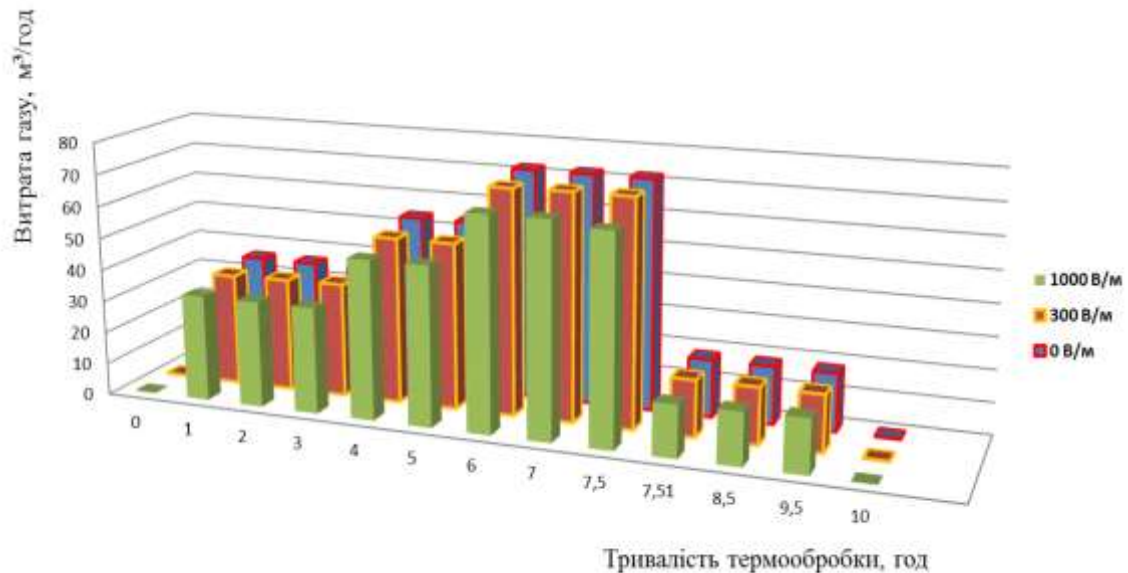


Рисунок 4.14 – Погодинна витрата газу на камерну піч у базовому варіанті та за умови подачі напруги на садку металу 300 В та 1000 В

На рисунку 4.15 представлено сумарну витрату газу на камерну піч у базовому режимі та за умови використання електричного поля у процесі нагрівання і витримки садки з металом. Щодо витрати електроенергії, то впродовж процесу нагріву, величина споживання електричного струму фактично не змінювалася і складала лише 2 А. А це значить, що для утворення необхідного теплового бар'єру, витрати електричної енергії були відносно незначними.

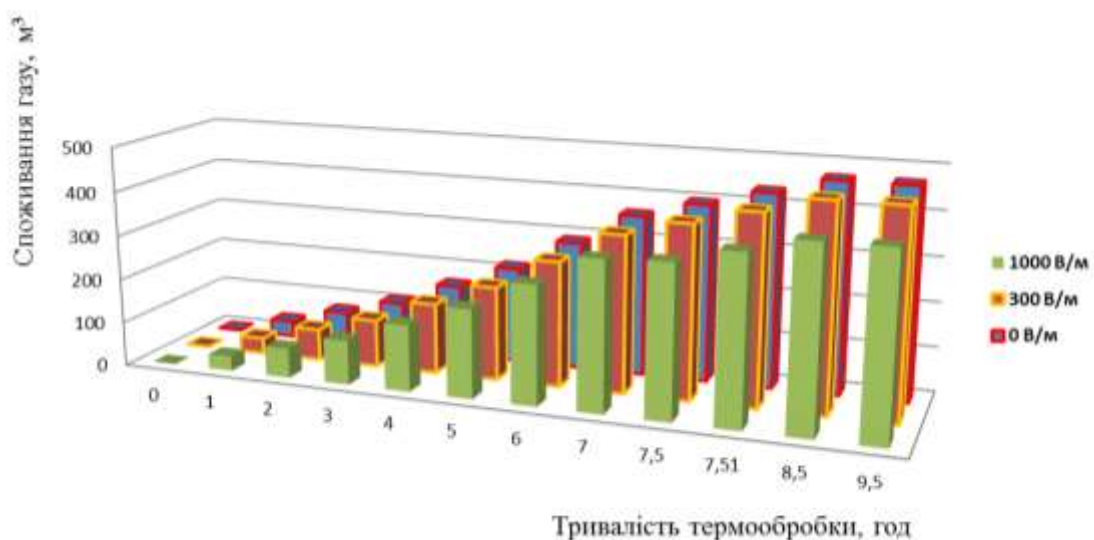


Рисунок 4.15 – Сумарна витрата газу камерною піччю у базовому варіанті та за умови подачі напруги на садку металу 300 В та 1000 В

У таблиці 4.6. представлено перерахований баланс камерної печі за умови використання електричного поля (напруга 1000 В).

Таблиця 4.6 – Тепловий баланс камерної печі за умови подачі напруги у 1000 В

Статті приходу теплоти	Величина,		Статті витрати теплоти	Величина,	
	кДж	%		кДж	%
Хімічна теплота палива	2764776	93,21	Витрати теплоти на нагрівання металу	780374	26,31
Теплота, що вносить повітря	98431	3,32	Теплота, що акумульована кладкою печі	730544	24,63
Теплота екзотермічних реакцій	102865	3,47	Витрати теплоти теплопровідністю через кладку печі	221269	7,46
			Втрати на нагрівання транспортуючих пристроїв	89279	3,01
			Теплота, що втрачається з відхідними газами	836729	28,21
			Невраховані теплові втрати	307877	10,38
Разом	2966072	100,0	Разом	2966072	100,0

За результатами проведених експериментальних досліджень на камерних печах використання електричного поля дозволяє підвищити їхню енергоефективність шляхом скорочення споживання природного газу від 5 до 10 % у порівнянні з показниками діючої печі, що підтверджено

відповідними актами ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» та ПрАТ «Дніпрспецсталь» [124,125].

4.5 Висновки до розділу

1. Згідно з наведеними у розділі показниками на долю камерних печей розглядуваного виробництва припадає до 42 % загальної витрати газу.

2. За результатами розрахунків теплового балансу камерної нагрівальної печі з викатним подом, на якій проводилися випробування запропонованого методу корегування тепловими потоками, виявлено, що найбільша кількість тепла втрачається з відхідними газами (до 40 %).

3. Для впровадження запропонованого методу підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей не потрібні суттєві капітальні витрати й будь-які принципові зміни в їх конструкції. Достатньо створити електричне коло «пальник – викатний под». Схема керування електричним колом також не є складною.

4. Для збереження необхідного теплового бар'єру відхідним газам у камері нагрівальної печі за рахунок наелектризованих частинок в продуктах згорання газу достатньо мати джерело потужності до 2,5 кВт.

5. Отримана під час реальних випробувань в умовах виробництва економія газу 5...10 % свідчить про доцільність використання запропонованого методу й на інших подібних теплоенергетичних установках промислових підприємств.

РОЗДІЛ 5 ПЕРСПЕКТИВИ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1 Алгоритм управління тепловими потоками в камерній нагрівальній печі

Як було розглянуто у попередніх розділах, аналіз сучасного стану роботи камерних печей свідчить про їх невідповідність технологічним вимогам до якості нагрівання металу. Відомо, що в умовах виробництва метою управління різними технологічними процесами нагріву є стабілізація температурних показників виробів, що нагріваються, а також забезпечення необхідної якості виробленої продукції при мінімальних енергетичних витратах. В наявних наукових дослідженнях, присвячених управлінню процесом термічної обробки металу, у якості керуючого впливу використовують тільки витрату природного газу. Тому дослідницький інтерес і викликає розробка інноваційного алгоритму управління нагріванням металу у камерних печах, де у якості додаткового керуючого впливу буде використовуватись напруга між пальником і садкою металу, що нагрівається.

Нехай $T_{зад}$ – задана температура металу, а τ – час його нагрівання за температурно-часовим режимом. Останні жорстко регламентовані технологією за усіма фазами процесу термообробки задля досягнення необхідних теплофізичних перетворень. Тоді задача оптимізації полягає у розрахунку значень керуючих впливів для досягнення заданої динаміки температурних змін з мінімальною витратою природного газу, для чого і необхідно розробити відповідний алгоритм.

У якості керуючих впливів запропоновано використати напругу між пальником і садкою U у деякому діапазоні $U \in [U_{min}; U_{max}]$, U_{min} та U_{max} – мінімальне та максимальне значення напруги між пальником і садкою, обсяг подачі газу $Q \in [Q_{min}; Q_{max}]$, Q_{min} та Q_{max} – мінімальне та максимальне значення

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

Після прорахунків оптимальних співвідношень керуючих впливів за створеним алгоритмом система управління повинна реалізувати послідовність зміни витрати природного газу та електричної напруги для виконання заданого технологічного режиму нагрівання.

На рисунку 5.1 наведено схему запропонованої системи управління камерною піччю, яка включає в себе такі основні блоки як розрахунок оптимальних керуючих впливів за цикл нагрівання, регулятори газу і напруги між пальником та заготівкою та блок визначення відхилень температури від заданої за технологічним режимом [126].

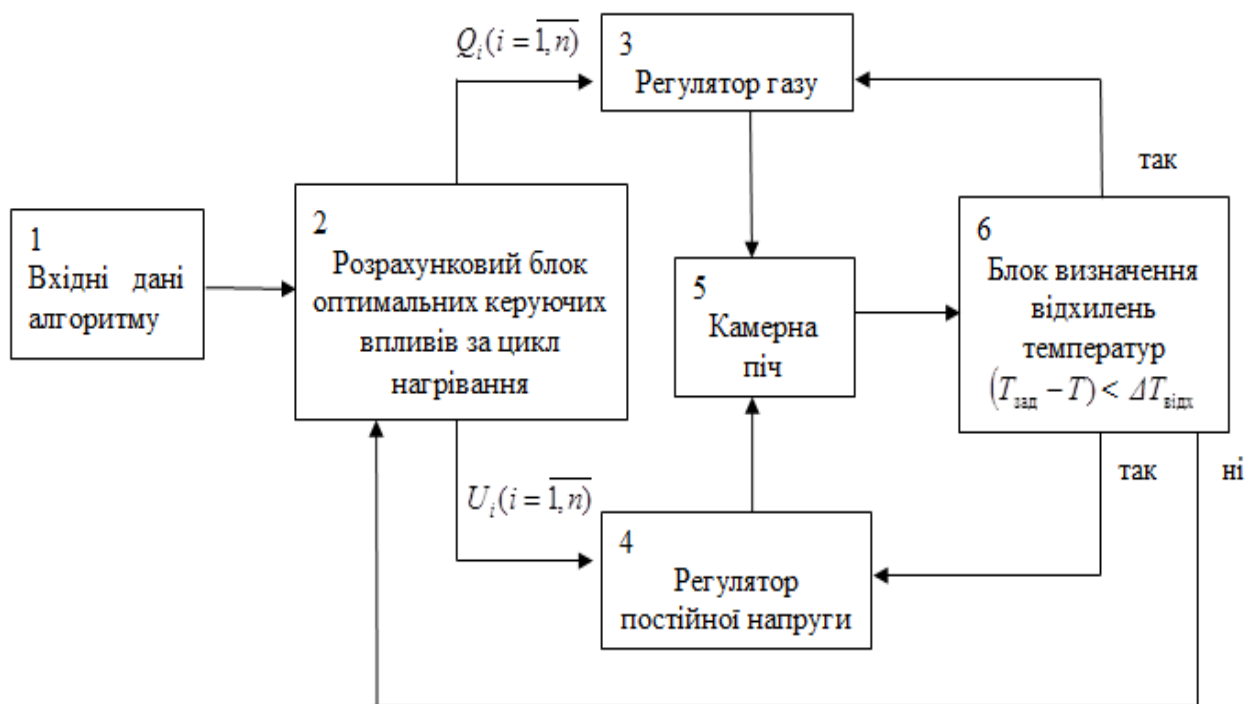


Рисунок 5.1 – Блок-схема системи управління камерною піччю

Функціонування запропонованої системи управління відбувається наступним чином: у розрахунковий блок 2 вводяться вхідні дані алгоритму з обмеженнями. Розрахунки для визначення оптимальних значень величини

напруги та витрати природного газу на кожному кроці виконуються у блоці 2 за розробленим алгоритмом (рис. 5.2) [126].

Тут b_i – коефіцієнти моделі згідно (3.27);

T – температура металу;

ΔU – крок зміни напруги;

ΔQ – крок зміни подачі газу;

τ – час нагрівання;

$T_{зад}$ – задана за технологічним режимом температура металу;

$\Delta T_{відх}$ – технологічно допустиме відхилення температури від заданої;

x – ширина заготовки;

x_{max} – максимальна ширина заготовки;

x_{min} – мінімальна ширина заготовки;

y – довжина заготовки;

y_{max} – максимальна довжина заготовки;

y_{min} – мінімальна довжина заготовки;

z – висота заготовки;

z_{max} – максимальна висота заготовки;

z_{min} – мінімальна довжина заготовки.

Після визначення співвідношень керуючих впливів, які забезпечують досягнення заданої температури на кожному кроці, встановлюється оптимальна послідовність зміни витрати газу та напруги за цикл, яка забезпечить виконання температурного режиму нагрівання з мінімальною витратою природного газу. Потім у відповідності до отриманої послідовності регуляторами 3 і 4 змінюється величина напруги між пальником і садкою металу та подача газу, які й забезпечують виконання заданого графіку нагрівання. У разі відповідності температури заданій, регулятори продовжують реалізовувати видану алгоритмом послідовність на наступному кроці.

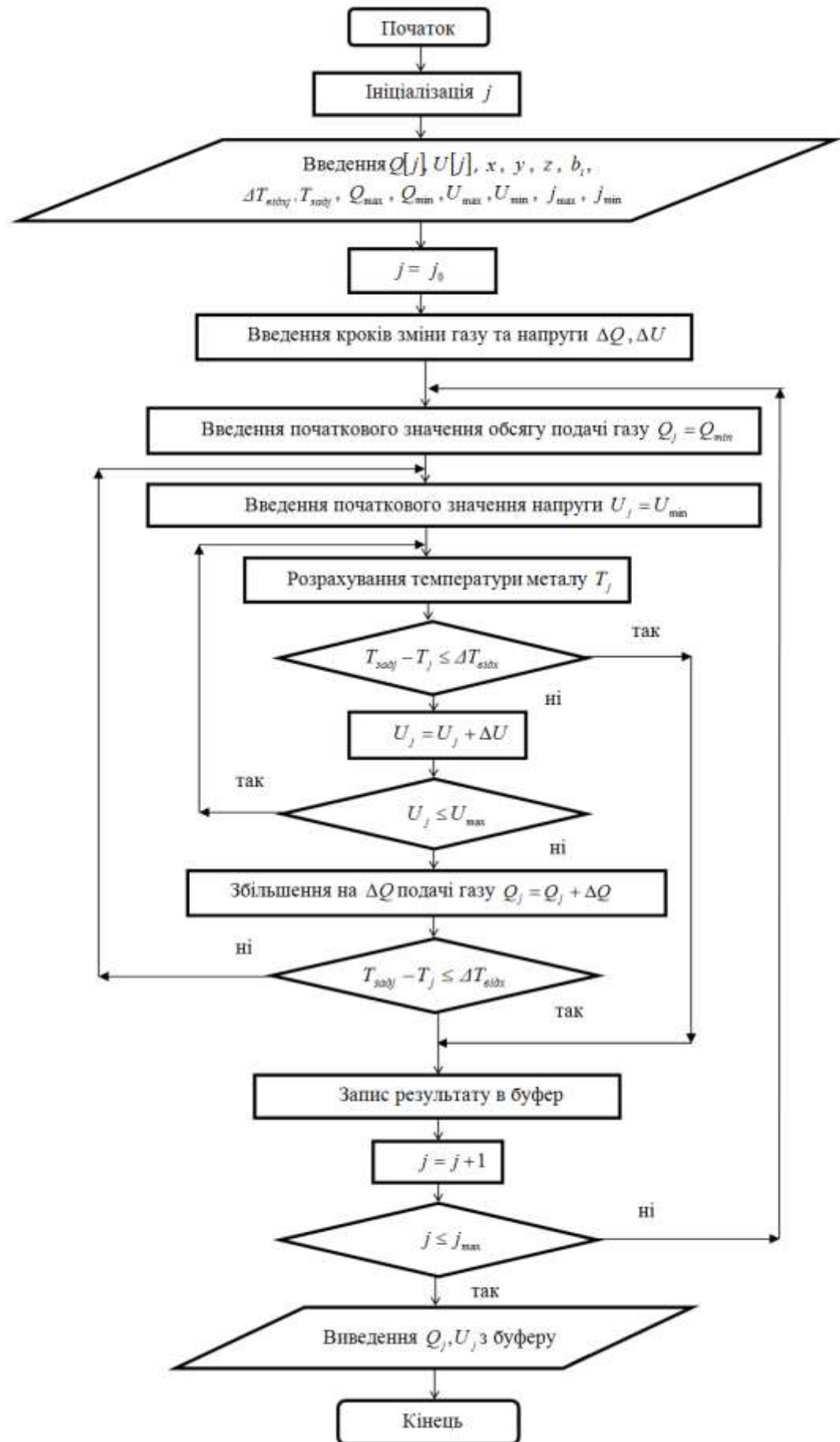


Рисунок 5.2 – Алгоритм управління процесом нагрівання металу у печі

Якщо температура виходить за межі технологічно допустимого відхилення, процес реалізації зупиняється і проводиться визначення нових значень керуючих впливів за цим же алгоритмом на подальші кроки. Запропонована система управління є універсальною, оскільки після розрахунків видає динаміку, за якою потрібно змінювати величину постійної напруги та подачу газу на кожному часовому інтервалі для виконання заданого технологічного режиму нагрівання.

Розроблений інноваційний алгоритм управління процесом нагрівання металу з додатковим використанням у якості керуючого впливу просторового електричного поля [126] дозволяє суттєво підвищити енергоефективність камерної печі та порівняно з алгоритмом конструктивної оптимізації камерних печей на основі переміщення витяжних вікон та місць розташування пальників [127-129] простіший за технічною реалізацією. Перевагою розробленого алгоритму є те, вперше у якості додаткового керуючого впливу використовується просторове електричне поле, створення якого на реальному підприємстві не потребує значних капіталовкладень та зовнішніх теплоутилізаторів, оскільки теплота продуктів згоряння, що раніше втрачалась з відхідними газами використовується безпосередньо у процесі термічної обробки, що сприяє підвищенню енергетичної ефективності установок у цілому.

5.2 Оптимізація параметрів нестационарного електричного поля з метою підвищення ефективності роботи камерних печей

Згідно поставленої задачі маємо задану температуру металу у певний час, а τ – час його нагрівання за температурно-часовим режимом. Останні регламентовані технологією за усіма фазами процесу термообробки задля досягнення необхідних теплофізичних перетворень. Допустимі відхилення по температурі складають до 50 °C та 20 °C для спеціальних умов. Тоді задача оптимізації полягає у розрахунку значень керуючих впливів для

досягнення заданої динаміки температурних змін з мінімальною витратою природного газу, для чого і необхідно розробити відповідні параметри нестационарного електричного поля.

У якості керуючих впливів запропоновано використати напругу між пальником і садкою U у деякому діапазоні та обсяг подачі газу на кожному кроці за часом. Після прорахунків оптимальних співвідношень керуючих впливів за створеним алгоритмом система управління повинна реалізувати послідовність зміни електричної напруги та витрати природного газу для виконання заданого технологічного режиму нагрівання.

Чисельні наукові дослідження щодо підвищення енергоефективності роботи камерних печей стосуються визначення і реалізації у часі таких температурних режимів, що забезпечують технологічно необхідну швидкість нагрівання металу.

Як зазначалось раніше, у полум'ї знаходяться заряджені частинки в досить великих концентраціях. Це означає, що електрофізичний вплив може бути здійснено двома шляхами: накладанням на полум'я електричних, магнітних і комбінованих полів чи введенням в останнє заряджених частинок ззовні. Тобто можливі різні механізми іоноутворення в полум'ї і відомо, що саме механізм хіміїонізації відповідальний за високу концентрацію іонів в ньому. Головна ідея використання електричного поля полягає у тому, що у разі утворення електричного поля між, наприклад, пальником і заготівкою, тепловий потік щільніше прилягатиме до останньої. Це обумовлюватиметься тим, що наелектризовані ще частинки продуктів згорання наближатимуться до зазначеної поверхні і створюватимуть біля неї додаткову температурну зону, що сприятиме підвищенню швидкості її нагріву. Тобто електричним полем, впливаючи на іонізовані частинки, можливо утворювати тепловий бар'єр, що дозволяє корегувати теплові потоки і таким чином впливати на температуру заготівок. Однак складністю даної задачі є необхідність розробки раціонального алгоритму управління електричним полем у випадку його нестационарності. Зазначене впливає із

умов необхідності дотримуватись встановлених технологічних параметрів, зокрема щодо дотримання температури заготовки у камері у певний момент часу. Попередніми дослідженнями було експериментально доведено економію споживання газу на 5...10 % шляхом застосування електричного поля [124, 125]. Тоді мова йшла про застосування стаціонарного електричного поля з робочою напругою 1000 В і роботою установки протягом всього робочого циклу без охолодження, тобто нагрів та витримка. Застосування нестаціонарних режимів передбачає розробку відповідних алгоритмів керування, або параметрів напруги, тощо.

Серед множини варіантів, відносно яких проведено теоретичні дослідження, для порівняння та розуміння загальних тенденцій розв'язання поставлених задач було обрано декілька. Одним із можливих напрямків розвитку теорії нестаціонарних електричних полів є застосування імпульсів. Серед багатьох розглядуваних можливих варіантів режимів імпульсного електричного поля було обрано варіант, форма імпульсів якого наведена на рисунку 5.3. [130]. В процесі теоретичних досліджень було необхідно визначити оптимальні параметри представлених імпульсів за критерієм мінімальних енерговитрат при збереженні встановлених технологією температурних режимів та порівняти зі стаціонарним режимом.

Як можна бачити на рисунку 5.3, імпульс складається з двох складових:

$$t_i = t_{i1} + t_{i2}$$

Початковий імпульс t_{i1} має на меті максимально впливати на іонізовані заряджені частинки продуктів згоряння газової суміші. Тобто у початковий час, наприклад, для першого варіанту ($t_{i1} = 1$ с) іонізовані частинки, у тому числі й найбільш віддалені, під дією силового впливу на них електричного поля, притягуються до об'єкту (заготовки). Інакше кажучи, у початковий період t_{i1} відбувається притягування, концентрація та утримання іонізованих частинок.

Під дією частини імпульсу протягом часу t_{i2} іонізовані частинки продовжують утримуватись біля заготівки, деякі з них втрачаються, частина потрапляє у зону дії електричного поля і притягується до об'єкту. Тобто фактично основною функцією другої фази імпульсу є утримання заряджених часток.

Щодо паузи t_{π} , то фізичного сенсу вона не несе, проте потрібна лише з точки зору заощадження електричної енергії. При проведенні відповідних досліджень однією з задач оптимізації було зрозуміти допустиме значення часу паузи.

Для розв'язання поставленої задачі нехай кожен можливий варіант визначається обраним на етапі структурного моделювання списком предикторів

$$\Omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n],$$

а кожен предиктор ω_i може набувати деякі значення

$$\Xi_i = \{\theta_{i1}, \theta_{i2}, \dots, \theta_{ik}\}, i = 1, n,$$

що вказують на можливий режим роботи (рис. 5.4).

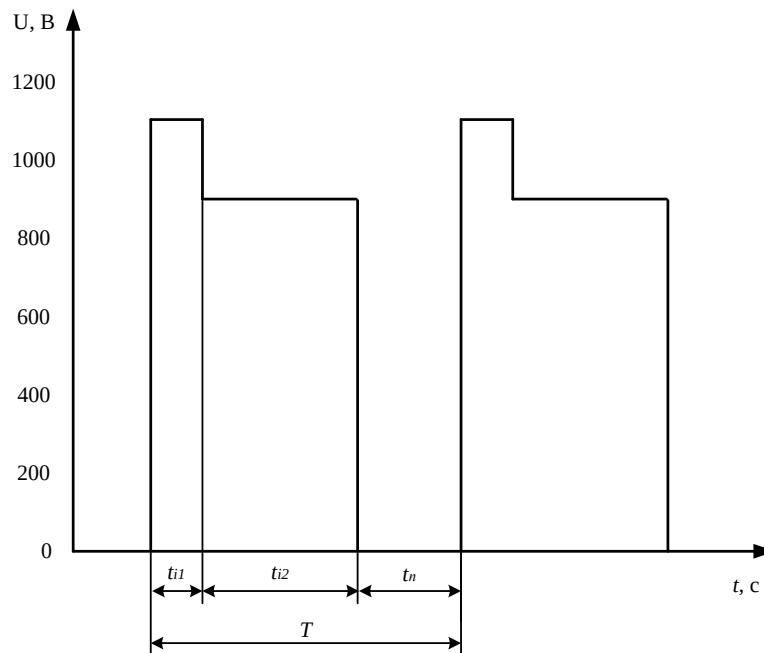


Рисунок 5.3 – Форма імпульсів для створення нестаціонарного електричного поля в камері печі:

t_{i1} – початковий імпульс; t_{i2} – основний імпульс; t_{π} – пауза; T – період

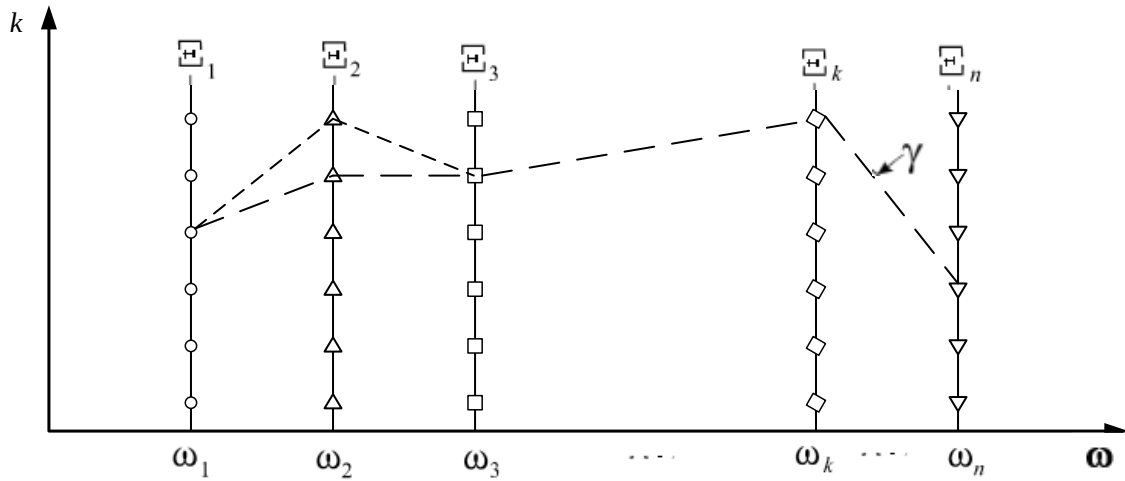


Рисунок 5.4 – Множина усіх можливих селекторів

Визначення. Селектором γ будемо називати список:

$$\gamma = \left[\left[\omega_1, \theta_{1j_1} \right], \left[\omega_2, \theta_{2j_2} \right], \dots, \left[\omega_n, \theta_{nj_n} \right] \right]$$

Набір всіх можливих селекторів будемо позначати у вигляді множини Γ , у якій кількість елементів можна визначити за формулою:

$$|\Gamma| = \prod_{i=1}^n k_i$$

де k_i - число можливих значень θ_{ni} предиктора ω_i .

Надалі будь-який селектор $\gamma \in \Gamma$ будемо характеризувати двома показниками: $F_1(\gamma)$, та $F_2(\gamma)$.

Бажання зробити витрати електроенергії та природного газу якнайменше, призводить нас до задачі векторної оптимізації, що має вигляд:

$$\begin{pmatrix} F_1(\gamma) \\ F_2(\gamma) \end{pmatrix} \rightarrow \min$$

де $F_1(\gamma)$, $F_2(\gamma)$ - витрати електроенергії та природного газу відповідно.

Розв'язком задачі векторної оптимізації будемо називати таку множину $\Gamma^* \subseteq \Gamma$, у якій будь-які два селектори γ'_* й γ''_* незрівнянні між собою за відношенням Парето.

При цьому будемо вважати, що два селектори γ_1 і γ_2 зрівняні між собою за відношенням Парето (символічно будемо записувати у вигляді $\gamma_1 P \gamma_2$), якщо

$$\gamma_1 P \gamma_2 \Leftrightarrow \begin{pmatrix} F_1(\gamma_1, m) \leq F_1(\gamma_2, m) \\ F_2(\gamma_1, m) \leq F_2(\gamma_2, m) \end{pmatrix},$$

причому одна з нерівностей виконується суворо.

Якщо множина предикторів Ω і множина можливих значень $\Xi_j, j = \overline{1, n}$ - скінченні, тоді розв'язок задачі існує.

Зауважимо що, визначивши множину раціональних селекторів та маючи інформацію про стан досліджуваного об'єкту, отримаємо можливість раціонального впливу на стан об'єкту, прямуючи до найближчого селектора з оптимального розв'язку задачі.

Серед багатьох прорахованих варіантів для прикладу наведемо фрагмент з 10 можливих і найбільш прийнятних варіантів (табл. 5.1). У даному випадку серед 10 представлених можливих варіантів для подальшого дослідження залишимо тільки три, оскільки сумарні витрати при будь-яких інших режимах роботи перевищують витрати варіанта 5 (стаціонарний режим, середнє значення напруги дорівнювало 1000 В), з яким ми порівнюємо інші варіанти. Отже розглянемо варіанти перший, четвертий та восьмий.

Як ми можемо бачити, усі вони є незрівняними за відношенням Парето, отже є розв'язком задачі векторної оптимізації за двома показниками. Але оскільки перший варіант має найменші сумарні витрати, то його можна рекомендувати для подальшого використання.

Таблиця 5.1 – Параметри нестационарного режиму електричного поля у камері печі

№ вар.	U_1 , В	t_1 , с	U_2 , В	t_2 , с	$t_{\text{п}}$, с	$U_{\text{ср}}$, В	G, куб. м/цикл	Витрати ел.ен., кВт год	Витрати за газ, грн.	Витрати за ел.ен, грн.	Загальні витрати, грн.
1	1100	1	900	3	2	633.33	467.58	12.67	2520.24	37.24	2557.48
2	1200	1	900	3	2	650	473.22	13.00	2550.66	38.22	2588.88
3	1100	1	950	3	2	658.33	470.38	13.17	2535.36	38.71	2574.07
4	1200	1	800	3	2	600	469.72	12.00	2531.80	35.28	2567.08
5	1000	-	1000	-	0	1000	466.03	20.00	2511.74	58.80	2570.54
6	1000	1	900	3	2	616.67	487.30	12.33	2626.55	36.26	2662.81
7	1000	1	800	3	2	566.67	478.58	11.33	2579.53	33.32	2612.85
8	1200	0.5	800	3.5	2	566.67	469.84	11.33	2532.45	33.32	2565.77
9	1100	1	900	4	2	470	496.78	9.40	2677.65	27.64	2705.29
10	1000	1	900	3	2	616.67	474.51	12.33	2557.59	36.26	2593.85

На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень було отримано результати визначення оптимізації параметрів імпульсів напруги, згідно яких побудовано результуючу залежність нескінченних рішень по Парето (рис. 5.5, 5.6).

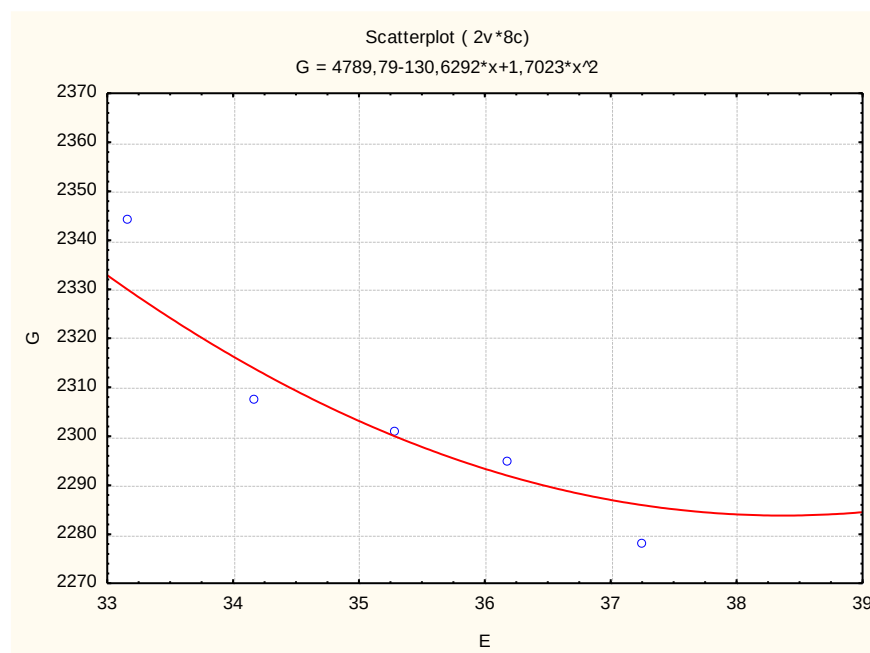


Рисунок 5.5 – Множина рішень задачі оптимізації по Парето

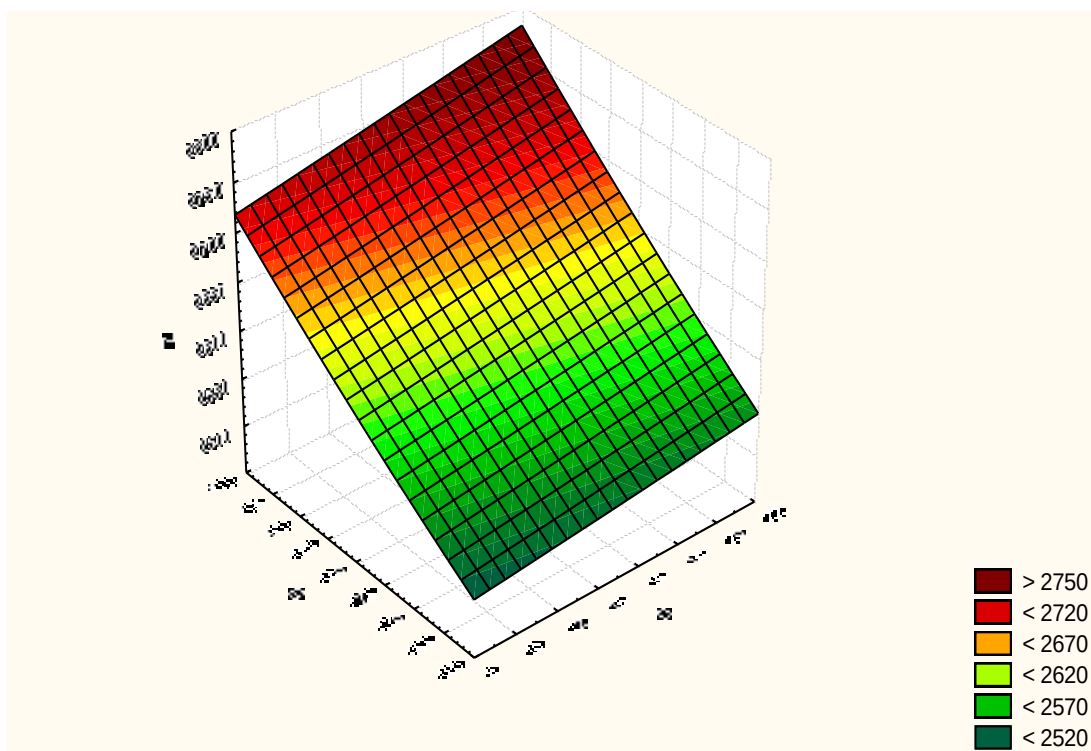


Рисунок 5.6 – Множина рішень (тривимірна) задачі оптимізації по Парето з врахуванням сумарної вартості енергоресурсів

Аналіз наведених вище результатів показує, що отримані залежності рішень задач оптимізації за критерієм мінімальних енерговитрат є незрівняними за Парето. Проте, враховуючи сумарний вартісний показник серед представлених варіантів пропонується прийняти перший (табл. 5.1). Також в ході досліджень було виявлено, що збільшення паузи більше 2 секунд є недоцільним. Можна припустити, що за рахунок високих турбулентностей у камері печі і інтенсивному руху теплових потоків, відбувається зниження концентрації заряджених частинок біля об'єкту, і як наслідок, підвищується витрата газу. При цьому заощадження електроенергії є незначним і фактично не впливає на сумарну економію. Тобто пропонується максимальний час паузи встановлювати не більше 2 с, за який за рахунок інерційності процесів більша частина заряджених частинок залишається навколо заготовки. Після закінчення паузи, знову відбувається ударний вплив на іонізовані частинки, процес повторюється. Максимальні значення імпульсів підбирались з тих же міркувань, а саме максимально

ефективного впливу на частинки, наближення та утримання біля об'єкту [130].

5.3 Висновки до розділу

1. Розроблено алгоритм управління процесом нагріву металу у камерній печі, у якому вперше у якості додаткового керуючого впливу використовуються керовані електричні поля, створення яких на реальному підприємстві не потребує значних капіталовкладень та зовнішніх теплоутилізаторів.

2. Використання запропонованого методу підвищення енергоефективності нагрівальної печі в промислових умовах дозволило знизити споживання природного газу не змінюючи конструкцію печі і дотримуючись технологічних параметрів процесу нагріву металу.

3. Застосування нестационарного електричного поля є доцільним з точки зору енергоефективності. Згідно поставленої задачі було розроблено режим нагріву заготовок із застосуванням нестационарного електричного поля, що дозволяє підвищити енергоефективність процесу термічної обробки об'єктів.

4. У порівнянні зі стаціонарним режимом запропонована технологія дозволяє заощаджувати 33 % електроенергії при майже однакових витратах газу, що нескладно пояснити особливостями теплофізичних процесів у камері печі. Іншою вигідною рисою розробленої технології є можливість більш оперативного впливу на температуру заготовки (у межах до 8 %), що було виявлено в процесі експериментів та потребує подальших досліджень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення енергоефективності камерних печей за рахунок створення у їх об'ємах керованих електричних полів, які призводять до перерозподілу температури в робочих просторах установок. Внаслідок цього одержані такі результати:

1. Проведено аналіз існуючих розрахункових та експериментальних методів визначення енергоощадних теплотехнологічних режимів нагріву металевих виробів у камерних печах з вискатним подом та виконана кількісна оцінка реальної енергоефективності останніх. Проведений аналіз показав, що задачі, пов'язані з необхідністю підвищення енергоефективності камерних печей є актуальними та потребують додаткових досліджень.

2. Виконано чисельне моделювання полів швидкостей пічних газів у камерній печі за допомогою рівняння Нав'є-Стокса для нестисленої рідини і рівняння нерозривності. Турбулентність руху в'язкого газу при цьому враховувалась за допомогою RNG $k-\epsilon$ моделі. Результати проведеного моделювання температурних зон у камері печі показали, що аеродинаміка камерних печей не раціональна. Аналіз отриманих розрахункових досліджень напрямків і масових витрат пічних газів у камері печі свідчить про те, що більша кількість останніх нагріває верхню частину печі та видаляється через димові вікна, не віддавши теплоти металу, що нагрівається.

3. Розроблено та створено експериментальну нагрівальну установку з тепловою потужністю до 77 кВт і питомою витратою газу 0,04 м³/хв, яка моделює канал відведення продуктів згорання розмірами 0,192×0,192×1,1 м. Під дією необхідної напруженості між пластинами та пальником в діапазоні 0...1 кВ/м встановлено можливість застосування електричних полів для корегування температурних полів всередині камери нагрівальних пристроїв.

4. Аналіз проведених експериментальних досліджень показав, що на відстанях 0,5...2 м від пальника зберігається достатня кількість заряджених часток задля створення електричним способом теплового бар'єра потоку відхідних газів. Встановлено, що перерозподіл масових витрат пічних газів поблизу заготівок за рахунок створення теплових бар'єрів шляхом застосування електричних полів дозволяє впливати на температуру цих заготівок.

5. Розроблено математичну модель розподілу температури в нагрівальній камері печі під дією електричного поля, яка дозволяє визначати температуру у місці розташування садки та аналізувати процеси теплообміну. Адекватність розробленої моделі підтверджено реальним експериментом з середньоквадратичною відносною похибкою прогнозу в межах до 4 %.

6. За результатами розрахунків теплового балансу камерної нагрівальної печі з викатним подом, на якій проводилися випробування запропонованого методу управління тепловими потоками, найбільша кількість тепла втрачається з відхідними газами (до 40 %).

7. Експериментально підтверджено ефективність запропонованого електрофізичного способу впливу на температурне поле газів в промислових умовах на камерній печі з викатним подом, де під дією електричного поля у вихідному каналі установки виникає тепловий бар'єр з заряджених часток продуктів згоряння, змінюючи траєкторію руху пічних газів у напрямку садки з металом. Для збереження необхідного теплового бар'єру відхідним газам у камері нагрівальної печі за рахунок наелектризованих частинок в продуктах згоряння газу достатньо мати джерело потужності до 2,5 кВт.

8. Розроблено алгоритм управління процесом нагріву металу у камерній печі, у якому вперше у якості додаткового керуючого впливу використовуються керовані електричні поля, створення яких на реальному підприємстві не потребує значних капіталовкладень та зовнішніх теплоутилізаторів.

9. Використання запропонованого методу підвищення енергоефективності нагрівальної печі в промислових умовах дозволило знизити споживання природного газу не змінюючи конструкцію печі і дотримуючись технологічних параметрів процесу нагріву металу.

10. Встановлено, що застосування нестаціонарного електричного поля є доцільним з точки зору енергоефективності. У порівнянні зі стаціонарним режимом розроблена технологія дозволяє заощаджувати 33 % електроенергії при фактично тих же витратах газу. Також розроблена технологія використання керованого імпульсного електричного поля дозволяє більш оперативно впливати на температуру заготівки (у межах до 8 %).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Губинский В. И. Нагревательные печи металлургии - сегодня и завтра. Теория и практика металлургии. 2004. № 6. С. 56-60.
2. Свинолобов Н. П. Печи черной металлургии : учеб. пособ. для вузов. Днепропетровск : Пороги, 2004. 154 с.
3. Теплотехника металлургического производства : учеб. пособ. для вузов / под общ. ред. : В. А. Кривандина, В. В. Белоусова, Г.С. Сборщикова и др. В 2 т. Т. 2. Конструкция и работа печей. Москва : МИСИС, 2001. 736 с.
4. Губинский В. И. Металлургические печи : учеб. пособие. Днепропетровск : НМетАУ, 2006. 85 с.
5. Міністерство енергетики України : веб сайт. URL:
<http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/doccatalog/list?currDir=50358>
 (дата звернення 10.09.2020).
6. Державна служба статистики України : веб сайт. URL:
<http://www.ukrstat.gov.ua> (дата звернення 04.11.2020).
7. 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).
8. 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).
9. 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.

10. Бирюков А. Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах : монография. Донецк : Ноулидж, 2012. 247 с.
11. Баріщенко О. М., Ревун М. П. Актуальні енергозберігаючі методи роботи нагрівальних печей : монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 138 с.
12. Ерёмин А. О. Современные способы отопления нагревательных печей. *Металлургическая теплотехника* (Сб.научн. трудов НМетАУ). Днепропетровск : Новая идеология, 2008. С. 139 – 151.
13. 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.
14. Єрьомін О. О., Сибір А. В., Губинський В. Й. Дослідження об'ємно – регенеративного опалення камерної печі на основі математичного моделювання руху газів і теплообміну. *Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика* : зб. наук. пр. Дніпропетровськ : Нова ідеологія. 2010. Вип. 2. С. 96–106.
15. Візер А. А. Щодо недоліків теплової роботи камерних печей. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2015. № 34. С. 89 - 92.
16. 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.
17. 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.
18. 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.

19. Сазонов Э. В., Семенов В. Н. Утилизация теплоты и очистка газовых выбросов: монография. Воронеж : ВГАСУ, 2010. – 142 с.

20. 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.

21. 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.

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

23. 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.

24. 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.

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

26. Soroka B., Zgursky V., Pyanykh K. Development of the Monte-

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

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

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

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

30. Павленко А. М., Чейлытко А. А. Особенности тепломассообменных процессов в вихревом потоке с влажными дисперсными частицами. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2008. №35. С. 10 – 13.

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

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

33. Дешко В.І., Шевченко О.М. Структурний аналіз енергоспоживання й енергозбереження в галузі освіти. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*. 2011. №. 6. С. 139 – 147.

34. Hanna V. Koshlak, Andrii O. Cheilytko. Investigation of effective thermal conductivity in porous metallic materials. *Journal of new technologies in*

environmental science – Kielce: Kielce University of Technology. 2019. V.3 No.3. P.112-122.

35. Igor I. Andrianov, Jan Awrejcewicz, Galina A. Starushenko, Vladimir A. Gabrinets. Refinement of the Maxwell formula for a composite reinforced by circular cross-section fibres. Part II : using Padé approximants. *Acta Mech.* 2020. Vol. 231, iss. 12. P. 5145-5157. [https://doi.org/ 10.1007/s00707-020-02789-2](https://doi.org/10.1007/s00707-020-02789-2)

36. V. A. Pinchuk, T. A. Sharabura, A.V. Kuzmin, S.A. Pinchuk, Engineering equations for determining coal-water fuel combustion stages, *Journal of the Energy Institute.* 93. 2020. P.1924–1933. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2020.04.007>.

37. V. A. Pinchuk, T. A. Sharabura, A. V. Kuzmin, Improvement of coal-water fuel combustion characteristics by using of electromagnetic treatment, *Fuel Processing Technology.* 167 2017 P.61–68. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2017.06.014>.

38. Губинский В. И., Еремин А. О., Сибирь А. В. Работа нагревательного колодца с шариковыми регенераторами. *Металлургическая и горнорудная промышленность.* 2005. №1 С. 103- 105.

39. 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.

40. 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.

41. 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.
42. 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.
43. 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.
44. 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.
45. 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).
46. 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>.
47. 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.
48. Соболев В.М. Современные технологические решения при разработке топочно-горелочных устройств. *Новости теплоснабжения*. 2012. № 10(146). С.23-25.

49. 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.

50. Кошельник 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.

51. 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>

52. Кошельник О.В., Чорна Н.А. Перспективи використання водневих енергоперетворюючих систем для утилізації теплових вторинних енергоресурсів високотемпературних теплотехнологічних комплексів. *Проблемы машиностроения*. 2014. №4. С. 25-36.

53. Пшинько А. Н., Габринец В. А. Потенциал использования сельскохозяйственных био-ресурсов для получения тепловой энергии. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2019. Т. 41. №2. С. 56-63.

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

55. 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.

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

57. Ліуш Ю. Б. Удосконалення конструкції і режимів роботи газових камерних печей задля підвищення їх енергоефективності : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Одеський національний політехнічний університет. Одеса, 2015. 20 с.

58. 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.

59. M. Rimar, A. Kulikov, M. Fedak, O. Yeromin, K. Sukhyy, 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.

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

61. 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.

62. 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.

63. 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.

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

65. 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.
66. Сибирь А. В., Решетняк С. И. , Губинский В. И. Моделирование теплообмена в камере, отапливаемой регенеративными горелками. *Промышленная теплотехника*. 2006. №5. С. 41-46.
67. Сибирь А.В., Решетняк С. И. , Губинский В. И. Моделирование гидродинамических процессов в регенеративном колодце с центральной горелкой : Металлургическая теплотехника (Сборник научных трудов НМетАУ). Днепропетровск, 2006. С. 313 - 323.
68. Сорока Б. С., Згурский В. А. Моделирование процессов переноса и образования вредных выбросов при сжигании природного газа с воздухом, увлажненным в цикле Майсоценко. *Современная наука. Исследования, Идеи, Результаты, Технологии*. 2013. № 1(12) С. 403- 409.
69. 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.
70. Арутюнов В. А., Ибадуллаев Т. Б. Развитие методов математического моделирования теплофизических процессов в топливных промышленных печах. *Металлург*. 2011. № 1. С. 33–36.
71. 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.
72. Калашников С. Н. Численно-аналитическое моделирование тепломассообменных процессов в металлургических агрегатах на основе разработки объектных приложений. *Изв. ВУЗ. ЧМ*. 2002. №8. С. 46 – 49.

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

74. 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.

75. 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.

76. 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.

77. 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.

78. Коротин А. Н., Крылова Л. С., Челышев 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.

79. 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.

80. Каюков Ю. М. Підвищення ефективності нагріву сталі та теплової обробки окалини з метою економії палива та металу : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.06 / Дніпродзерж. держ. техн. ун-т. Дніпродзержинськ, 2013. 20 с.

81. 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.

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

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

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

85. 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.

86. 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.

87. 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.

88. 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:

II ЗНУ, 2019. Т. III. С. 7.

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

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

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

92. Von A. G. Gaydon, H. G. Wolfhard. Flames – their structure, radiation and temperature. *Chemie Ingenieur Technik*. 2009. Vol. 51. Issue 7. P. 765 – 765.

93. 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.

94. 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.

95. 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.

96. Кавера А. Л. Исследование состояния вопроса о процессах горения в электрическом поле. *Вісті Донецького гірничого інституту*. 2005. № 1. С. 182 – 187.

97. Афанасьев В. В., Кидин Н. И. Диагностика и управление устойчивостью горения в камерах сгорания энергетических установок. Москва : Физматлит. 2008. 176 с.

98. 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).

99. Талантов А. В. Основы теории горения. Часть 1 : учеб. пособие. Казань: Казанский авиационный институт им. А.Н. Туполева, 1975. 253 с.

100. Степанов Е. М., Дьячков Б. Г. Ионизация в пламени и электрическое поле. Москва : Металлургия. 1968. 310 с.

101. 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.

102. 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.

103. 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.

104. 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.

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

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

107. Босов А. А. Функции множества и их применение : монография. Днепропетровск : Андрей. 2007. 182 с.

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

109. 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.

110. 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.

111. 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.

112. 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.

113. 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.

114. 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.

115. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособ. для вуз. 10-е изд, стереотипное. Москва : Высшая школа, 2004. 479 с.
116. Елисеева И. И. Общая теория статистики : учеб. пособ. 4-е изд. перераб. и доп. Москва : Финансы и Статистика, 2002. 480 с.
117. Адлер Ю.П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М. : Наука.,1976. - 279 с.
118. Лукомский Ф.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. Москва : Госстатиздат, 1958. 120 с.
119. Запорізький титано - магнезійовий комбінат : веб сайт. URL: <https://ztmc.zp.ua/uk/> (дата звернення 03.10.2020).
120. Мастрюков Б. С. Тепло-технические расчеты промышленных печей. М.: Металлургия, 1972. – 368 с.
121. Тымчак В. М., Гусовский В. Л. Расчет нагревательных и термических печей. М. : Металлургия, 1983. – 480 с.
122. Гусовский В. Л., Лифшиц А. Е. Методики расчета нагревательных и термических печей : учеб. пособ. Москва : Теплотехник, 2004. 400 с.
123. 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.
124. 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.
125. 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.

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

127. 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.

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

129. 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.

130. 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.

ДОДАТКИ

Додаток А

Перелік опублікованих праць за темою дисертації

У вітчизняних фахових виданнях:

1. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., **Візер¹А. 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. Здобувач проаналізував існуючі способи та розробив нові підходи до вирішення задачі підвищення ефективності теплообміну в промислових печах.

2. 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. Вип. 13. С. 80 - 84. Здобувач розробив принципову схему дослідної установки та приймав безпосередню участь у проведенні експериментальних досліджень щодо підтвердження можливості керування тепловими потоками електричним полем.

3. 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. Здобувач приймав безпосередню участь у проведенні експериментальних досліджень та розробив математичну модель розподілу температури в печі за наявності електричного поля.

4. 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. Здобувачем проведено розрахунки технічно обґрунтованої напруги в камері пічної установки та виконано оцінку економічної доцільності використання електричного поля в камері газової нагрівальної установки.

5. **Візер А. А.** Щодо недоліків теплової роботи камерних печей. *Металургія: наукові праці ЗДІА*. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2015. № 34. С. 89 - 92. *Здобувачем розраховано тепловий баланс промислової камерної печі та зроблено аналіз її енергоефективності.*

6. 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. *Здобувач розробив план експерименту для визначення раціональних енергетичних параметрів пічної установки, що працює на біогазовій суміші, за наявності електричного поля в її камері.*

7. 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. *Здобувачем в умовах промислового підприємства проведено експериментальні дослідження щодо впливу електричного поля на розподіл теплоти у камерах печей та отримано реальні дані щодо економії споживання природного газу.*

8. 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. *Здобувачем проведено моделювання полів швидкостей пічних газів у камері печі та обґрунтовано можливості створення теплових бар'єрів за рахунок керованих електричних полів у робочих просторах камерних печей з метою підвищення їх енергоефективності.*

У фахових виданнях, які входять до бази Web of Science:

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

Здобувачем розроблено алгоритм управління процесом нагрівання металу у печі з додатковим використанням у якості керуючого впливу електричних полів.

Відкриття та патенти України й інших країн:

10. 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. *Здобувач здійснив патентний пошук та запропонував спосіб термічної обробки металу у камерних печах періодичної дії з використанням електричного поля.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. 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. *Здобувачем представлено математичну модель розподілу температури в печі за наявності електричного поля.*

12. Качан Ю.Г., Коваленко В.Л., **Візер А.А.** Щодо прогнозування розподілу температури за наявності просторового електричного поля 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. *Здобувачем показано виконані дослідження, розрахунки та узагальнено отримані результати.*

13. 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. *Здобувачем виконано аналіз доцільності використання електричного поля в камері газової нагрівальної установки.*

14. 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. *Здобувачем представлено аналіз можливості зменшення споживання природного газу за рахунок утилізації теплоти відхідних газів.*

15. **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. *Здобувачем зроблено аналіз енергоефективності камерних промислових печей.*

16. Чейлітко А.О., **Єрофєєва А.А.** Якісне нагрівання металу у камерній печі. Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference «Scientific Research in XXI Century» Ottawa: Methuen Publishing House, 16 - 18 December 2019. С. 64 - 69. *Здобувач виконав аналіз досліджень, розрахунків та узагальнив отримані результати.*

17. 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. *Здобувач підготував доповідь та провів апробацію роботи.*

18. 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. Здобувач зробив аналіз способів підвищення ефективності споживання природного газу камерними печами.

19. 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. С. 97 - 94. *Здобувачем обґрунтовано можливості створення теплових бар'єрів за рахунок електричних полів у робочих просторах камерних печей.*

20. **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 «ХПІ»: Видавництво «Лідер», 2020. С. 85 - 87. *Здобувачем показано можливість і ефективність використання у якості керуючого впливу нестационарного електричного поля в камері печі.*



Додаток Б

**Економічне обґрунтування використання керованого електричного
поля для підвищення енергоефективності камерних печей**

ЗАТВЕРДЖУЮ
 В.о. головного інженера
 ТОВ «Запорізький титано-
 магнісний комбінат»
 В. О. Зінченко
 «14» 06 2015

ПОПЕРЕДНЯ ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ
 ЗАСТОСУВАННЯ ПРОСТОРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ В КАМЕРІ
 ПЕЧІ ВІДПАЛУ ЦЕХУ №10 ТОВ «ЗТМК»

За методикою [1] запропоновано розрахунок приблизної очікуваної економічної ефективності впровадження просторового електричного поля в камері печі відпалу підприємства на основі даних, отриманих на експериментальній установці.

Усереднене значення питомої витрати газу, виходячи з тривалості циклу нагріву 8 годин, середньої витрати природного газу 81,62 м³/год (1,36 м³/хв.) та кінцевої температури деталей 800°C, визначаємо за формулою:

$$V_r^{nom} = \frac{V_r \cdot \tau}{T_e - T_n} = \frac{1,36 \cdot 480}{(800 - 25)} = 0,84 \text{ м}^3 / 1^\circ \text{C}, \quad (1)$$

де V_r – середня витрата природного газу, м³/хв.;

τ – проміжок часу, за який нагрівали садку металу, хв.;

T – температура, якої досягла садка металу при зазначеній витраті газу без застосування просторового електричного поля, °C.

За діючою зараз ціною на природний газ це дорівнює:

$$Z_r = V_r^{nom} \cdot B_r = 0,84 \cdot 9,507 = 7,99 \text{ грн} / 1^\circ \text{C}, \quad (2)$$

де B_r – діючий тариф на природний газ для промислових підприємств України.

За результатами експериментальних дослідів при напрузі 1000 В додатковий приріст температур склав 90°C. Тоді, приймаємо, що очікуваний приріст температур на печі відпалу буде приблизно таким же. Отже, за рахунок використання просторового електричного поля можна зменшити витрату газу при незмінному температурному режимі за цикл нагрівання:

$$Z_{r1000} = V_r^{\text{ном}} \cdot \Delta T_{1000} \cdot B_r = 0,84 \cdot 90 \cdot 9,507 = 718,73 \text{ грн} \quad \text{або} \quad V_r^{\text{доп}} = 75,6 \text{ м}^3 \text{ газу} \quad (3)$$

Споживання електрообладнанням електричної енергії передбачається у межах до 1 кВт·год, тому її вартістю можна знехтувати.

Відносна економія природного газу за умови підведення напруги у 1000 В складе:

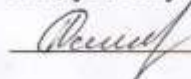
$$\mathcal{E}_{r1000} = \frac{V_r^{\text{ном}}}{V_r \cdot \tau} = \frac{75,6}{1,36 \cdot 480} \cdot 100\% = 11,58\% \quad (4)$$

Висновок: за методикою розрахунку ефективності застосування просторового електричного поля на базі експериментальної нагрівальної установки зроблено аналогічні розрахунки для печі відпалу підприємства. За попередніми розрахунками, очікувана економія природного газу може досягати 12%. Очевидно, що відсоток економії носить приблизний характер і може значно варіюватися для реальних нагрівальних печей в залежності від їх геометричних розмірів, різновиду палива, складу продуктів згоряння, цін і тарифів на енергоресурси, тощо. Остаточні висновки щодо ефективності запропонованого методу підвищення енергетичної ефективності можна буде зробити лише після проведення експериментальних досліджень на печі відпалу підприємства.

Література

1. 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. – Вип. 4. – Київ: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. – С. 14-16.

Завідувач науково-дослідного сектору ЗДІА

 Л. П. Семенова

Завідувач кафедри ЕЕМ ЗДІА

 Ю.Г. Качан

Начальник цеху №10 ТОВ "ЗТМК"

 Г. М. Гончаров

Доцент кафедри ЕЕМ ЗДІА

 В. Л. Коваленко

Аспірант кафедри ЕЕМ ЗДІА

 А. А. Візер

Додаток В
Акти впровадженъ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи НМетАУ

Ю. С. Проїдак

« 10 » вересня 2014р.

АКТ

перевірки адекватності математичної моделі щодо прогнозування температур в нагрівальній пічній установці за наявності в ній просторового електричного поля

Цей акт складений про те, що одержана в Запорізькій державній інженерній академії математична модель пічної установки, що прогнозує розподіл температури в її нагрівальній камері за наявності просторового електричного поля, перевірена на адекватність за вихідними даними, одержаними на відповідній експериментальній установці кафедри промислової теплоенергетики Національної металургійної академії України.

Математична модель дозволяє прогнозувати розподіл температур у нагрівальній камері та приймати рішення щодо керування теплових потоків в ній за допомогою просторових електричних полів.

Встановлено, що середньоквадратична відносна похибка розрахунків не перевищує 3,1 %, що свідчить про адекватність розробленої моделі реальним процесам.

Завідувач кафедрою
промислової теплоенергетики
НМетАУ, д.т.н., професор

М.В. Губинський

Науковий керівник,
зав. каф. енергетичного менеджменту
ЗДІА, д.т.н., професор

Ю. Г. Качан

Доцент кафедри
енергетичного менеджменту ЗДІА,

В.Л. Коваленко

Аспірант кафедри
енергетичного менеджменту ЗДІА

А.А. Візер



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор технічний ТОВ "ЗТМК"

І.А. Сизиков

АКТ

*можливості впровадження методу підвищення енергетичної
ефективності камерних нагрівальних печей за допомогою використання
просторового електричного поля*

Цей акт складений про те, що розроблений метод підвищення енергетичної ефективності нагрівальних печей за допомогою використання просторового електричного поля в їх камері розглянуто, схвалено і може бути впроваджено в умовах ТОВ "Запорізький титано-магнісвий комбінат". За результатами проведених експериментальних досліджень на печах відпалу цеху № 10 за умови використання запропонованої методики можливе скорочення споживання природного газу до 11% у порівнянні з показниками діючої печі без зміни технології процесу відпалу металу.

Запропонований метод підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей може бути використано як інструмент енергоменеджменту підприємства при вирішенні питань енергоефективності вказаного технологічного об'єкту.

Головний енергетик ТОВ "ЗТМК"

О. В. Петрик

Начальник цеху №10 ТОВ "ЗТМК"

Г. М. Гончаров

Науковий керівник,
зав. каф. електротехніки та
енергетичного менеджменту
ЗДІА, д.т.н.

Ю.Г. Качан

Аспірант каф. електротехніки та
енергетичного менеджменту ЗДІА

А.А. Візер

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Директор з енергетики та ремонтів

ПАТ «Дніпропеталь»

к.т.н. О.П. Лютий

«13» 13 20 16 р.

АКТ

впровадження методу підвищення енергетичної ефективності
камерних нагрівальних печей за допомогою використання
просторового електричного поля

Комісія у складі: голови – Балабухи М.С. і членів комісії – представників підприємства: заступників головного енергетика Садовнікова О.С., Шапошнікова О.О. і представників Запорізької державної інженерної академії: Качана Ю.Г. – наукового керівника роботи, д.т.н., проф., Візер А.А. – аспіранта, склала акт про те, що розроблений метод підвищення енергетичної ефективності нагрівальних печей за допомогою використання просторового електричного поля в їх камері може бути використано в умовах ПАТ "Дніпропеталь".

Запропонований метод керування тепловими потоками на основі застосування електричного поля дає можливість більш ефективно нагрівати метал у газових печах без зміни технології процесу і, як наслідок, підвищити енергетичну ефективність печей камерного типу у цілому.

Голова комісії:

Начальник управління
головного енергетика

 М.С. Балабуха

Члени комісії:

Заступник головного енергетика

 О.С. Садовніков

Заступник головного енергетика

 О.О. Шапошніков

Керівник роботи, д.т.н., професор

Ю.Г. Качан

Аспірант

 А.А. Візер



АКТ
впровадження результатів дисертаційної роботи
Єрофєєвої Аліни Анатоліївни
«Підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей
шляхом використання керованих електричних полів»

виконаної у Запорізькому національному університеті (розпочата у Запорізькій державній інженерній академії).

Комісія у складі:

Голова комісії – Банах В.А. – проректор з науково-педагогічної роботи та технічної освіти Запорізького національного університету, д.т.н., професор.

Члени комісії:

Белоконь К.В. – заступник директора з наукової роботи Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, к.т.н., доцент.

Чейлитко А.О. – завідувач кафедри теплоенергетики та гідроенергетики, д.т.н., доцент.

Каюков Ю.М. – доцент кафедри теплоенергетики та гідроенергетики, к.т.н.

Результати дисертаційної роботи Єрофєєвої А.А. впроваджені у навчальний процес кафедри теплоенергетики та гідроенергетики шляхом використання розробленого у дисертаційній роботі способу підвищення енергоефективності камерних нагрівальних печей за умови застосування електричних полів; математичної моделі розподілу температури в нагрівальній камері печі під дією електричного поля, яка дозволяє визначати температуру у місці розташування заготовок та аналізувати процеси теплообміну; алгоритму раціонального управління нестационарним електричним полем у робочому просторі теплотехнічних установок, що дозволяє інтенсифікувати тепломасообмінні процеси.

Результати, отримані в процесі виконання дисертаційної роботи, впроваджені у навчальний процес при викладанні лекційних занять та практичних робіт з дисциплін: «Теплотехнічні процеси та установки», «Основи наукових досліджень в теплоенергетиці та гідроенергетиці», «Математичне моделювання та оптимізація теплотехнічних процесів». Також отримані результати використовуються при виконанні кваліфікаційних магістерських робіт.

Голова комісії

Банах В.А.

ПІБ

Члени комісії

Белоконь К.В.

ПІБ

Чейлитко А.О.

ПІБ

Каюков Ю.М.

ПІБ

В.А. Банах
Підпис

К.В. Белоконь
Підпис

А.О. Чейлитко
Підпис

Ю.М. Каюков
Підпис