

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ДНІПРОВСЬКА
ПОЛІТЕХНІКА»

На правах рукопису

МІЩЕНКО ВЛАДИСЛАВ ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.365.3:621.311

ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
РУДНОТЕРМІЧНИМИ ПЕЧАМИ

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Дисертація на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Науковий керівник
доктор технічних наук, професор
Качан Юрій Григорович

Дніпро – 2024

АНОТАЦІЯ

Мищенко В.Ю. «Підвищення ефективності споживання електроенергії руднотермічними печами». – наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – «Електротехнічні комплекси та системи» – Національний університет «Запорізька політехніка», спеціалізована вчена рада Д 08.080.07 при Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка», Дніпро, 2024.

Метою дисертаційної роботи є розробка заходів щодо підвищення енергоефективності роботи руднотермічної печі при одержанні феросплавів.

Проведений аналіз існуючих математичних моделей круглої трьохелектродної руднотермічної печі, який виявив що кожна з них враховує тільки електричні або теплові процеси, тобто при моделюванні не розглядається питання їх безпосередньої взаємодії.

Запропонована структура математичної моделі, яка складається з окремих логічно завершених блоків, що безперервно взаємодіють між собою, враховуючи протікання всіх фізичних процесів у ванні руднотермічної печі. Математичні розрахунки в них ґрунтуються на законі Ома та лінійних рівняннях теплопередачі згідно гіпотези Фур'є, що значно спрощує розрахунки.

Для вирішення поставлених задач синтезована динамічна комплексна математична модель роботи круглої руднотермічної печі, що реалізована сучасними програмними засобами. Вона дає змогу визначати температурне поле ванни, обсяги споживаної електричної енергії та кількість утвореного розплаву і шлаку впродовж всієї плавки.

Налаштування запропонованої комплексної алгоритмічної моделі на роботу конкретної трьохелектродної руднотермічної печі здійснюється за її геометричними та електричними параметрами, а також за фізичними властивостями шихти.

При проведенні розрахункових експериментів на моделі руднотермічної печі РКЗ-2,5 виявлено, що регламентована кількість розплаву утворюється раніше ніж за існуючої умови завершення плавки, а тому має місце невиправданий його перегрів. Запропоновано у відповідності до результатів розрахунків скоротити тривалість плавки, що дасть змогу в залежності від компонентно-кількісного складу шихти зменшити обсяги споживання електричної енергії в межах 184,8–417,2 тис.кВт·год (2,6–5,9%) на рік.

Проведені дослідження щодо впливу зміни діаметра розпаду електродів на обсяги споживання пиччою електричної енергії. Виявлено, що при розведенні електродів в горизонтальній площині зазначений показник зменшується, однак існують конструктивні обмеження, що пов'язані з максимально допустимою температурою футеровки печі. Якщо конструкція РТП дозволяє змінювати положення електродів, і виставити їх у відповідності до результатів розрахунків, то це призведе до зменшення обсягів споживання електричної енергії ще майже на 20%.

За результатами досліджень сформульовані організаційні та технічні рекомендації, які розглянуті на підприємстві ТОВ «Запорожспецсплав» та взяті ним до впровадження, очікується економічний ефект в межах 1071–9256 тис.грн на рік в залежності від кількості реалізованих заходів енергозбереження.

Ключові слова: руднотермічна пич, комплексна математична модель, енергоефективність, обсяги споживання електричної енергії, питомий електричний опір шихти, розплав.

ABSTRACT

Mishchenko V. Yu. «Increasing the efficiency of electricity consumption by ore-thermal furnaces». – scientific work on manuscript rights.

Dissertation on reception of a scientific degree of the candidate of technical sciences on the speciality 05.09.03 – «Electrotechnical complexes and systems». –

National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Specialized Academic Council D 08.080.07 at Dnipro University of Technology, Dnipro, 2024.

The aim of the dissertation is to develop measures to increase the energy efficiency of the ore thermal furnace in the production of ferroalloys.

An analysis of the existing mathematical models of a circular three-electrode ore-thermal furnace was carried out, which revealed that each of them takes into account only electrical or thermal processes, that is, the question of their direct interaction is not considered during modeling.

The proposed structure of the mathematical model, which consists of separate logically completed blocks that continuously interact with each other, taking into account the flow of all physical processes in the ore-thermal furnace bath. Mathematical calculations in them are based on Ohm's law and linear equations of heat transfer according to Fourier's hypothesis, which greatly simplifies calculations.

To solve the problems, a dynamic complex mathematical model of the operation of a round ore thermal furnace was synthesized, which is implemented with modern software tools. It makes it possible to determine the temperature field of the bath, the amount of consumed electrical energy and the amount of formed melt and slag during the entire melting.

Setting up the proposed complex algorithmic model for the operation of a specific three-electrode ore thermal furnace is carried out according to its geometric and electrical parameters, as well as according to the physical properties of the charge.

During calculation experiments on the model of the RKZ-2.5 ore-thermal furnace, it was found that the regulated amount of melt is formed earlier than under the existing condition of completion of melting, and therefore unjustified overheating of it takes place. In accordance with the results of calculations, it is proposed to reduce the duration of melting, which will make it possible, depending on the component-quantitative composition of the charge, to reduce the amount of electrical energy consumption in the range of 184.8–417.2 thousand kWh (2.6–5.9%) for a year.

Studies have been conducted on the influence of the change in the diameter of the breakdown of electrodes on the amount of electric energy consumed by the furnace. It was found that when the electrodes are separated in the horizontal plane, the specified indicator decreases, however, there are design limitations associated with the maximum permissible temperature of the furnace lining. If the design of the OTF allows you to change the position of the electrodes, and set them in accordance with the results of the calculations, then this will lead to a reduction in the amount of electrical energy consumption by almost 20%.

Based on the results of the research, organizational and technical recommendations were formulated, which were considered at Zaporozhspetsstavl LLC and taken by it for implementation, the economic effect is expected in the range of 1,071–9,256 thousand UAH per year, depending on the number of implemented energy saving measures.

Keywords: ore-thermal furnace, complex mathematical model, energy efficiency, amounts of electrical energy consumption, specific electrical resistance of the charge, melt.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Качан Ю.Г. Щодо змінювання питомого електричного опору шихти під час виплавки високо вуглецевого феромарганцю. / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // МЕТАЛУРГІЯ: Збірник наукових праць. – Запоріжжя: ЗДІА, 2017. – Вип. 2 (38). – С.131-133.

2. Міщенко В.Ю. Щодо проблематики при моделюванні роботи руднотермічної печі. Матеріали XXIII науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Енергетика, електроніка та інформаційні технології. Том III / Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2018. – с. 144

3. Качан Ю.Г. Щодо комплексного підходу при моделюванні роботи руднотермічної печі [Текст] / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко// Металургія : наукові

праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2018. – Вип. 1 (39). – С. 94-96.

4. Міщенко В.Ю. Щодо розтікання струму в об'ємі ванни руднотермічної печі. / В.Ю. Міщенко, Ю.Г. Качан// Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій – Тернопіль 28-29 листопада 2018. ТНТУ ім.. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль, 2018 – Т.3. – с. 33-34

5. Качан Ю.Г. Алгоритм розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі /Ю.Г. Качан, Ю.Б. Ліуш, В.Ю. Міщенко // Вісник ХНУ. – 2018. – № 3 (261). – С. 19-22.

6. Міщенко В.Ю. Моделювання процесу утворення розплаву при одержанні феросплавів у руднотермічній печі. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» – Дніпро 26-28 березня 2019. Міністерство освіти і науки України, Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. – Дніпро: НМетАУ, 2019. – с. 64

7. Kachan Yu. H. Determination of distribution of introduced energy by volume of ore-thermal furnace. / Yu.H. Kachan, V.Yu. Mishchenko// Naukovyi Visnyk NHU. – 2019. – № 3. – 138-145

8. Mishchenko V.Yu. Definition ways of the current spreading process in the internal volume of the ore-thermal furnace./ V.Yu. Mishchenko, Yu.H. Kachan// Electrical Engineering And Power Engineering. – №2. – 2019. – 51-57

9. Качан Ю.Г. Визначення обсягів розплаву та шлаку під час плавки в феросплавній печі / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко// СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №23, (2020). – Дніпро: НМетАУ –ІВК «Системні технології», 2020. – с. 53-62

10. Міщенко В.Ю. Алгоритм для визначення обсягів розплаву та шлаку під час плавки в феросплавній печі. / В.Ю. Міщенко, Ю.Г. Качан// Інформаційні

технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2020: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. (Дніпро, 17 – 19 березня 2020 р.) / Міністерство освіти і науки України, Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. – Дніпро: НМетАУ, 2020. – с. 207-210

11. Качан Ю.Г. Можливості зменшення обсягів електроспоживання руднотермічною піччю. / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №25, (2022). – Дніпро: УДУНТ – ІВК «Системні технології», 2022. – с. 75-84

12. Качан Ю.Г. Визначення інтервалів коливання електричних властивостей шихти та її компонентів в процесі одержання феромарганцю. / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // Тиждень науки-20 Електротехнічний факультет. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 13–17 квітня 2020 р. [Електронний ресурс] / Редкол. :В. В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. –с. 20-22

13. Міщенко В.Ю. Узагальнення алгоритмічної моделі для роботи руднотермічної печі. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2021: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 16 – 18 березня 2021 р.)/ Міністерство освіти і науки України, Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – с. 171-174

14. Качан Ю.Г. Визначення інтервалів щодо можливих значень параметрів шихти при одержанні феросплавів/ Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // Збірник наукових праць ДДТУ № 2(41), 2022. – с. 107-114

15. Міщенко В.Ю. Можливості зменшення обсягів електроспоживання руднотермічною піччю. / В.Ю. Міщенко, Ю.Г. Качан // Інформаційні

технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2022: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 18 травня 2022р.) / Міністерство освіти і науки України, Український державний університет науки і технологій, Дніпропетровський національний університет імені О.Гончара, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» та ін. –Дніпро: НМетАУ, 2022. – с. 140-142

16. Качан Ю.Г. Моделювання роботи круглої трьохелектродної руднотермічної печі з використанням полярних координат./ Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко// Тиждень науки-2022. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 18–22 квітня 2022 р. [Електронний ресурс] / Редкол. :В. В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2022. –с. 293-295

17. Качан Ю.Г. Прогнозування обсягів електроспоживання руднотермічною піччю./ Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко// Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2022). Odesa, Ukraine, May 12, 2022: proceedings. Odesa Military Academy, 2022. p. 46

18. Міщенко В.Ю. Ідентифікація параметрів комплексної моделі руднотермічної печі та її адекватність. /В.Ю. Міщенко // СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №26, (2023). – Дніпро: УДУНТ – ІВК «Системні технології», 2023. – с. 71-83

19. Міщенко В.Ю. Методика забезпечення адекватності комплексної моделі руднотермічної печі. / В.Ю. Міщенко// Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2023: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 22 березня 2023р.) / Міністерство освіти і науки України, Український державний університет науки і технологій, Дніпропетровський національний університет імені О.Гончара, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» та ін. –Дніпро: НМетАУ, 2023. – с. 158-160

20. Міщенко В.Ю. Дослідження можливості підвищення енергоефективності руднотермічної печі шляхом вибору доцільного діаметру розпаду електродів. / В.Ю. Міщенко// Вісник КНУ №57, 2023. – с. 31-37

21. Міщенко В.Ю. Щодо можливості енергозбереження при роботі руднотермічної печі. / В.Ю. Міщенко// Електромеханічні і енергозберігаючі системи – Кременчук: КрНУ, 2023. – Вип. 1/2023 (60). – с. 34-42

22. Mishchenko V. Study of the possibility of implementing complex energy saving measures during the operation of the ore-thermal furnace./ V. Mishchenko// Sciences of Europe №128, – Prague, 2023. – p. 95-99

ЗМІСТ

ВСТУП.....	13
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РУДНОТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ.....	20
1.1. Характеристика процесу отримання феросплавів.....	20
1.2. Конструкції руднотермічних печей.....	25
1.2.1. Конструкції ванни печі.....	25
1.2.2. Конструкції електродотримувачів.....	30
1.2.3. Механізм перепуску електродів.....	32
1.2.4. Конструкції механізмів вертикального переміщення електродів.....	34
1.2.5. Конструктивні можливості щодо розведення електродів.....	36
1.3. Сучасний стан енергоефективності руднотермічних печей.....	37
1.4. Аналіз відомих заходів щодо підвищення енергоефективності печей..	41
1.5. Аналіз існуючих методів дослідження.....	45
1.6. Постановка задач досліджень.....	49
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ТА ОСНОВНИХ БЛОКІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ.....	51
2.1. Аналіз відомих математичних моделей руднотермічної печі.....	51
2.2. Обґрунтування запропонованої структури математичної моделі.....	62
2.3. Синтез функціональних блоків моделі.....	65
2.3.1. Алгоритм розбиття внутрішньої області печі на елементарні об'єми.....	65
2.3.2. Алгоритм визначення шляхів розтікання струму в ванні руднотермічної печі.....	68
2.3.3. Алгоритм розрахунку температурного поля в ванні печі.....	74
2.3.4. Алгоритм процесу утворення та зливу розплаву з руднотермічної печі.....	80
2.4. Висновки за розділом.....	86
РОЗДІЛ 3. ЗАХОДИ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ТА НАЛАШТУВАННЯ	

	11
МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ.....	88
3.1. Взаємодія основних блоків математичної моделі печі.....	88
3.2. Практична реалізація моделі.....	90
3.3. Вхідні данні запропонованої моделі печі.....	103
3.3.1. Характеристика геометричних та електричних параметрів печі за якими налаштовується модель.....	103
3.3.2. Визначення фізичних параметрів шихти за якими налаштовується модель.....	105
3.4. Промислові дослідження задля налаштування математичної моделі печі.....	111
3.5. Методика налаштування та перевірки адекватності запропонованої моделі.....	116
3.6. Висновки за розділом.....	119
РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ФЕРОСПЛАВІВ ЗАДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.....	120
4.1. Вибір методики дослідження.....	120
4.2. Дослідження динаміки утворення розплаву в руднотермічній печі.....	124
4.3. З'ясування впливу діаметру розпаду електродів на кількість спожитої піччю електроенергії.....	129
4.4. Висновки за розділом.....	135
РОЗДІЛ 5. ПИТАННЯ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	137
5.1. Технічно-конструктивні рекомендації при впровадженні результатів досліджень на підприємстві.....	137
5.2. Розрахунок економічного ефекту.....	138
5.3. Використання результатів досліджень в навчальному процесі.....	142
5.4. Висновки за розділом.....	143
ВИСНОВКИ.....	145
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	147

ДОДАТОК А – Акт перевірки адекватності комплексної математичної моделі руднотермічної печі.....	159
ДОДАТОК Б – Акт про практичне використання результатів кандидатської дисертації здобувача Міщенко В.Ю.....	160
ДОДАТОК В – Акт впровадження в освітній процес.....	161

ВСТУП

Актуальність теми. У металургії й деяких інших галузях промисловості використовують феросплави, а також інші технічно чисті метали для розкислення та легування сталі, одержання високолегованих сплавів спеціального функціонального призначення і чавунів. Феросплавне виробництво є однією із тих галузей промисловості, майбутнє якого пов'язано з можливостями енергетичної бази країни. Енергоємність нашої металопродукції більш ніж в 1,5 рази вища, ніж у кращих світових виробників. Все це, а також постійне підвищення цін на енергоресурси гостро поставило питання щодо впровадження нових енергозберігаючих технологій в металургії.

Феросплави виплавляють в руднотермічних печах (РТП) різної конструкції та потужності, електричні і геометричні параметри яких визначаються характером протікаючих в них процесів. Останні є енергоємними і дуже різноманітними. Деякі з них протікають безперервно, а інші функціонують циклічно і потребують повного проплавлення завантажених матеріалів. Найважливішим параметром печі є електричний опір ванни, який залежить від значної кількості факторів: питомого опору шихтових матеріалів, що знаходяться у ній, геометричних розмірів, а також кількості та параметрів електродів.

Відомі на тепер результати проведених на реальних руднотермічних печах складних і вартісних експериментів не дають однозначної і достовірної відповіді які технічні чи технологічні заходи можуть підвищити енергоефективність РТП. Існуючі ж математичні моделі руднотермічної печі не дозволяють провести на них додаткові комплексні дослідження щодо цього так як розглядають окремо питання розподілу електричної та теплової енергії в середині її ванни. Вони не дають змогу отримати повне уявлення про те, що відбувається в печі та шихті впродовж виплавки феросплавів.

Порівняльний аналіз відомих моделей свідчить, що всі вони спираються на метод вторинних джерел, який має ряд суттєвих недоліків.

Тепломасообмінні процеси також розраховуються на основі системи інтегральних рівнянь з певними обмеженнями. Все це призводить до великих обсягів необхідних обчислювальних операцій. Тому в дисертаційній роботі пропонується розробити математичну модель руднотермічної печі з урахуванням всіх виявлених недоліків і в подальшому використати її у розрахункових дослідженнях задля підвищення ефективності електроспоживання зазначеною піччю.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає науковим напрямкам роботи кафедри Електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка» та виконана в рамках науково-дослідної роботи «Розробка та дослідження заходів з енергозбереження в системах електропостачання та електротехнологічних установках» 2018-2021рр. (№ 03718) та «Дослідження енергоефективності та розробка заходів з енергозбереження в системах електропостачання та електротехнологічних установках» 2021-2024рр. (№03711).

Мета і завдання досліджень. Метою дисертаційної роботи є розробка заходів щодо підвищення енергоефективності роботи руднотермічної печі при одержанні феросплавів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- виконати аналіз і систематизацію існуючих моделей руднотермічної печі з метою з'ясування можливості їх удосконалення й подальшого використання задля вирішення поставлених задач енергоефективності;

- розробити комплексну математичну модель РТП, яка враховує взаємодію електричних, теплових та інших процесів, що протікають у ванні печі при виплавці феросплавів та дає можливість вирішувати не тільки проектні задачі, а й аналізувати процес за його перебігом, при цьому бути простою в реалізації;

- ідентифікувати всі вхідні параметри розробленої моделі, а особливо ті, що мають не чіткі значення;

- розробити методикау розрахункових досліджень енергоефективності процесу отримання феросплаву на основі синтезованої комплексної моделі печі;

- виконати дослідження енергоефективності РТП за запропонованою методикою;

- запропонувати практичні заходи, що зможуть зменшити електроспоживання й підвищити таким чином енергоефективність руднотермічної печі.

Об'єкт дослідження. Електричні, теплові та інші фізичні процеси, що відбуваються у ванні руднотермічної печі при виплавці феросплавів.

Предмет дослідження. Показники та параметри роботи печі, що характеризують її енергоефективність.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у дисертаційній роботі завдань використовувались методи з теоретичних основ електротехніки для знаходження кількості енергії, що виділилась в ванні печі внаслідок проходження електричного струму; теплотехніки при розрахунках температурного поля та розподілу енергії внаслідок процесів теплопередачі; теорії ймовірності та математичної статистики для оцінки адекватності синтезованої моделі; загальне застосування розрахункових та інженерних методик дослідження.

Всі розрахунки в роботі виконано з використанням програмного забезпечення *Python*, а візуалізація отриманих результатів через експорт даних за допомогою бібліотеки *SolidPython* в *OpenSCAD*.

Наукові положення

- Використання тривалості плавки, за якої буде отримана розрахована за допомогою запропонованої моделі необхідна кількість феросплаву, у якості показника щодо закінчення процесу, на відміну від існуючого показника – нормованого обсягу спожитої електроенергії, дозволяє зменшити витрату останньої на 2,6-5,9% в залежності від компонентно-кількісного складу шихти й цим суттєво підвищити енергоефективність печі.

- Використання у якості можливого впливу на процес отримання феросплаву діаметра розпаду електродів дозволяє швидше й більш рівномірно за зонами печі розігрівати шихту до необхідної температури й досягати додаткового скорочення плавки на 9,4-16,5% і, як наслідок, зменшити обсяг споживання електричної енергії.

Наукова новизна отриманих результатів:

- Вперше розроблена комплексна математична модель роботи круглої руднотермічної печі, в якій врахована взаємодія електричних і теплових процесів у динаміці, що дозволяє визначати обсяг спожитої електроенергії та кількість утвореного розплаву й шлаку за перебігом плавки;

- Вперше запропоновано параметри моделі, значення яких залежать від складу шихти і температури й змінюються в процесі плавки, а отже, не можуть бути з достатньою точністю ідентифіковані за існуючих методів, визначати і корегувати за результатами розв'язання оптимізаційної задачі щодо величини мінімальної середньоквадратичної похибки прогнозу при всьляко можливих у попередньо встановлених межах значеннях цих параметрів.

- На відміну від існуючого показника закінчення процесу виплавки феросплаву – нормованої кількості спожитої електроенергії, запропоновано використовувати інший – кількість отриманого розплаву, що сприяє запобіганню перегріву останнього і дозволяє зменшити обсяг спожитої електричної енергії;

- Вперше на комплексній математичній моделі роботи руднотермічної печі проведені дослідження щодо впливу зміни діаметру розпаду електродів на енергоефективність її роботи, що, на відмінну від попередньо проведених на фізичних моделях, дозволили врахувати додаткові фактори, такі як: компонентно-кількісний склад шихти; максимально допустиме значення температури розплаву в зоні футерування; реальну геометрію діючої РТП й дає можливість визначати найбільш доцільне значення зазначеного діаметру в кожному конкретному випадку.

Обґрунтованість і достовірність результатів дисертаційної роботи.

Наукові положення і висновки дисертації обґрунтовані коректністю прийнятих допущень відносно характеру задач щодо підвищення енергоефективності печі, які вирішувались.

Практична цінність отриманих результатів.

Розроблена та реалізована в програмному продукті математична модель руднотермічної печі дозволяє з достатньою для практики точністю прогнозувати кількість утвореного розплаву й необхідну для цього тривалість плавки та обсяг спожитої впродовж останньої електричної енергії.

Визначення необхідної тривалості плавки на основі проведеного розрахункового дослідження з урахуванням використаного компонентно-кількісного складу шихти дозволяє зменшувати обсяг спожитої піччю електроенергії в межах 2,6-5,9% у порівнянні з базовим варіантом.

За результатами досліджень сформульовані організаційні та технічні рекомендації, які розглянуті на підприємстві ТОВ «Запорожспецсплав» та взяті до впровадження, очікується економічний ефект в межах 1071–9256 тис.грн на рік в залежності від реалізованого заходу енергозбереження.

Матеріали дисертаційної роботи впроваджені у навчальний процес для студентів, що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітніми програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент», й дають можливість значно покращити його результативність за рахунок використання реальних прикладів підвищення енергоефективності конкретного технологічного процесу і кількісної оцінки обсягів економії електроенергії.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. Здобувач самостійно сформулював завдання дослідження, наукову новизну одержаних результатів, виконав аналіз та систематизацію існуючих моделей руднотермічних печей, запропонував структуру нової моделі, провів розрахункові дослідження щодо підвищення енергоефективності руднотермічної печі.

У роботах опублікованих у співавторстві авторові належать такі наукові результати: в роботі [57] – планування та проведення експериментів; в роботі [52] – проаналізовані основні проблеми при моделюванні роботи руднотермічної печі та запропонований новий підхід у цьому питанні; в роботі [55] – запропонований підхід у визначенні можливих шляхів розтікання струму у ванні печі; в роботі [58] – розроблена методика визначення розподілу введеної електричної енергії; в роботі [61] – запропоновані розрахункові формули для визначення кількості утвореного розплаву та шлаку; в роботі [62] – розроблений алгоритм визначення температурного поля ванни печі; в роботі [50] – розроблений узагальнений алгоритм роботи руднотермічної печі в динаміці; в роботі [77] – визначені діапазони коливання значень різних параметрів шихти.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи обговорювались на наступних конференціях: VII міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів. «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 28-29 листопада 2018р.); XXIII науково-технічна конференція студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Енергетика, електроніка та інформаційні технології. (м. Запоріжжя, 2018р.); Міжнародна науково-технічна конференція «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (м. Дніпро, 26-28 березня 2019р.); Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2020: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції імені професора Михальова О.І. (м. Дніпро, 17 – 19 березня 2020 р.); Університетська конференція «Тиждень науки-2020» ЗНТУ, електротехнічний факультет. (м. Запоріжжя, 13–17 квітня 2020 р.); Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2021: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 16 – 18 березня 2021 р.); Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ІТММ'2022: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 18 травня 2022р.); Тиждень науки-2022. Тези доповідей науково-практичної конференції,

(м. Запоріжжя, НУ «Запорізька політехніка», 18–22 квітня 2022 р.); Electrical and Power Engineering and Electromechanics (EPEE 2022). (Odesa May 12, 2022); Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні. ITMM'2023: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (м. Дніпро, 22 березня 2023р.).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 22 роботи, з яких 10 тез до матеріалів конференції та 12 статей (4 одноосібні), які опубліковані у журналах, що включені до переліку фахових видань України в тому числі 1 із них до міжнародної науко метричної бази Scopus та 1 у закордонному виданні країни (Чехія) яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку та/або Європейського Союзу.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається з анотації двома мовами, вступу, п'ятьох розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації 161 сторінок, основний текст – 127 сторінок, з них 38 рисунків по тексту; 20 таблиць по тексту; список використаних джерел інформації з 90 найменувань на 11 сторінках; 3 додатки на 3 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РУДНОТЕРМІЧНИХ ПЕЧЕЙ

1.1 Характеристика процесу отримання феросплавів

У виробництві феросплавів характерна різноманітність технологічних прийомів. Це викликано різними фізико-хімічними властивостями елементів, що входять до складу отриманої продукції та її призначенням. Найбільш важливими факторами, що визначають вибір прийнятого способу та технології є хімічний склад феросплаву та техніко-економічні показники його виробництва.

В історичному аспекті отримання феросплавів і технічно чистих металів визначені основні способи вилучення необхідних елементів з руд та концентратів, які застосовуються й дотепер. До них відносяться: 1) електропічний; 2) металотермічний; 3) доменний; 4) електролітичний; 5) інші спеціальні методи.

Електропічний спосіб заснований на використанні дугових електричних печей, в яких тепло виділяється при проходженні струму через газовий проміжок і шихтові матеріали, що мають високий електричний опір. Він характеризується отриманням високих температур в області горіння електричних дуг, хімічною нейтральністю джерел тепла, здійсненням процесу з будь-яким складом газової фази (відновної, окисної, нейтральної) та у вакуумі, а також можливістю легко та швидко змінювати потужність установки з повною автоматизацією її роботи.

Металотермічний спосіб передбачає використання тепла хімічних реакцій оксидів кремнію і алюмінію, що відновлюються. Ці процеси із використанням останнього можуть проводитися і без підведення електричної енергії, хоча останніми роками задля інтенсифікації процесу більшість таких технологій передбачає попереднє розплавлення шихтових матеріалів (оксидів) у дугових електричних печах. При цьому зменшується кількість використаних

відновників й відбувається більш повне вилучення провідних елементів із шихти в метал.

Металотермічні методи виробництва феросплавів, сплавів та технічно чистих металів поділяються залежно від типу використаного відновника (алюмінотермія та силікотермія). Іноді використовуються одночасно кілька з них. Феросплави, сплави та метали, виплавлені металотермічним методом, характеризуються низьким вмістом вуглецю та інших домішок. При цьому легко отримуються сплави з низьким вмістом заліза на основі хрому, титану, нікелю та інших металів. Ці процеси характеризуються високим вилученням провідних елементів, невеликими капітальними витратами на будівництво цехів і придбання необхідних установок.

Металотермічним методом одержують кілька десятків різних феросплавів. При цьому використовуються різні варіанти апаратного здійснення процесу: позапічна плавка на блок, плавка з випуском шлаку і металу, електропічний процес з попереднім розплавленням оксидів і флюсів, що відновлюються, металотермічний переплав і т.д. В даний час метод дозволяє повніше використовувати відвальні шлаки в вогнетривкій, сталеплавильній, будівельній галузях промисловості.

Електролітичний спосіб заснований на електролізі водних розчинів або розплавлених солей і використовується для отримання особливо чистих металів. Він пов'язаний з витратою значної кількості електроенергії та необхідністю використання особливо чистих матеріалів.

Доменне виробництва дозволило вперше отримати необхідні феросплави (з Mn, Si і Cr), але воно вимагає великої кількості високоякісного коксу. При цьому сплави, що отримуються, містять багато вуглецю. У доменних печах нині виплавляють лише високовуглецевий феромарганець.

Збільшення потреби у феромарганці призвело до необхідності використання бідних руд виробництва й застосуванням у процесі надпотужних рудовідновлювальних печей типу РПЗ-63. Для порівняння витрата коксу на 1т сплаву при виплавці його в електропечі становить 450-500 кг, а у деяких 1700-

1800 кг. А це, звісно, визначає і його меншу собівартість. Поліпшення техніко-економічних показників процесу виробництва феромарганцю та інших сплавів забезпечується завдяки використанню попередньо відновлених і нагрітих шихтових матеріалів, а також дешевих і недефіцитних видів вуглецевого відновника (напівкоксу, газового вугілля та ін.)

В останні роки отримали розвиток спеціальні методи одержання та рафінування розплавів у вакуумних печах опору, індукційних печах та в конвертерах. Вони дозволяють виробляти з особливо низьким вмістом вуглецю ($\leq 0,03-0,01\%$), кисню, водню та неметалічних включень, азотовані феросплави з хромом, марганцем, ванадієм і т.д.

Феросплавні процеси поділяються на безперервні та періодичні. Перші характеризуються постійним завантаженням шихти в руднотермічну електропіч із закритим колошником і періодичним (або безперервним) випуском металу та шлаку. При цьому рівень шихти в печі не змінюється протягом усього процесу. Електроди постійно занурені в шихту. Використовують для цього печі великої одиничної електричної потужності (16,5-81 МВА), а як відновник застосовують вуглецеві матеріали. Плавка ведеться із закритим шихтою колошником, а в печі знаходяться тверда шихта, рідкий оксидний та металевий розплав. Колошником називають верхній шар шихти, що знаходиться в печі і розташований при безперервному процесі, як зазначалося раніше, на одному і тому рівні. По мірі опускання шихти ведеться підсипання її до електродів. Довкола останніх шихта розташовується конусом. Верхній рівень конуса на 0,3-0,5 м вище за рівень шихти на периферії колошника.

Під час роботи печі у результаті відновлення оксидів шихти вуглецем утворюється велика кількість його окису, вміст якого в газовій фазі становить 80-95%. Через його вихід в деяких місцях колошника можуть утворитися «свищі», які потрібно відразу ж засипати свіжою шихтою.

При роботі печі із закритим колошником загальний електричний струм, що проходить через електроди, складається із струму електропровідності шихти та струму електричної дуги – низькотемпературної плазми. При

безперервному процесі дуга може мати великий розмір, і значна частина струму проходить через іонізований газовий проміжок.

Розміри газового утворення навколо нижнього (робочого) кінця електрода залежать від розподілу струму між шихтою та електричною дугою. Чим менший електричний опір шихти, що знаходиться в печі, тим більший струм проходить через неї від одних електродів до інших (у печі з трьома електродами), а також до вуглецевих блоків, розташованих у стінах печі й розплаву шлаку і металу, що знаходяться на її подині.

У свою чергу електричний опір шихти залежить від кількості вуглецевого відновника в останній, а також від температури й кількості рідкої фази в ній. Чим вище температура плавлення мінеральної частини шихти і менша кількість рідкої фази в ній (при постійному співвідношенні вуглецевого відновника та оксидної частини за масою), тим більша частка електричного струму проходить через газове утворення навколо електрода. Форма та розміри цього утворення залежить також, як зазначено вище, від температури й кількості рідкої фази в мінеральній частині шихти [1].

Перевагою безперервних процесів є раціональне використання тепла, що одержується за рахунок електричної енергії у ванні печі. Втрати останнього у деякому випадку практично відсутні через те, що розплави оксидів та металу завжди закриті шаром шихти. При цьому тепло відхідних газів частково витрачається на нагрівання шихтових матеріалів, в результаті чого в шихті йдуть процеси видалення летких речовин, гідратної та гігроскопічної вологи, починаються процеси відновлення оксидів у твердих фазах, забезпечуються теплом ендотермічні реакції, що протікають на поверхні вуглецевого відновлення при контакті нижчих оксидів елементів.

Безперервні процеси здійснюються в основному в закритих і герметичних печах, обладнаних склепінням, що забезпечує уловлювання та очищення отриманого газу (85-90% CO). Цей колошниковий газ з високою теплоотою згоряння може використовуватися ще й як паливо та газовідновник для попереднього нагрівання шихти в окремих агрегатах (зазвичай у трубчастих

печях), отримання з СО хімічних продуктів (бензину), а також для випалу вапняку.

Періодичні процеси ведуть із використанням певної кількості шихтових матеріалів, призначених для однієї плавки. Завантажена в піч шихта повністю проплавляється із відновленням оксидів провідних елементів. Випуск готової продукції (металу та шлаку) ведуть періодично і зазвичай одночасно.

Електропічні процеси поділяються ще на безшлакові та шлакові. Відносну кількість шлаку при виробництві феросплавів визначають або у відсотках до маси металу, або за його кратністю, тобто за співвідношенням зазначених продуктів. До перших з зазначених процесів відносять виплавку феросплавів, при яких кількість отриманого шлаку незначна. Вона дорівнює лише 3-5% від маси металу (наприклад, кристалічного кремнію, феросиліцію, силікоалюмінію). У цьому випадку шлак утворюється оксидами, що містяться в незначних кількостях у рудах, концентратах, золі коксика і не відновленими під час плавки елементами.

Шлакові процеси супроводжуються утворенням значної кількості шлаку, кратність якого може становити 1,2-1,5 при виплавці високовуглецевого феромарганцю й силікомарганцю та 2,5-3,5 ферохрому та металевого марганцю силікотермічним способом.

Отримання феросплавів при періодичному процесі найчастіше ведуть флюсовим методом, хоча за певних умов доцільна й безфлюсова плавка. Введення флюсу знижує активність SiO_2 в шлаку, що призводить до збільшення виходу металу, який відновлюється. У якості флюсів використовуються матеріали, з вмістом CaO , MgO та інших компонентів, що утворюють найбільш міцні хімічні сполуки з оксидами – продуктами реакцій відновлення. При цьому зменшується в'язкість шлаку, знижується (або підвищується) температура його плавлення, зменшується концентрація в феросплаві домішок, що призводить до повного вилучення провідного елемента і підвищення якості феросплаву.

Можлива електропічна плавка і безфлюсовим методом. При цьому знижується витрата електроенергії та збільшується продуктивність печі, але ступінь відновлення провідного елемента зменшується. Шлак містить значну кількість оксидів провідного елемента і його потім зазвичай використовують для виплавки феросплавів, вуглецевим способом. При цьому зменшується витрата флюсу та підвищується наскрізне використання основного елемента. Однак безфлюсовий спосіб може бути здійснений лише при використанні високоякісних руд та концентратів з низьким вмістом фосфору й інших домішок. Вибір тієї чи іншої технології плавки (із додаванням флюсу в шихту чи без нього) визначається кількістю можливого отримання феросплаву, його собівартістю [2,3].

1.2 Конструкції руднотермічних печей.

1.2.1 Конструкції ванни печі.

Конструкцію руднотермічних печей розглянемо на прикладі двох їх різновидів — прямокутної нерухомої та круглої обертової.

Конструкція першої з них шести електродної показана на рисунку 1.1. Вона застосовується для плавки мідних та нікелевих руд.

Фундамент цієї печі виконаний у вигляді залізобетонних стовпів 1, на які укладені двотаврові балки, а на них литі чавунні плити. На останні спирається подина 2. Футерування ванни і стін 3 виконана з хромомagneзитової цегли із зовнішнім теплоізоляційним шаром з шамоту. У футерування стін вмонтовані водоохолоджувані кесони. Кладка ванни та стін укладена в охопленій каркасом кожух із листової сталі товщиною 20-25 мм. Він складається з вертикальних колон 19, пов'язаними поздовжніми балками і поперечними пружними стяжками 5.

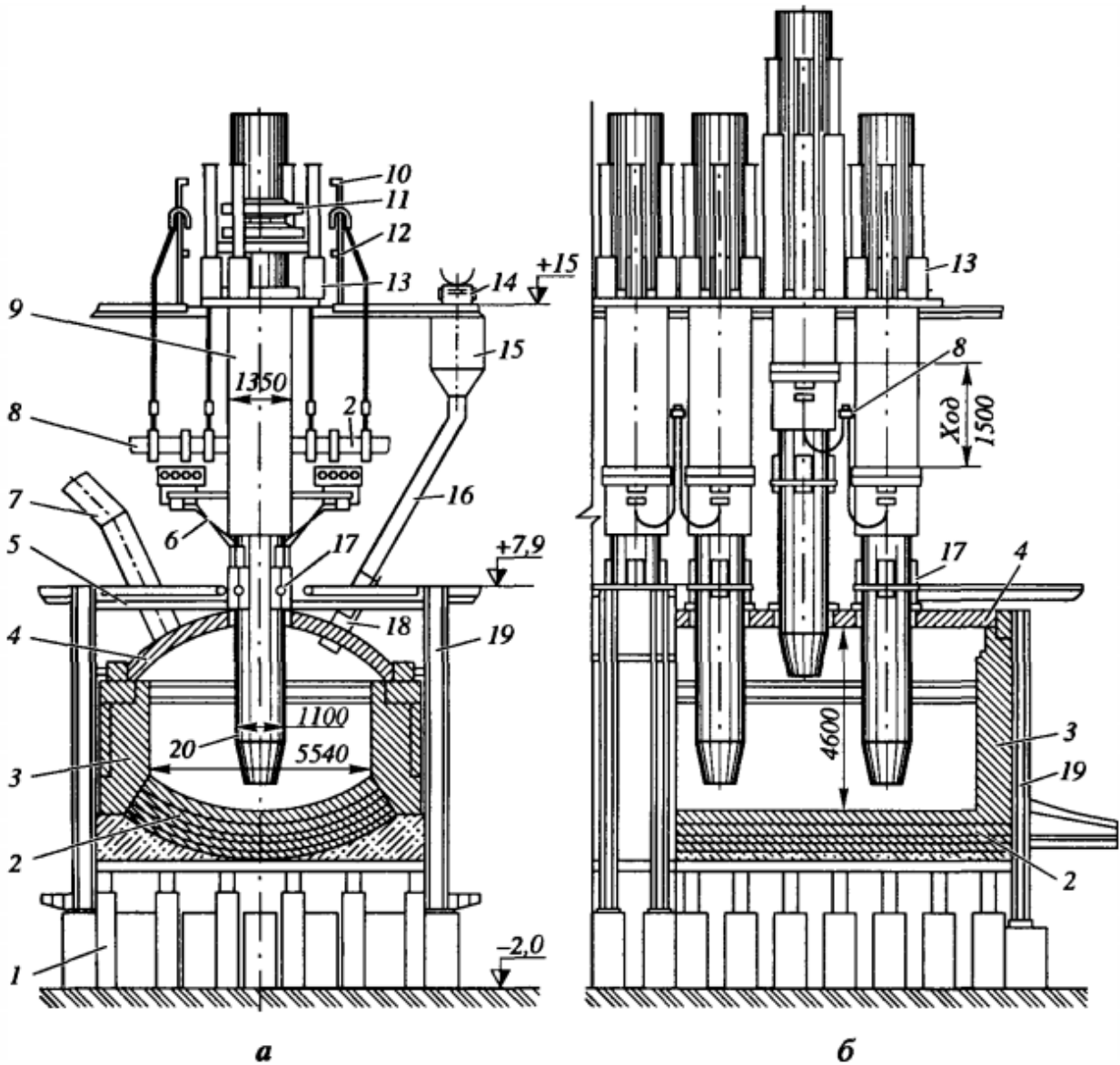


Рис. 1.1. Прямокутна шестиелектродна руднотермічна піч для плавки мідно-нікелевої сировини

Арочне склепіння 4 арочне з шамотної цеглини або жароміцного бетону спирається на під'ятові балки, покладені на поздовжні стіни печі. У склепінні є шість отворів для електродів 20, розташованих уздовж поздовжньої осі печі; 36 отворів з двох сторін від електродів для завантажувальних труботечок 16 і шість отворів 7 діаметром 1 м для газовідведення (для печі довжиною 22-23,5 м та шириною 6-6,5 м).

Застосовуються самоспікаючі електроди діаметром 1100 мм, які забезпечені несучим циліндром 9, механізмами переміщення 13 і перепуску 11

електродів, електротримувачем з контактними щоками 17. Електроенергія до електродів надходить від двох трифазних або трьох двофазних трансформаторів через шинопакет 8 та гнучкі шини 7. Переміщення електродів обмежують кільцеві переривники 10 і 12.

Шихта подається конвеєром 14 спочатку в пічні бункери 15, а далі трубами 16 через сталеві або чавунні мундштуки 18 у піч. Гази з простору у підсклепіння відводяться через футерований газохід 7 у систему газоочищення. Шлак та штейн випускають через кесоновані шпурові отвори (льотки), розташовані на різних рівнях протилежних торцевих стін.

На рисунку 1.2 показана конструкція круглої закритої обертової руднотермічної печі потужністю 33МВ-А (РКЗ-33). Основні розміри деяких потужних рудовідновлювальних печей наведені нижче.

Кожух таких печей виконують із листової сталі товщиною 15—30 мм і підсилюють з зовні вертикальними ребрами та горизонтальними поясами жорсткості, а його днище має плоский вигляд. До верху кожуха також закритих печей приварено кільцевий жолоб пісочного затвора.

Футерування верху стін роблять з шамоту, а для їх низу і поду матеріал футерування вибирають в залежності від складу продуктів плавки. Так, при отриманні кремнієвих сплавів і вуглецевого феромарганцю це можуть бути вугільні блоки, а для виплавки вуглецевого ферохрому – магнезитова цегла.

У більшості феросплавних печей робочим шаром футеровки служить так званий гарнісаж, тобто настил, утворений з руди, що проплавляється, шлаку й сплаву. Для зазначених печей характерна значна товщина подини (до 2,5 м), при якій забезпечується велика теплова інерція та полегшуються умови збереження стійкої температури у плавильній зоні при короткочасних простоях.

Особливе значення має склепіння печей. Якщо останні будувалися раніше, то через колошник у них з відхідними газами виділяється багато тепла, що викликає нагрівання обладнання і ускладнює роботу персоналу. Крім того, над піччю марно згоряє СО, що міститься у цих газах. Зазначені недоліки й усуває неповністю склепіння, що зазвичай охолоджується водою.

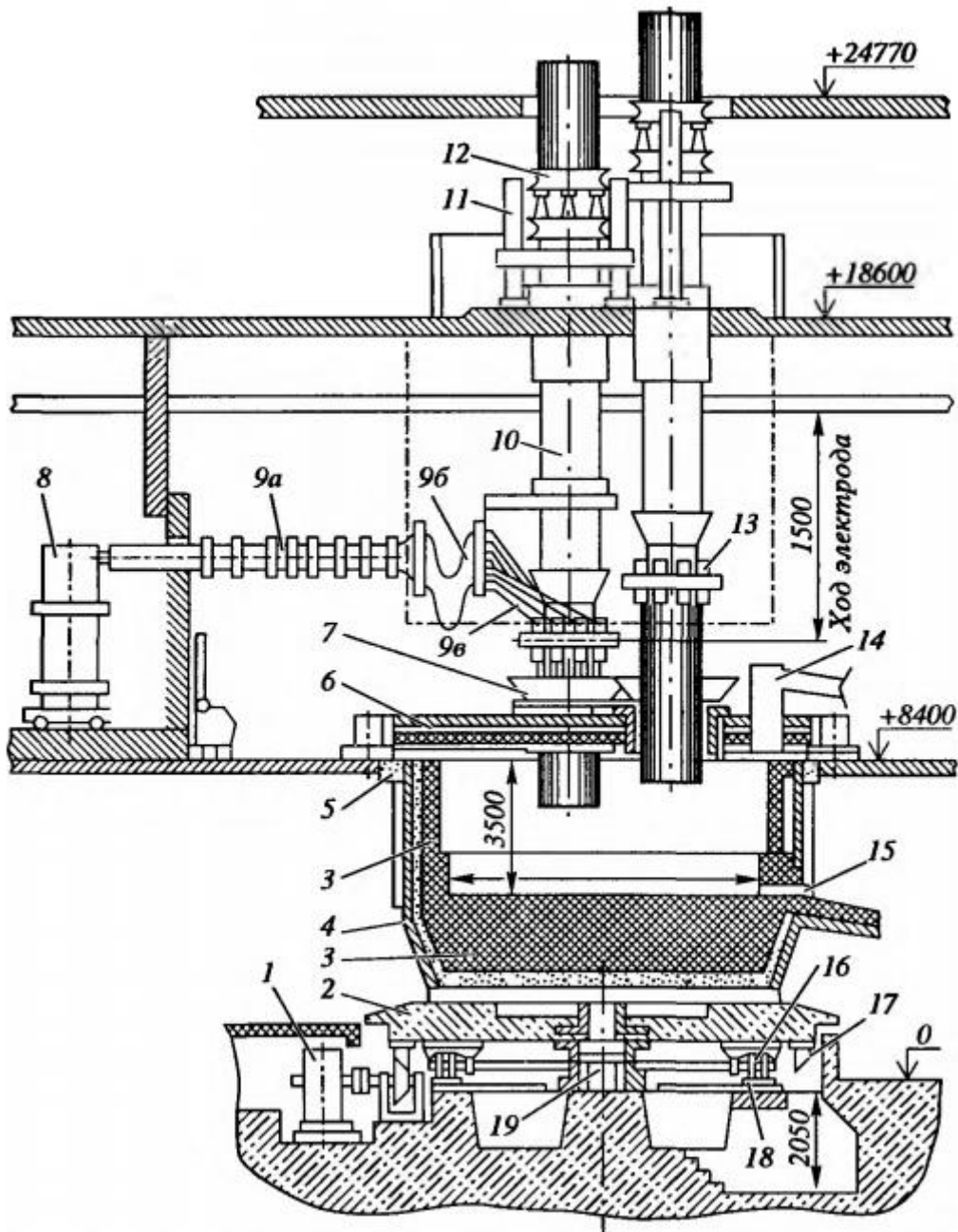


Рис. 1.2. Кругла закрыта обертова руднотермічна піч потужністю 33

МВ·А

1 - редуктор механізму обертання ванни; 2 - залізобетонна плита; 3 - футерування; 4 - кожух; 5 - кільцевий жолоб пісочного затвора; 6 - склепіння; 7 - завантажувальна вирва; 8 - трансформатор; 9 (9а, 9б, 9в) - коротка мережа; 10 - несучий циліндр; 11 - механізм переміщення електрода; 12 - механізм перепускання електрода; 13 - контактні щоки; 14 - газохід; 15 - льотка; 16 - ходове колесо (ролик); 17 - зубчастий конічний вінець; 18 - кругова рейка; 19 - підшипникова опора

Воно ж складається з шести секцій – плоских металевих коробок (кесонів), які монтують у склепінне кільце. Знизу таке склепіння футерується вогнетривким бетоном і має три отвори для електродів та деяку кількість для завантажувальних воронок. Також два отвори для відведення до газоочистки пічних газів та розміщення проти вибухових клапанів. А воно при попаданні повітря може вибухнути. У закритих печах передбачене ущільнення між склепінням та ванною у вигляді пісочного затвора.

Піч своїм днищем через двотаврові балки спирається на залізобетонну плиту 2, а вже вона – на ходові колеса і кругову рейку, яка закладена в фундамент. Обертання печі здійснюється приводом через зубчастий конічний вінець 17, закріплений на залізобетонній плиті 2. Горизонтальному зміщенню плити запобігає центральна опора 19 зі сферичним роликопідшипником. Зазначений механізм обертання ванни, який відповідає показаній на рисунку 1.2 печі, представлений на рисунку 1.3. Взагалі ж на різних печах вони відрізняються між собою.

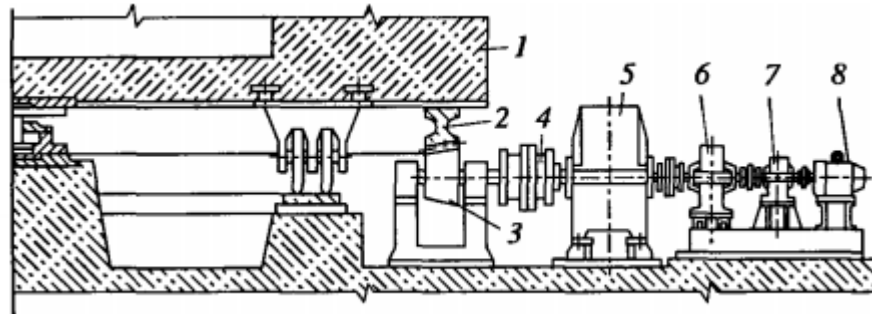


Рис. 1.3. Механізм обертання ванни рудновідновлювальної печі

Тут до залізобетонної плити 1 болтами прикріплений зубчастий вінець 2, який щеплюється з конічною зубчастою шестернею 3. Обертання останньої через сполучні муфти 4 та три двоступінчастих редуктора 5, 6, 7 забезпечує електродвигун постійного струму 8. Завдяки шестерні 3 та вінцю 2 плити 1 ходові колеса 9 котяться по круговій рейці 10.

Литий конічний зубчастий вінець виготовляють із окремих секцій, які збирають після їх обробки на відповідних верстатах. Кругову рейку виготовляють також із окремих сталевих профілів квадратного перерізу.

1.2.2. Конструкції електродотримувачів.

Електроди рудовідновлювальних печей підвішені (затиснуті) у двох місцях - вгорі в кільцях затискного механізму перепуску електродів і внизу в електродотримувачі. Останній призначений для підведення струму до електрода, його затиснення та переміщення за вертикаллю. На рисунку 1.4 показаний електродотримувач з електродом, що самоспікається.

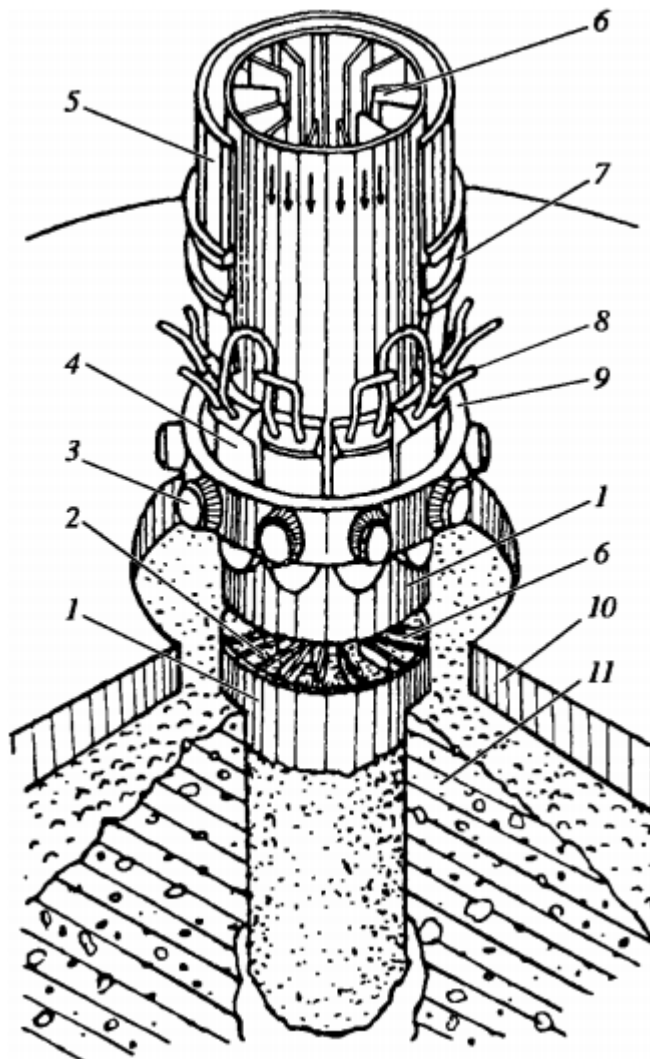


Рис. 1.4. Електродотримач і електрод, що само спікається

1 - кожух електрода; 2 - електродна маса; 3 - натискний пристрій; 4 - контактна щока; 5 - несучий циліндр; 6 - ребра; 7 - траверса несучого циліндра; 8 - трубка підведення струму та води; 9 - натискне кільце; 10 - склепіння печі; 11 – шихта.

Електродотримувач складається з несучого циліндра 5, восьми контактних щік 4 і натискного кільця 9, забезпеченого затискачами 3. Несучий циліндр (мантель), що забезпечує підвіску (затискач) і переміщення електрода, виготовлений зі сталевого листа товщиною 10-16 мм. Його діаметр перевищує діаметр електрода на 150-200 мм, тож в проміжок між ними зверху вентилятором подається повітря. Знизу циліндр закінчується кільцевою траверсою 7, до якої підвішені натискне кільце та контактні щоки. Притискання цих (восьми) контактних щік до електрода здійснюють за допомогою затискачів 3 кільця 9.

Струм до щік підводять мідними водоохолоджуваними трубками. Щоки відливають із міді та сплавів з міддю — бронзи чи томпака, які мають малий питомий електричний опір і високу теплопровідність. Щоки роблять порожнистими або із залитими всередині трубками для протікання охолоджувальної води. Натискне кільце також водоохолоджується, його відливають з немагнітної сталі або бронзи.

Самоспікаючийся електрод має кожух зі сталевого листа з вертикальними ребрами у який зверху й засипають електродну масу. При опусканні такого електрода остання нагрівається і під щоками спікається, маючи в подальшому властивості звичайного вугільного електрода.

Деталі пристрою електродотримача показано на рисунку 1.4. Для підвіски натискного кільця 5 до траверси 9 несучого циліндра використані труби 6, а для підвіски щік 2 – тяги 8. Задля притискання щік до електрода 1 раніше застосовували затискачі типу «натискний гвинт-гайка» з ручним регулюванням сили затиску. Зараз же застосовують наповнені маслом сільфони 4, які

створюють дистанційно регульоване зусилля затискання. Останнє передається на щоки через бугелі 3. При відсутності тиску затискання припиняється.

На ділянці між траверсою 9 і кільцем 5 іноді встановлюють порожнисті водоохолоджувальні плоскі екрануючі коробки 7, що охоплюють електрод по всьому периметру перерізу.

1.2.3. Механізм перепуску електродів.

По мірі згоряння електродів виникає необхідність їх перепуску, тобто опускання їх донизу відносно контактних щік. Механізм, який застосовується на сучасних печах задля цього (рисунок 1.5) складається з двох затискних кілець 16 і 19 і трьох або чотирьох гідроциліндрів 17. Нижнє затискне кільце 16 закріплено на траверсі 13, приєднаній до верху несучого циліндра 11, а верхнє 19 – спирається на штоки 18 гідроциліндрів 17, закріплених на нижньому кільці. Кожне з цих кілець містить по шість однакових пружинно-гідролічних затискачів. Електроди затискаються пружинами 22, які упираючись одним кінцем в корпус 24 гідроциліндрів, жорстко закріплених на затискному кільці, іншим кінцем через бугелі 21 тиснуть на гумові (для підвищення коефіцієнта тертя), шарнірно підвішені до кільця щоки 20.

Перепускають електрод наступним чином. У вихідному положенні пружини затискають електрод. Верхнє затискне кільце знаходиться у нижньому положенні. При включенні магніту двопозиційного золотника 34 масло з напірної лінії подається трубопроводами через гнучкі шланги 26 під плунжери 25 гідроциліндрів 24. Плунжери, висуваючись із гідроциліндрів, за допомогою тяг 23 відводять бугелі 21 від щік 20, вивільняючи електрод 1. При цьому пружини 22 стискаються.

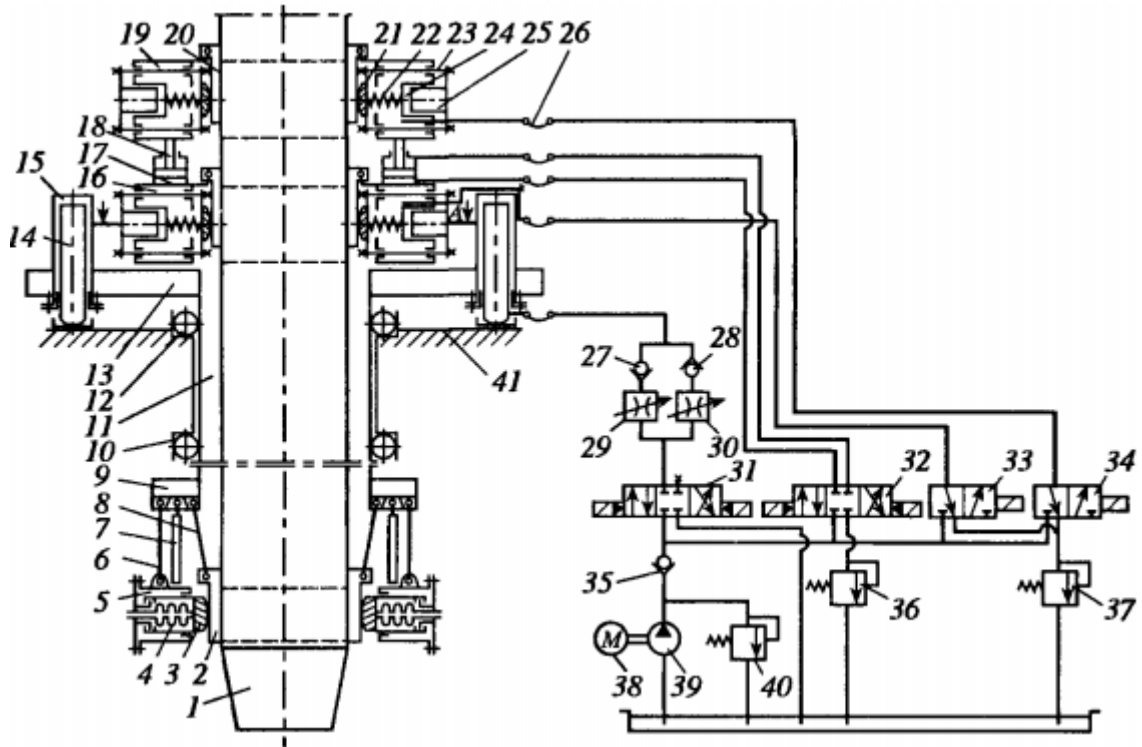


Рис. 1.5. Схема гідравлічного механізму переміщення та перепуску електрода

Далі піднімають верхнє кільце 19. При спрацьовуванні трипозиційного золотника 32 масло подається в поршневі порожнини гідроциліндрів 17. Після цього поршні 18 висуваються, піднімаючи кільце 19, а зі штокових порожнин гідроциліндрів 17 витісняється масло на злив через золотник 32 і підпірний клапан 36. Потім затискають електрод у кільці 19, знеструмуючи керуючий соленоїд золотника 34, його повертають у вихідне положення і тим самим сполучають порожнини гідроциліндрів 24 зі зливом. Після цього пружини 22 затискають електрод. (Підпірний клапан 37 дозволяє утримувати робочу рідину в трубопроводах, забезпечуючи цим працездатність системи).

Далі розтискають затискачі нижнього кільця 16 та електродотримувача. Для цього включенням двопозиційного золотника 33, аналогічного золотнику 34, стискають пружини нижнього кільця 16, звільняючи електрод і знімають тиск у силофонах 4 електродотримувача. Після цього опускають верхнє кільце 19 електрода, для того реверсивний золотник 32 включається в протилежному щодо попереднього напрямку. Робоча рідина надходить у штокові порожнини

17 гідроциліндрів, завдяки чому верхнє затискне кільце з електродом опускається вниз на величину ходу гідроциліндра 17. З поршневої порожнини циліндрів 17 робоча рідина через золотник 32 і підпірний клапан 36 зливається в бак. По закінченню перепуску затискають електрод у нижньому кільці та в електродотримувачі. Для цього циліндри нижнього затискного кільця через золотник 33 з'єднують зі зливом, і пружини знову затискають електрод, а сильфони 4 подають масло під тиском, внаслідок чого сильфони затискають електрод в електродотримувачі.

Керують регулярним перепуском електродів дистанційно з пульта управління печі. Положення верхнього кільця механізму перепуску контролюють за станом відповідних сигнальних ламп. При нормальному ході печі все це здійснюється 2-3 рази на добу й триває кілька хвилин.

У процесі перепуску електрода при звільненні пружин одного із затискних кілець небажано щоб електроди опускались під дією власної ваги, так як при цьому підвищується стирання щік 2 і 20. Тому електрод повинен постійно утримуватися у заповненому стані під дією затискного зусилля пружин електродотримувача і тільки одного затискного кільця.

1.2.4. Конструкції механізмів вертикального переміщення електродів.

У попередньо розглянутому механізмі верхня траверса 13 несучого циліндра жорстко з'єднана з двома або трьома рухомими гідроциліндрами 15, які переміщуються за нерухомими плунжерами 14. Останні своїми сферичними (з метою кращого самоналаштування при перекосах) головками впираються в опорні склянки, встановлені на перекритті. Для підйому електродів в гідроциліндр 15 через зворотний клапан 35, реверсивний трьохпозиційний золотник 31, дросель 29 і зворотний клапан 27 насосом 39 (з приводом від електродвигуна 38) подається робоча рідина. При цьому зазначені гідроциліндри рухаються вгору за плунжерами 14 разом з циліндрами та електродами. Для опускання електродів роблять злив рідини з циліндрів 15

через зворотні клапани 28, дроселі 30, золотники 31. В результаті циліндри 15 і електроди опускаються.

Налаштовуючи дроселі 29 і 30 на певну кількість рідини отримують різні швидкості підйому та опускання електродів. Тиск в гідросистемі визначається положенням запобіжного клапана 40. Для запобігання забруднення штоків гідроциліндрів вони захищені гофрованими кожухами, розміщеними між траверсою 13 і перекриттям 41 (на рис. 1.5 не показані) Вертикальність переміщення несучого циліндра 11, а отже і електрода 1 забезпечується направляючим циліндром, що має два ряди центруючих роликів 10 та 12.

Одночасно із гідравлічними механізмами перепуску електродів застосовуються і пневматичні. Вони (рисунок 1.6) складаються з групи нерухомих кільцевих полиць 3, між якими із зазором 20 мм встановлені рухомі кільця 2. Зверху і знизу останніх укладені еластичні гумотканинні балони 4. Кожне рухоме кільце, що охоплює електрод 1, затиснуте за допомогою пружинного механізму 5.

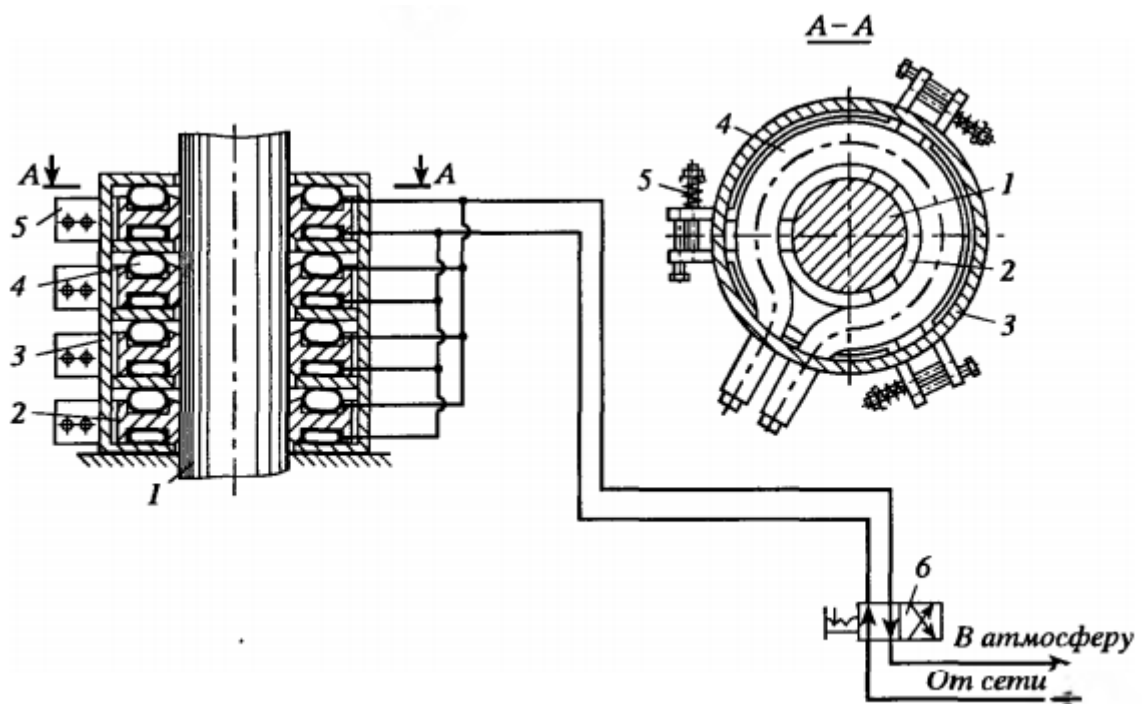


Рис. 1.6. Принципова схема пневматичного механізму перепуску електродів

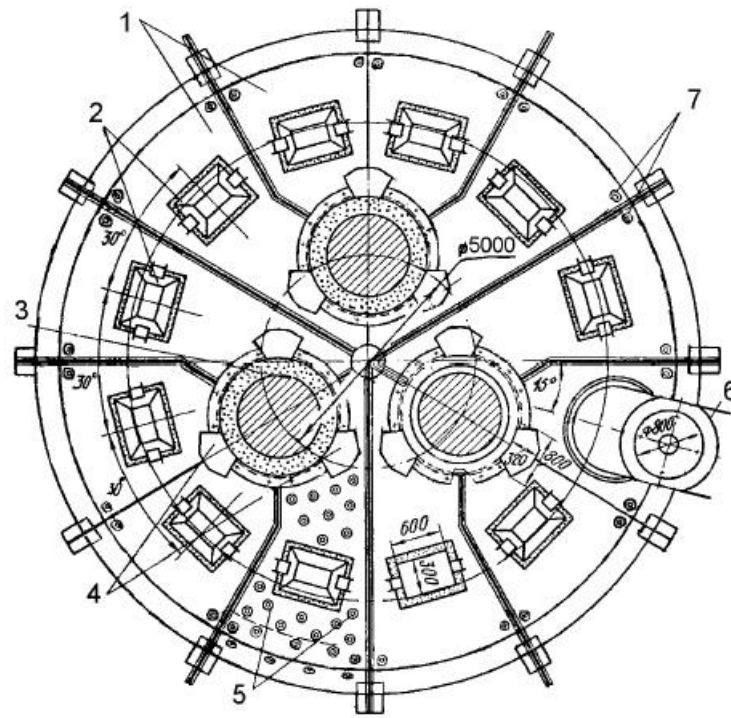
Перепуск електродів здійснюється в такий спосіб. У нижні балони рухомих кілець через пневматичний розподільник б мережі подається стиснене повітря, при цьому верхні балони з'єднані з атмосферою. У міру наповнення стисненим повітрям нижніх балонів відбувається підйом рухомих кілець на величину зазору. Після вибору останнього розподільник б з'єднує верхні балони з повітряною мережею, а нижні з атмосферою, і відбувається опускання рухомих кілець рядом з електродом на величину зазору (20 мм) [4].

1.2.5. Конструктивні можливості щодо розведення електродів

Як відомо існують печі відкритого і закритого типу [4-7]. Відмінність полягає в тому, що в останніх верх печі накритий металевим водоохолоджувальним склепінням, представленим на рисунку 1.7. Як видно з цього рисунку в даній конструкції для електродів передбачені попередньо зроблені отвори для конкретного типу печі через які відбувається їх перепуск та рух по вертикалі. Діаметри отворів дещо більші за електроди, що дозволяє переміщувати їх горизонтально не більше ніж на 100мм.

У печах відкритого типу таке металеве склепіння відсутнє, що теоретично дозволяє змінювати діаметр розпаду, але тільки перед кожним безперервним циклом плавки певного феросплаву. В процесі ж останнє не можливе, оскільки у ванні печі знаходиться велика маса шихти. Однак виникає питання щодо можливості використати це практично через конструктивні особливості кріплення та горизонтального переміщення електродів.

Так на печах, що зараз використовуються на вітчизняних підприємствах, електрод та електродотримувач знаходяться вище склепіння печі і кріпляться до залізобетонних перекриттів плавильного цеху. Для кожного виду печі підбирається необхідний діаметр розпаду електродів [7]. Останній жорстко фіксується і не дає більше змоги переміщувати електроди за горизонталлю у зазначеному напрямку.



1 – секція склепіння (одна з шести); 2 – противибухові люки; 3 – електроди; 4 – завантажувальні воронки; 5 – розпірні трубки (умовно показані на одній секції); 6 – газовідвідна труба; 7 – штуцери для підведення та відведення охолоджуючої води.

Рис. 1.7. Вид зверху на металеве водоохолоджуване склепіння руднотермічної печі закритого типу

Однак при реконструкції існуючих чи створені нових руднотермічних печей механізм розведення електродів можна і передбачити заздалегідь, якщо буде використана зміна діаметру розпаду електродів в залежності від конкретного складу шихтових матеріалів, який визначає електричні параметри печі, можна суттєво підвищити енергоефективність останньої.

1.3 Сучасний стан ефективності роботи руднотермічних печей

Вибір способу виробництва того чи іншого сплаву залежить від типу наявного для цього агрегату. Так, виплавка феросплавів вуглецевотермічним способом здійснюється у рудовідновлювальних електропечах, силікотермічним

– у рафінувальних печах, алюмінієвим – у плавильних горнах або модернізованих дугових сталеплавильних печах.

При виборі потужності феросплавних електропечей зазвичай виходять з її максимального значення, так як практично підтверджено, що збільшення потужності електропечей дозволяє покращити всі основні техніко-економічні показники виробництва (продуктивність праці, питома витрата електроенергії, капітальні та експлуатаційні витрати). Вітчизняні феросплавні електропечі мають зараз наступні максимальні встановлені потужності, МВА: 40 та 80 – печі для виплавки феросиліцію; 63 та 81 – феромарганця високовуглецевого; 63 та 81 – силікомарганця; 21 і 40 - ферохром високовуглецевого і передільного. Більш детальна характеристика основних типів руднотермічних та рафінувальних електропечей наведена у табл. 1.1

Збільшення одиничної потужності феросплавних електропечей супроводжується одночасним укриттям та герметизацією підсклепінного простору. Застосування закритих печей забезпечує утилізацію фізичного та хімічного тепла колошникових газів, охорону навколишнього середовища, покращення санітарно-гігієнічних умов праці та експлуатації обладнання. Особливо великий ефект щодо цього дає застосування герметичних печей. У нашій країні успішно експлуатуються герметичні печі типу РПЗ-63ІІ для виробництва високовуглецевого феромарганцю і силікомарганцю та типу РКЗ-33МІ для отримання високовуглецевого ферохрому. Основною перевагою печей з герметизованим склепінням є ліквідація викидів токсичного газу в атмосферу цеху через завантажувальні воронки, розташовані навколо електродів. Це зумовлює зменшення необхідних капіталовкладень на газоочищення в приміщенні де здійснюється плавка.

У США застосовують феросплавні електропечі потужністю 30-80 МВА з круглою та трикутною ваннами. Японська фірма «Танабе» виготовляє герметичні феросплавні печі потужністю 40-72 МВА, норвезька «Елкем» – круглі герметичні печі потужністю 75 МВА.

Таблиця 1.1

Характеристика основних типів руднотермічних печей

Вид феросплаву	Тип печі	Потужність тр-ра, МВА	Активна потужність електропечі, МВт	Напруга низької сторони, В	Максимальна сила струму на електроді, кА	Розмір ванни, м*	Глибина ванни, м	Діаметр, м	
								Електроду	Розпаду електроду
Ферохром низько- і середньовуглецевий; феромарганець низько вуглецевий.	РКО-2,5 Н2	2,5	2,3	89-178	13,0	4,2/2,7	1,2	0,45	1,2-1,4
Ферохром низько-середньовуглецевий	РКО-3,5 НОЗ	3,5	3,2	260-371	7,1	4,96/2,5	1,1	0,35	1,0
Рудновапняковий розплав для виробництва рафінованого ферохрома	РКО-4,5 НО1,	4,5	4,2	89-178	20,3	6,1/3,5	1,34	0,4	1,0-1,3
	РКЗ-10,5 РР-Н1	16,5	10,5	162,5-255	36,0	7,0/4,0	2,34	0,5	1,75
Феросиліцій ФС90, ФС75	РКО-16,5	16,5	15,0	130-204	48	7,8/6,1	2,3	1,2	2,8-3,0
	РКО-22-ІІ1	22,0	17,0	127-240	77	8,2/6,3	2,3	1,2	3,0
	РКЗ-16,5-Н9	16,5	15,0	130-204	60	8,2/6,63	2,8	1,2	3,1
	РКЗ-24 М1	24,0	22,0	127-240	86	8,9/7,2	2,6	1,4	3,4
ФС65, ФС45, ФС25	РКЗ-33 М2	40,0	36,0	142-282	93	10,8/6,1	3,5	1,5	3,9
	РКЗ-63 ІІ1	81,0	58,0	180-320	165	12,5/9,5	5,0	1,9	5,4
Ферохром високовуглецевий	РКЗ-16,5 НО7	16,5	14,5	130-204	60	10,0/6,1	2,3	1,2	2,9-3,0
	РКЗ-33 М1	40,0	30,0	140-282	93	12,5/9,5	3,85	1,5	4,35
Феросилікохром	РКЗ-16,5 НО8	16,5	14,5	130-204	60	8,3/6,1	2,2	1,2	2,9-3,0
	РКЗ-33 М2	40,0	30,0	140-282	93	10,8/8,8	3,5	1,5	3,9
Феромарганець високовуглецевий	РПЗ-48 М2	63,0	58,0	137-238,5	111,84	25,84*12,4/ 20,4*7,15	4,5	3,0*0,75	3,3
	РПЗ-63 ІІ1	63,0	58,0	228-148	119,2	25,4*10,3/ 23*8,2	4,5	3,0*0,75	3,6
Силікомарганець	РКЗ-16,5 Н11	16,5	15,0	130-204	60	8,2/6,63	2,8	1,2	3,1

Слід зазначити, що ефективність використання встановленої потужності вітчизняних рудовідновлювальних печей вищий, ніж зарубіжних, оскільки вони мають системи поздовжньо-ємнісної компенсації реактивної потужності.

Слід також зазначити, що відповідно до результатів дослідження [7] потужність феросплавних електропечей (РКО-16,5 та РКЗ-16,5) слід збільшити до 27-30 МВА, а рафінувальних – до 7-10 МВА. Тож для підвищення їх енергоефективності ці рекомендації слід враховувати при реконструкції діючих плавильних цехів.

В Україні сьогодні існують два великі підприємства з виробництва феросплавної продукції – АТ «Запорізький завод феросплавів» та АТ «Нікопольський завод феросплавів», що відповідно знаходяться в зазначених містах. Перший завод використовує печі типу РКО та РКЗ різної номінальної потужності від 5 МВ·А до 27,6 МВ·А, однак найбільша кількість (понад 12 штук) печей РКО-7. Інше підприємство має потужні печі типу РПЗ-63 та РКГ-75 у загальній кількості 14 штук, а також 6 печей типу РКЗ-16,5 [8, 9]. Незважаючи на те, що на зазначених підприємствах використовують велике різномайття потужностей руднотермічних агрегатів, конструктивно вони відрізняються лише геометричними розмірами, а принцип роботи та додаткове обладнання є однаковим, що наведено вище.

При виробництві різних видів феросплавів на підприємствах використовують таке поняття як питома витрата електроенергії на тону готової продукції (таблиця 1.2). За цим показником в процесі плавки того чи іншого феросплаву й відбувається злив сплаву та шлаку.

Таблиця 1.2

Питома витрата електричної енергії при виробництві феросплавів [10,11]

Вид феросплаву	Витрата електроенергії кВт·год/т
1	2
Феросиліцій, 20%	2185
Феросиліцій, 25%	2750
Феросиліцій, 45%	4700 – 4800
Феросиліцій, 65%	7410
Феросиліцій, 75%	8800 – 9700

Продовження таблиці 1.2

1	2
Феросиліцій, 90%	12500
Ферохром низько- та середньовуглецевий	3500 – 4000
Ферохром високовуглецевий	4300
Кристалічний кремній	12000 – 12300
Силікомарганець	4100 – 4700
Феромарганець вуглецевий	3090
Фероалюміній	3900

Як бачимо з таблиці виробництво деяких видів феросплавів є дуже енергоємним і займає велику частку у формуванні собівартості продукції. В сучасних умовах дефіциту електричних потужностей, росту цін на електроенергію та проблеми зі збутом готової продукції постає завдання у зменшенні витрат на виробництво. А для цього, звісно, потрібно знайти дієві шляхи підвищення саме енергоефективності роботи печі.

1.4 Аналіз відомих заходів щодо підвищення енергоефективності роботи руднотермічних печей

В умовах підвищення цін на енергоресурси все актуальнішим постає питання вдосконалення, реконструкції та підвищення енергоефективності роботи руднотермічної печі зі збереженням умов технологічного процесу та зниженням витрат електричної енергії на тону готової продукції. Вирішенню цієї проблеми присвячено багато наукових праць. Розглянемо деякі з них.

Так авторами [12] проаналізована можливість підвищення енергоефективності феросплавної електропечі за рахунок використання установок продольно-ємнісної компенсації (УПК) реактивної потужності, які зменшують дефіцит реактивної потужності Q та підвищують активну потужність P . Ці дослідження проводилися при стабільних режимах роботи на двох печах типу РКЗ-16,5, що виплавляли 65% феросиліція. Вимірювання електричних та технологічних параметрів здійснювалися за вимкнених та

включених УПК. Спостереження за роботою печей при відключеному УПК проводилось протягом 27 діб, а при включеному – 14 діб.

Аналіз отриманих у результаті даних показує, що збільшити активну потужність печі можливо за умови, що вона працює не на граничній потужності і є можливість збільшення пропускної спроможності короткої мережі на некомпенсованій ділянці. Потужність, що споживається піччю при виплавці феросиліцію, може без порушення технологічного процесу досягати номінального значення. Це можна отримати, збільшуючи робочий струм та напругу при збереженні їх раціонального співвідношення за високого коефіцієнта потужності, якщо при цьому частка активної, перетвореної на тепло, потужності досягає максимуму. Такий режим роботи печі можливий за обладнання печі штучною компенсацією реактивної потужності.

Авторами виконані також дослідження та проведений дисперсний аналіз даних щодо неперервного технологічного процесу на печі РКЗ-16,5. За цих досліджень тривалість спостережень була не меншою ніж 24 години. Загальна їх кількість становило 30. Ця величина обумовлена можливістю цехів підготовки шихти підтримувати її необхідний склад з руди одного надходження для роботи протягом місяця двох рудовідновлювальних печей типу РКЗ -16,5.

Застосування установок поздовжньо-ємнісної компенсації реактивної потужності в цьому випадку дозволило підвищити активну потужність електропечі на 6,58% й зменшити її реактивну потужність на 41,16%. В результаті коефіцієнт потужності збільшився на 17,49%. Добова продуктивність завдяки збільшенню її споживаної активної складової та підвищення напруги, обумовленої компенсацією реактивної потужності, зросла на 12%. Питома витрата електроенергії знизилась на 4,63%, а це є значним досягненням щодо енергозбереження.

В роботі [13] розглянуто також питання впливу величини напруги та несинусоїдальності струму на режими роботи феросплавних печей. Електричні процеси, що відбуваються в них, мають низку особливостей та вимагають у деяких випадках застосовувати специфічні способи їх дослідження. Це

визначається умовами роботи зазначених агрегатів і характеризуються різкими та частими коливаннями навантаження, великими значеннями фазних струмів печі, несинусоїдальністю їх і відповідних напруг, складністю приєднання вимірювальних приладів. Крім того, коливання струмів печі несприятливо впливають на роботу сусідніх з нею споживачів. Так виникає потреба дослідження впливу і цих коливань.

Струми потужних електропечних установок досить великі (тисячі ампер), а це призводить до виникнення сильних магнітних полів та паразитних ЕРС в зазначеній електричній мережі й у вимірювальних приладах. У той же час, струми та напруги печі несинусоїдальні і містять гармонійні складові найвищих порядків. За деяких умов у них з'являється і постійна складова, що також збільшує втрати електроенергії. Все це викликає необхідність застосування комплексного підходу при вирішенні проблем пов'язаних з електротехнічними перехідними процесами у печі.

Основними причинами різких коливань струму та напруги на електродах РТП і є випадковість пов'язаних з цим фізико-хімічних факторів [14]: зміна провідності шихти у зоні дугового простору електродів; різні агрегатні стани оксидів; нерівномірне формування фізичного та хімічного складу шихти (вологості, гранулометричного складу і т. д.); витіснення дуги в шихті з-під електродів до периферії; вібрація електродів та підтримуючого пристрою; вентильний ефект при горінні дуги змінного струму, а також зміна іонізації дугового простору при плавленні та випаровуванні шихти, тощо. Зазначені коливання струмів та напруг, окрім залежності від згаданих вище факторів, обумовлені ще й низкою причин порушення технологічного режиму. А це є: обвали шихти, свищі, настили, обриви електродів, рух металу та шлаку, переміщення дуги при зміні напруженості магнітного та електричного полів, що призводять до різкої зміни положення електродів.

Очевидно, що коливання струму печі залежить від зміни значення опору шихти R_s , який обумовлений технологічними параметрами режиму та рівня прикладеної напруги, тобто:

$$I = \frac{U_m}{\sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}} \quad (1.1)$$

Також відомо [13], що при різких змінах потужності дуги напруга та струм пов'язані співвідношенням:

$$U_{\partial} = R_{\Sigma\gamma} \cdot i_{\partial} + X_{\Sigma\gamma} \frac{di_{\partial}}{dt}, \quad (1.2)$$

де U_{∂} – лінійна напруга, що прикладена до дуги; di_{∂}/dt – зміна струму дуги; $R_{\Sigma\gamma}$, $X_{\Sigma\gamma}$ – сумарний активний та індуктивний опори. З формул (1.1-1.2) випливає, що збільшення продуктивності печі та зменшення питомої витрати електроенергії можливе при підвищенні лінійної напруги.

Відповідно ж до [14] максимальна продуктивність печі при мінімальній питомій витраті електроенергії визначається оптимальним співвідношенням між активними струмами дуги та шихтового шару:

$$\beta = \frac{I_{\partial}}{I_{ш}}. \quad (1.3)$$

Тож одним підвищенням напруги необхідно збільшувати струм на електроди так, щоб зберегти оптимальне значення β .

Очевидно, що всі гармонійні складові струму у печі мають позитивний вплив на швидкість плавлення металу, так як призводять до додаткового нагрівання шихти. Проте, деякі з них створюють магнітні поля, частина з яких обертається назустріч основному полю, викликаючи зриви горіння дуги, викид шихти тощо. Високочастотні гармоніки струму, протікаючи обмотками трансформатора також, створюють відповідні магнітні поля, що призводить до додаткового нагрівання сталі та обмоток, а отже збільшення втрат енергії. Це може бути причиною виходу з ладу електрообладнання внаслідок перегріву. Терміни служби останнього залежить від нагрівання його частин і не дозволяє

при несинусоїдальному струмі використовувати устаткування на всю його номінальну потужність. З підвищенням температури в ізоляційних матеріалах протікають хімічні реакції, що призводять до поступової зміни їх ізоляційних та механічних властивостей, ці процеси прискорюються, скорочуючи термін служби устаткування. Отже реалізація відповідних гармонійних складових у струмі розглядуваних електропечей також розглядається як один із заходів підвищення їх енергоефективності.

1.5 Аналіз існуючих методів дослідження процесів у руднотермічних печах.

Серед існуючих методів, що використовуються для дослідження процесів у руднотермічних печах, найбільш розповсюджене математичне моделювання. Їм користуються багато науковців. Він заснований на складанні та розв'язанні системи рівнянь, що описують ті чи інші фізичні процеси, які відбуваються у ванні руднотермічної печі. Розглянемо практичне застосування цього методу більш детально.

Автором [15] запропоновано та теоретично обґрунтовано фізичну модель процесу плавлення шихти в руднотермічній печі, що розглядає розплав з розподіленою в ній твердою шихтою у вигляді шарів твердої і рідкої фаз, що чередуються. На основі цього створено математичну модель процесу плавлення шихти, яка описує нестационарний процес поширення тепла в двофазній системі «шихта – розплав» за наявності фазових переходів на рухомому міжфазному кордоні теплообміну. Як окремі випадки запропоновані також математичні моделі, що описують зону плавлення руднотермічної печі в різних режимах її роботи - стаціонарному безперервному, періодичному, при безперервному та періодичному зливі розплаву.

В зазначеній роботі представлена методика розрахунку стаціонарного та циклічного режиму роботи руднотермічної печі. Загальна нестационарна математична модель процесу характеризує поля температур у шарі шихти та в

розплаві з урахуванням положення рухомого міжфазного кордону. Вона складається з системи диференціальних рівнянь з граничними умовами, чисельне рішення якої проводиться методом кінцевих різниць за допомогою реалізованої комп'ютерної програми на обчислювальній техніці. Цей програмний засіб дозволяє розраховувати поля температур у шихті та розплаві, положення міжфазної межі, швидкість сходу шихти, висоту настилу, допустиму висоту зони плавлення, допустиму потужність тепловиділення, температуру розплаву, висоту настилу, час формування та його тривалість розплавлення.

Методи математичного моделювання використані і авторами роботи [16], який реалізував чисельне рішення диференціальних рівнянь у приватних похідних у системі програмування MathCAD. При цьому використано об'єктно-орієнтоване програмування, особливості відповідних розділів хімічної технології, пов'язаних із РТП та фізики плазми. В зазначеній роботі моделюються процеси, що протікають у просторі навколо одного електрода. Не зовсім розглядаються параметричні зв'язки та процеси, зумовлені структурою багатоелектродних печей. Всі рівняння записані в циліндричній системі координат, де вісь z збігається з віссю електрода.

Процеси в РТП розглядаються авторами тільки в стаціонарному режимі з чіткими межами теплових зон. Не враховується також ні коливання складу сировини, ні обвали шихти в процесі плавки. Припускається, що у РТП не відбуваються накопичення шлаку та відновленого продукту. Та все ж розроблена узагальнена математична модель піделектродного простору руднотермічних печей дозволила дослідити вплив конструкції печі, електричного режиму (струму електрода, напруги на електроді) на розподіл енергії хоча б в піделектродному просторі печі.

Ще одним розповсюдженим методом досліджень є складання електричної схеми заміщення печі. Так в роботі [17] вона реалізована лише для однієї фази. Опір дуги у схемі заміщення вважається чисто нелінійним і розглядається як залежність напруги від струму і довжини дуги. Опір кабелів первинного контуру не враховується взагалі начебто ж через їх незначну протяжність.

Трансформатор у схемі заміщення представлений у вигляді сукупності активного і індуктивного опору.

Допускається, що для симетричних установок, у яких параметри всіх фаз однакові чи близькі настільки, що їх можна усереднити, характеристики фаз однакові. При такому моделюванні знехтуванню втратами холостого ходу трансформатора, а індуктивні та активні опори обмоток трансформатора і короткої мережі фази об'єднано в так званий опір фази пічного контура.

Для отриманої таким чином схеми заміщення складено систему рівнянь на підставі законів Кірхгофа, що визначає співвідношення між струмами та напругами у РТП. Вона була покладена в основу розробленої математичної моделі, програмно реалізованої в середовищі *MatLab Simulink*. Модель здатна враховувати інерційність електричної дуги та нелінійність її вольт-амперної характеристики.

Теплові процеси в печі характеризуються за допомогою диференціального рівняння нестационарного теплообміну з внутрішніми джерелами теплоти, яке спільно з граничними та початковими умовами дає повний опис процесів, що відбуваються в тиглі РТП із закритою дугою. На основі проведеного аналізу сучасного рівня та перспектив розвитку руднотермічних печей в роботі обґрунтовано доцільність та можливість підвищення їх енергетичної ефективності шляхом удосконалення систем управління режимами роботи на основі сучасної обчислювальної та мікропроцесорної техніки.

Ще одним досить цікавим напрямком моделювання РТП є метод вторинних джерел (метод інтегральних рівнянь) [18], який використовується для розрахунку електромагнітного поля печі. Основні етапи розробки математичної моделі феросплавної електропечі з використанням цього методу наведено в [19-21]. У результаті отримується система зручних для програмування алгебраїчних рівнянь, яка фактично є алгоритмом розрахунку шуканої густини вторинних джерел у вибраних розрахункових точках об'єму

ванни печі. При цьому використання наступного не має багато позитивних відгуків.

На основі математичної моделі за методом вторинних джерел для феросплавної печі з ванною круглого перетину розрахована густина цих джерел та напруженість магнітного поля у вибраних точках. Запропонована в результаті модель може бути використана як потенційний засіб при проектуванні та реконструкції феросплавних електропечей, визначенні втрат енергії в їх конструктивних складових.

Що ж до самого методу вторинних джерел, то він застосований і авторами [22] для розробки математичної моделі розподілу щільності струму в перерізі самоспікаючого електроду, питомої активної потужності в обсязі робочого простору ванни РТП. Отримана ними модель реалізована у формі інтегральних рівнянь Фредгольма II-го роду із залученням експериментальних даних діючих печей. Цей метод відрізняється від інших тим, що дозволяє розглядати різні варіанти полів, варіюючи геометричними параметрами печі.

Слід зазначити, що метод вторинних джерел має і свої недоліки. Наприклад, зі збільшенням кількості зон однорідної провідності в обчислюваному обсязі провідного середовища дуже ускладнюються інтегральні рівняння, а це впливає на обсяг обчислювальних операцій, що, у свою чергу, іноді викликає необхідність раціонального зменшення кількості зон однорідної провідності. На точність отриманих результатів суттєво впливає також і кількість обраних розрахункових точок у виділених для експериментальних досліджень неоднорідних зон печей.

Визначення ж температурного поля та кінетики плавлення шихти, що знаходиться у робочому просторі печі, відноситься до нелінійних задач тепломасообміну. Для цього створенні алгоритм їх чисельного розв'язання і програма для ЕОМ. У статтях [23-24] описане детальне застосування даної методики, що базується на системах диференціальних рівнянь з граничними умовами. Створені математична модель, алгоритм і програма розрахунку дозволяють отримати інформацію щодо динаміки протікання теплофізичних

процесів в робочому просторі печі, яка може бути використана для удосконалення існуючих і створення нових технологічних конструкцій з метою більш раціонального використання енергетичних ресурсів

Кожний із вище розглянутих методів дослідження роботи руднотермічної печі має свої недоліки, які пов'язані із складністю математичних розрахунків, та не дає можливості отримати загальну картину взаємозв'язків електричних, теплових та фізичних процесів при виробництві феросплавів. Для того, щоб провести досконалі дослідження і з'ясувати всі можливості щодо підвищення енергоефективності потрібна комплексна модель руднотермічної печі. Її реалізація можлива за допомогою комбінації існуючих чи додатково розроблених програмних засобів на основі можливостей сучасної обчислювальної техніки.

1.6 Постановка задач досліджень

Виходячи з вище викладеного матеріалу можна зробити висновок, що зараз найбільш поширеними феросплавними електропечами – є кругла трьохелектродна руднотермічна піч, яка має широкий діапазон можливих потужностей від 2,3 до 75,0 МВ·А в залежності від виду феросплаву, що виплавляється, та відноситься до агрегатів непереривного циклу.

РТП різної конфігурації використовуються в промисловості вже більше ніж 45 років. В умовах ринкової економіки та постійного росту цін на енергоресурси гостро постає питання підвищення енергоефективності роботи печі з метою зменшення питомої витрати електричної енергії на тону готової продукції. Аналіз існуючих заходів показав, що вони є однонаправленими і в повній мірі не враховують взаємозв'язок з іншими процесами, які відбуваються в ванні печі під час її роботи.

Так як технологічні процеси, що відбуваються у ванні феросплавної печі є дуже різноманітними і включають в себе протікання хімічних, теплових та електричних процесів, які пов'язані між собою, постає задача в створенні

комплексного підходу щодо моделювання її роботи з метою розробки енергозберігаючих заходів. Всі наявні моделі і програмні засоби не дають змоги виконати це завдання.

Враховуючи вище сказане, в дисертаційній роботі поставлені наступні завдання:

- виконати аналіз і систематизацію існуючих моделей руднотермічної печі з метою з'ясування можливості їх удосконалення й подальшого використання задля вирішення поставлених задач енергоефективності;

- розробити комплексну математичну модель РТП, яка враховує взаємодію електричних, теплових та інших процесів, що протікають у ванні печі при виплавці феросплавів та дає можливість вирішувати не тільки проектні задачі, а й аналізувати процес за його перебігом, при цьому бути простою в реалізації;

- ідентифікувати всі вхідні параметри розробленої моделі, особливо ті, що мають не чіткі значення;

- розробити методика розрахункових досліджень енергоефективності процесу отримання феросплаву на основі синтезованої комплексної моделі печі;

- виконати дослідження енергоефективності РТП за запропонованою методикою;

- запропонувати практичні заходи, що зможуть зменшити електроспоживання й підвищити таким чином енергоефективність руднотермічної печі.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ТА ОСНОВНИХ БЛОКІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ

2.1 Аналіз відомих математичних моделей руднотермічної печі

Сучасний рівень розвитку електротермії сприяє інтенсивному використанню існуючих електроплавильних установок та введенню в експлуатацію нових електродугових печей змінного струму. Однак актуальним і для них залишається питання створення та удосконалення енергозберігаючих технологій. Так завдяки комплексному підходу щодо математичного моделювання роботи печі стало можливим досягти економії деяких ресурсів, однак при цьому не враховуються електричні, теплові й хімічні процеси, що одночасно протікають в її ванні, які безпосередньо пов'язані між собою.

Очевидно, що удосконаливши відповідно існуючі математичні моделі чи синтезувавши нові стане можливим за допомогою обчислювальних методів вирішити необхідні для цього задачі, а саме виконати:

- технологічну оптимізацію за вказаним критерієм ефективності;
- розподіл енергії в об'ємі ванни печі;
- розрахунок температурного поля у ванні;
- оцінити об'єм утвореного розплаву та шлаку і т.д.

Розглянемо існуючі математичні моделі електричних печей змінного струму та проаналізуємо можливість їх використання для вирішення поставлених задач.

Розтікання електричного струму в руднотермічній ванні було предметом вивчення на протязі багатьох минулих років. Цьому питанню присвячено багато теоретичних і експериментальних досліджень. Так М. С. Максименко, Ф. Я. Цибакин, Д. А. Діомідовський, Р. А. Сисоян, П. В. Сергієв і Г. Ф. Платонов [25-27] вивчали як розподіляється струм в однофазній та трифазній ваннах це на електролітичних моделях. В. Т. Жердев більшого значення надавав з'ясуванню цього явища безпосередньо на діючих печах. В роботі [28] приведено вже математичне моделювання електричних полів трифазних

руднотермічних печей. Автором публікації [29] розроблена також методика для проведення теоретичних досліджень за допомогою конформних відображень щодо визначення фізичних полів в руднотермічній плавильній печі.

Відомі математичні моделі розподілу енергії в об'ємі ванни руднотермічної печі [28, 30], які спираються на метод вторинних джерел. Та останній має ряд недоліків, зокрема, складні інтегральні рівняння, що впливають на об'єм обчислювальних операцій. Хоча якісно електричне поле печі висвітлюється при цьому достатньо, проте наявної інформації замало для проведення точного розрахунку потужності, електричних перетворень і температур в кожній точці об'єму ванни.

Розробці математичного аналогу піделектродного простору РТП присвячені праці [31-35], де моделюються процеси, які протікають у просторі, що оточує лише один електрод. При цьому, на жаль, не розглядаються параметричні зв'язки та процеси, зумовлені структурою багатоелектродних печей. Всі рівняння записані в циліндричній системі координат, де вісь z збігається з віссю електрода, що ускладнює подальше використання такої моделі. До того ж в ній всі процеси розглядаються як стаціонарні з чіткими межами теплових зон. Обурювальні дії (коливання складу сировини, обвалення шихти) взагалі не враховуються. Не розглядається також і те, що у РТП відбувається накопичення шлаку та відновленого продукту.

Використана при моделюванні електрична схема піделектродного простору на один електрод представлена на рисунку 2.1. Опори R_d та $R_{ш}$ розглядаються як паралельні, з якими послідовно включено опір зони реакції. При цьому робиться припущення, що інші шляхи розтікання струму відсутні.

Вважається, також що напруженість електричного поля у стовпі дуги постійна. Для сильноточних дуг ($I_d > 1000A$), які спостерігаються в РТП, введені спрощення:

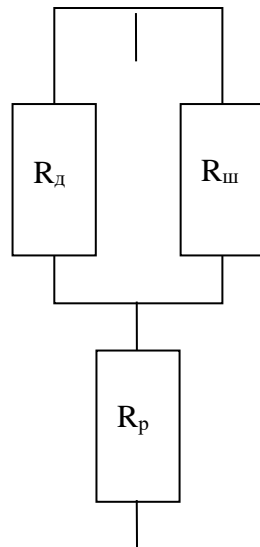


Рис. 2.1. Електрична схема піделектродного простору на один електрод, де R_d , $R_{ш}$, R_p – опір дуги, зони НШ та зони реакції.

1. Гравітаційні сили та сили в'язкості розглядаються як малі в порівнянні з електромагнітними силами, обумовленими власним магнітним полем дуги.

2. Радіальна швидкість потоку плазми вважається досить малою у порівнянні з вісьовою, а режим перебігу плазми по осі ламінарний.

3. Температура на стінці каналу дуги дорівнює середній температурі плавлення компонентів шихти.

З урахуванням прийнятих спрощень рівняння, якими описується зазначена сильноточна дуга, наступний вигляд:

- рівняння балансу енергії

$$\sigma E_0^2 = \psi + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-r\lambda \frac{\partial T}{\partial r}) + c_p v_z \rho \frac{\partial T}{\partial z}; \quad (2.1)$$

- рівняння руху

$$\rho v_z (dv_z / dz) = -dP / dz + F_n; \quad F_n = \mu_0 [\vec{j}_0 \times \vec{H}]; \quad (2.2)$$

- рівняння нерозривності

$$\partial(\rho v_z)/\partial z = 0; \quad (2.3)$$

- закон Ома

$$j_\delta = \sigma E_\delta, \quad (2.4)$$

де σ – електропровідність, $1/(\text{Ом}\cdot\text{м})$; ψ – об'ємна потужність випромінювання, $\text{Вт}/\text{м}^3$; λ – теплопровідність, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$; c_p – питома теплоємність, $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$; ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; v_z – осьова швидкість потоку плазми, $\text{м}/\text{с}$; P – тиск, Па ; μ_0 – постійна магнітна; j_δ – щільність струму в стовпі дуги, $\text{А}/\text{м}^2$.

Рівняння (2.1) вирішувалося автором у комп'ютерній системі MathCAD методом контрольного об'єму (окремий випадок методу зважених нев'язок). Стовп дуги розбивається на N контрольних об'ємів (КО) за осями r , K й z . Температура вважається постійною всередині КО. Система з $K\cdot N$ лінійних рівнянь отримується інтегруванням зазначеного рівняння за КО із заміною похідних кінцевими різницями.

Розроблена також узагальнена математична модель піделектродного простору руднотермічних печей, яка, хоч і є надто складною, дозволяє з великою похибкою досліджувати вплив параметрів сировини, конструкції печі, електричного режиму (струму електрода, напруги на електроді) на розподіл енергії в піделектродному просторі печі.

Наукові роботи [36-41] присвячені розробці та обґрунтуванню моделі електричного контуру РТП із закритою дугою, отриманої на підставі електричної схеми заміщення печі. Картину розтікання струмів у ванній РТП ілюструє рисунок 2.2.

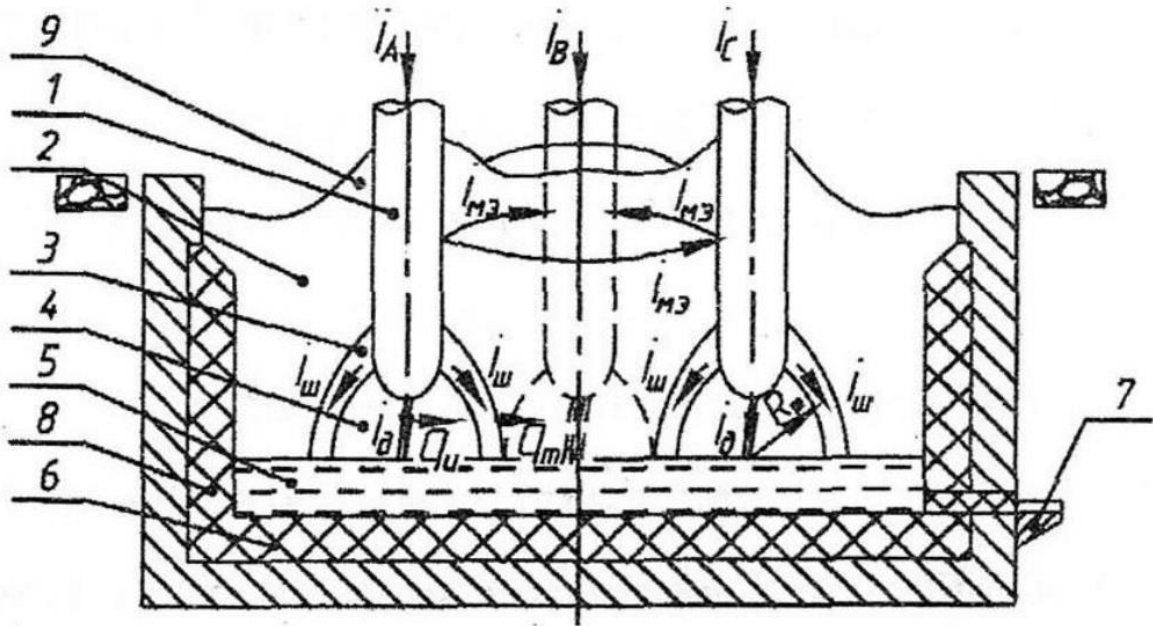


Рис. 2.2. Розтікання струмів у ванні РТП

В силу технологічних особливостей ведення відновлювальних процесів у РТП із закритою дугою нижні кінці електродів 1 завжди занурені в шихту 2. Таким чином, дуги горять у тиглях, утворених спеченою шихтою 3 і газовими бульбашками 4. Утворення тигля пояснюється тим, що шихта в печі розігрівається і розплавляється нерівномірно: чим далі вона знаходиться від електрода, тим повільніше відбувається її плавлення. Розміри тигля не постійні і змінюються пропорційно потужності, що виділяється в ньому. Тигель спирається на рідкий розплав 5.

Стіни тигля мають температуру плавлення шихтових матеріалів, і саме у них відбуваються відновлювальні реакції. Отриманий метал краплями стікає на подину печі 6. Підведений до електроду струм протікає не лише дугою, а й через стінки тигля, оскільки спечена шихта є гарним провідником. У багатоелектродних печах струм проходить ще й від електрода до електрода через шихту, проте, як показує досвід експлуатації печей, він не значний.

У міру розплавлення шихти в тиглі її місце займає та, що спускається вниз уздовж електродів. Інші ділянки шихти (біля стін печі 8 і між електродами) залишаються нерухомими і не беруть участь у відновлювальних

реакціях. Тому, завантаження в РТП, зазвичай, здійснюється поблизу електронів, створюючи навколо них конуси - колошники 9. Гази, що виділяються в процесі відновлення виходять уздовж електродів і видаляються цеховими системами пилоуловлення. Сплав, що накопичився в печі, періодично випускають через спеціальний літковий отвір 7.

Дослідження проводилися на основі схеми заміщення для однієї фази (рисунок 2.3). Опір дуги в ній вважається чисто нелінійним і є залежністю напруги від струму і довжини дуги $r_d = u_d(i_d, l_d)$, а кабелів первинного контуру – не враховується через його мале значення. Трансформатор у схемі заміщення представлений у вигляді сукупності активного і індуктивного опору. Встановлено, що для симетричних установок, коли параметри всіх фаз однакові чи близькі настільки, що їх можна усереднити, характеристики всіх фаз однакові. При розгляді нехтують втратами холостого ходу трансформатора та об'єднують індуктивні та активні опори обмоток трансформатора і короткої мережі фази в опір фази пічного контуру X і R .

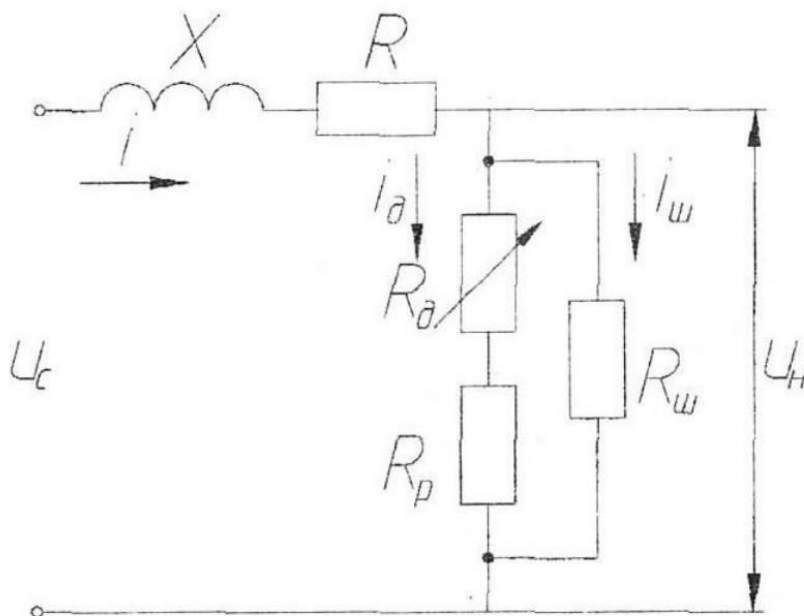


Рис. 2.3 Схема заміщення для однієї фази

На наведеному рисунку прийнято такі позначення: u_c – напруга мережі; u_n – напруга ванни печі; i – струм електрода печі; i_d – струм, що протікає в дузі; i_u – струм, що протікає в провідних стінках тигля (струм шихти); R_d – нелінійний опір дуги; R_{uu} – опір провідних стінок тигля, R_p – опір розплаву. Для цієї схеми заміщення (рисунок 2.3) на основі законів Кірхгофа складено систему рівнянь, що визначає співвідношення між струмами та напругами у РТП:

$$u_c - u_n = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt};$$

$$u_n = u(i_d, l_d) + i_d \cdot R_p;$$

$$u_n = R_d(i_d) \cdot i_d + R_p \cdot i_d;$$

$$u_n = R_{uu} \cdot i_u;$$

$$i = i_u + i_d.$$

Остання була покладена в основу розробленої математичної моделі, складеної в середовищі *MatLab Simulink*. Модель враховує інерційність електричної дуги та не лінійність її вольт-амперної характеристики.

В основі теплової моделі використано диференціальне рівняння нестационарного теплообміну з внутрішніми джерелами теплоти, яке спільно з граничними та початковими умовами дозволяє дати повний опис процесів, що відбуваються в тиглі РТП із закритою дугою. Отримана система рівнянь у полярній системі координат має наступний вигляд.

$$\alpha \cdot \left[\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 \theta}{\partial \delta^2} \right] + w \cdot \frac{1}{c \cdot \gamma} = \frac{d\theta}{dt};$$

$$\theta(r, \delta, 0) = \theta_0 = const;$$

$$-\lambda \cdot \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_{r=R_T} = q_i + q_k;$$

$$\theta(r,0,t) = \theta_p ;$$

$$\theta(r, \frac{\pi}{2}, t) = \theta_{el} .$$

Для спрощення моделі було прийнято такі припущення: задача асиметрична, а реакційна зона печі має форму правильної півсфери; дуга має циліндричну форму і розташовується строго за віссю електрода; електричний опір, теплопровідність і теплоємність шихтових матеріалів постійні; стінки тигля не переміщуються в просторі; у ванні печі основними джерелами нагріву є дуговий розряд і струм, що протікає в шихті, а іншими джерелами нехтують.

Рішення нестационарної системи рівнянь, через складність здійснити це аналітично, проводилася чисельним методом (кінцевих різниць) з використанням спеціально розробленої автором програми. На основі аналізу сучасного стану та перспектив розвитку руднотермічних печей доведено доцільність та можливість підвищення їх енергоефективності шляхом удосконалення систем управління режимами їх роботи на основі можливостей сучасної обчислювальної та мікропроцесорної техніки.

В працях науковців [42, 43], які присвячені математичному моделюванню розподілу енергії в ванні руднотермічної печі розглядаються аспекти, що пов'язані з визначенням оптимальних геометричних і електричних показників роботи останньої при проектуванні нових її варіантів чи реконструкції існуючих та визначенні втрат енергії в металевих складових печей.

Утворення розплаву та шлаку безпосередньо пов'язано з розподілом температури в ванні печі під час її роботи. На всіх стадіях теплової роботи вона описується відповідно рівняннями теплопровідності (2.5-2.7) [21, 23].

$$c_w \rho_w \frac{\partial T_w}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda_w r \frac{\partial T_w}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial z});$$

$$Z_o < z \leq Z_w; 0 \leq r \leq R_w; \quad (2.5)$$

$$c_{\phi}\rho_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_{\phi}r\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \tau}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \varphi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial z}\right);$$

$$Z_{\phi} < z \leq Z_{\phi}; 0 \leq r \leq R_u; \quad (2.6)$$

$$c_{\phi}\rho_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(\lambda_{\phi}r\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \tau}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial \varphi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_{\phi}\frac{\partial T_{\phi}}{\partial z}\right);$$

$$R_u < r \leq R_n; 0 \leq r \leq R_{\phi}, \text{ за умови } \tau_1 \leq \tau \leq \tau_2. \quad (2.7)$$

Тут $T_u = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура, $^{\circ}\text{C}$ шихти; $c_u = f(T_u)$, $\lambda_u = f(T_u)$, $\rho_u = f(T_u)$ – масова теплоємність, $\text{Дж/кг}^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт/м}^{\circ}\text{C}$, щільність, кг/м^3 шихти відповідно; r, φ, z – координати в циліндричній системі координат, $0 \leq r \leq R_n$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq z \leq Z_u$, R_n – радіус печі, Z_u, Z_{ϕ}, Z_{ϕ} – відповідно висота завалки, висота первинного «болота» та висота футеровки подини; $T_{\phi} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура футеровки, $^{\circ}\text{C}$; $c_{\phi} = f(T_{\phi})$, $\lambda_{\phi} = f(T_{\phi})$, $\rho_{\phi} = f(T_{\phi})$ – відповідно масова теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, щільність футеровки; $T_{\phi} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура, $^{\circ}\text{C}$ футеровки; $T_{\phi} = f(r, \varphi, z, \tau)$ – температура «болота», $^{\circ}\text{C}$; $c_{\phi} = f(T_{\phi})$, $\lambda_{\phi} = f(T_{\phi})$, $\rho_{\phi} = f(T_{\phi})$ – відповідно масова теплоємність, коефіцієнт теплопровідності, щільність «болота». Рівняння (2.5)–(2.7) доповнюються відповідними для кожного етапу роботи печі крайовими умовами та розв’язуються за допомогою використання ЕОМ. В останніх зазначених вище статтях рівняння теплопровідності застосовуються для моделювання роботи дугових печей, однак розподіл тепла і в руднотермічній печі має схожий характер.

У наукових роботах [44–48] запропоновано та теоретично обґрунтовано фізичну модель процесу плавлення шихти в руднотермічній печі, що розглядає розплав з розподіленою в ній твердою шихтою у вигляді шарів твердої і рідкої фаз, які чередуються. Розроблено фізичну та математичну моделі процесу плавлення шихти, що описують нестационарний процес поширення тепла в

двофазній системі шихта - розплав за наявності фазових переходів на рухомому міжфазному кордоні. Як окремі випадки запропоновані також математичні моделі, що описують зону плавлення руднотермічної печі в різних режимах її роботи - стаціонарному безперервному, періодичному, при безперервному та періодичному зливі розплаву.

Методика розрахунку стаціонарного режиму передбачає визначення швидкості сходу шихти; у разі утворення настилу розраховується його допустима висота та граничне значення потужності тепловиділення в зоні розплаву. При періодичному зливі прогнозується швидкість накопичення розплаву і рекомендується часовий інтервал між зливами.

Розрахунок циклічного режиму плавлення включає визначення середньої за цикл його швидкості, а також потужності тепло виділення у зоні розплаву, що забезпечує оптимальні умови ведення процесу (тривалість циклу, висота зони плавлення), У разі періодичного зливу розплаву розраховується максимально допустимий часовий інтервал між зливами. Показано можливість реалізації процесу плавлення в циклічному режимі, який, як встановлено, характерний для роботи печі в умовах недостатньо прогрітої шихти. Надано рекомендації щодо підтримки оптимальної висоти зони плавлення в циклічному режимі у діапазоні зміни вхідних параметрів процесу.

Отримана в результаті загальна нестационарна математична модель процесу описує поля температур у шарі шихти та в розплаві з урахуванням положення рухомого міжфазного кордону:

$$c_s \rho_s \frac{\partial T}{\partial \tau} + c_s \rho_s w \frac{\partial T}{\partial y} = \lambda_s \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (2.8)$$

$$c_l \rho_l \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda_l \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} - \frac{\alpha}{(s+l+\xi)} (t - T_f) + q_m, \quad (2.9)$$

$$\rho r \frac{\partial \xi}{\partial \tau} = \lambda_s \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\xi} - \alpha (t - T_f), \quad (2.10)$$

$$c_l \rho_l \frac{dt_p}{d\tau} = q_p - \frac{\lambda_l}{H_p} \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=H_p}, \quad (2.11)$$

$$T \Big|_{\tau=0} = T_0, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad T \Big|_{x=\xi} = T_f, \quad T \Big|_{y=0} = T_0, \quad t \Big|_{t=0} = t_0, \quad \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0, \quad t \Big|_{y=H_p} = t_p, \quad \xi \Big|_{\tau=0} = S,$$

$$t_p \Big|_{\tau=0} = t_0 \quad (2.12)$$

Тут T , T_f , t , t_p – температури твердої фази, фазового переходу, розплаву в зонах плавлення та реакційної; x , y – горизонтальна та вертикальна координати; ξ – координата межі розділу фаз; w – швидкість сходу шихти; q_m , q_p – відповідно потужність тепловиділення в зонах плавлення та реакційної; H_p – висота зони плавлення; c , ρ , λ – відповідно теплоємність, щільність та теплопровідність; s , l – вихідна півширина шару шихти та розплаву; α – коефіцієнт тепловіддачі від розплаву до твердої шихти. Індокси відносяться: s – до твердої фази; l – до розплаву; 0 – до початкового значення параметру.

Числове рішення системи рівнянь (2.8) - (2.11) з граничними умовами (2.12) проводилося методом кінцевих різниць. Різнісні рівняння отримані шляхом розкладання функцій T , t , у ряд Тейлора, присутня наявна схема. Програмний засіб дозволяє розраховувати поля температур у шихті та розплаві, положення міжфазної межі, швидкість сходу шихти, висоту настилу, допустиму висоту зони плавлення, допустиму потужність тепловиділення, температура розплаву, висота настилю та час його формування, тривалість розплавлення настилу.

У статті [49] представлена математична модель для опису процесу тепломасообміну, що відбувається в ванні шлакового розплаву руднотермічної шестиелектродної прямокутної печі, яка дозволяє полегшити тривимірні розрахунки. Але застосування такої моделі для круглої трьохелектродної руднотермічної печі неможливе.

Отже, розглянуті вище математичні моделі роботи руднотермічної печі описують лише якийсь один процес, що відбувається в ній. Але ж комплексна модель повинна враховувати всі наявні процеси та взаємозв'язок між ними. Тільки це дасть змогу отримати повну інформацію про піч та шихту впродовж всієї плавки.

2.2 Обґрунтування запропонованої структури математичної моделі

Виходячи з вище викладеного, пропонується синтезувати комплексну динамічну алгоритмічну модель роботи круглої трьохелектродної руднотермічної печі для одержання феросплавів, узагальнена структура якої представлена на рисунку 2.4.

Запропонований алгоритм враховує протікання електричних, теплових та фізичних процесів у ванні печі, що безпосередньо взаємопов'язані між собою. Це дає можливість контролю та впливу на технологічний процес задля зменшення витрат електричної енергії на тону готової продукції [50].

Алгоритм розбитий на основні блоки:

- ведення початкових параметрів;
- розбиття внутрішньої області печі на елементарні об'єми (для проведення в них розрахунків);
- визначення шляхів розтікання струму;
- розрахунок енергії, що виділилась внаслідок проходження струму через шихту;
- розрахунок температурного поля ванни;
- визначення можливості самозаймання коксика;
- перерахунок температурного поля ванни внаслідок процесів теплопередачі;
- визначення кількості утвореного розплаву;
- розрахунок кількості шихти, що необхідно підсипати
- виведення інформації щодо результатів роботи печі.

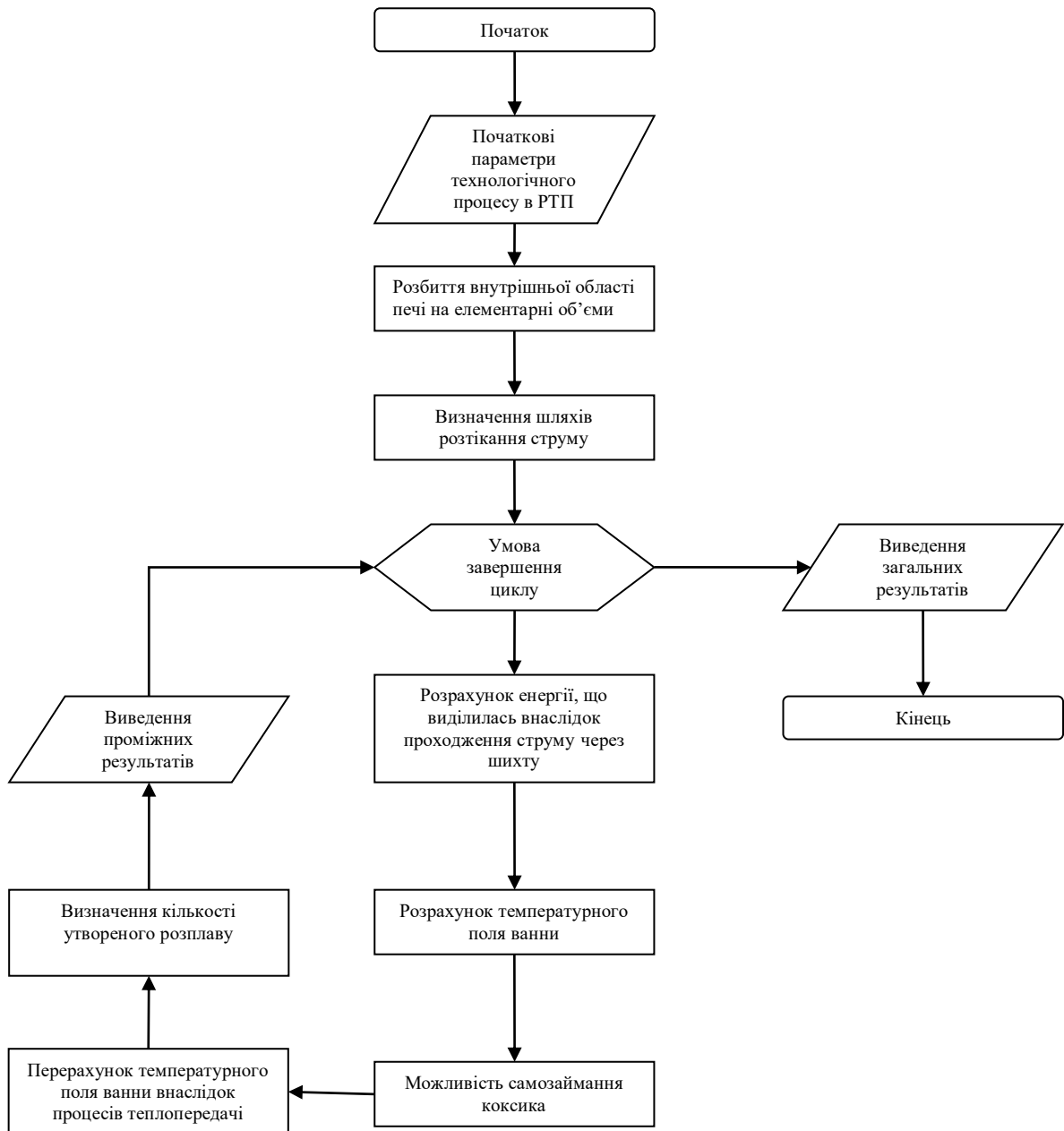


Рис. 2.4. Узагальнений алгоритм роботи руднотермічної печі в динаміці.

До початкових параметрів відноситься:

- геометричні параметри печі: радіус ванни; висота заповнення ванни шихтою; діаметр електродів; глибина занурення електродів у ванну; відстань між електродами; радіус на якому розташовані електроди відносно центру ванни печі;

- електричні параметри печі: лінійні напруги між електродами з фазами А та В, В та С й С та А.

- початкові значення параметрів шихти; таких як початкова температура; компонентний склад.

- фізичні параметри шихти: питомий електричний опір; питома теплота згорання коксика; масова теплоємність; питома щільність; коефіцієнт теплопровідності; густина рідкого розплаву; густина шлаку; коефіцієнти отримання чистих феросплавів та шлаку з шихтових матеріалів.

Для розбиття внутрішньої області печі на елементарні об'єми ванна РТП представлена у вигляді циліндра та розділена на однакові елементарні об'єми в системі циліндричних координат, тобто за радіусом, кутом та глибиною. В отриманих таким чином комірках і будуть здійснюватися всі математичні розрахунки. Їх кількість може змінюватися.

Шляхи протікання струму між електродами представляємо як дуги, що проходить через центри електродів в напрямку до країв ванни з радіусом $R_{\partial+}$ та в напрямку до центру ванни з радіусом $R_{\partial-}$.

Після реалізації вище зазначених блоків така модель дозволить в динаміці відслідковувати параметри плавки. Розрахунок енергії, що виділилась внаслідок проходження струму через шихту здійснюється на основі електричного опору шихти, а температурного поля ванни проводиться за допомогою формули зміни теплоємності елементарного об'єму.

Знаючи температури в кожній точці ванни, робиться перевірка на можливість додаткового виділення теплоти за рахунок самозаймання коксика. Якщо це має місце робиться перерахунок температурного поля. Далі, модель враховує процеси теплопередачі між елементарними об'ємами, тому здійснюється перерахунок температурного поля ванни внаслідок процесів теплопередачі.

Після знаходження остаточного значення температури на даному кроці розрахунків стає можливим визначення кількості утвореного розплаву та розрахунок кількості шихти, що необхідно підсипати. Після чого можливо

вивести параметри печі на даному кроці розрахунків. Далі алгоритм працює циклічно.

Універсальність цього алгоритму полягає у можливості переналаштування циклу розрахунків в залежності від поставлених задач, таких, наприклад, як:

- визначення витраченої кількості електричної енергії (з показником часу);
- визначення кількості утвореного розплаву (з показником часу).
- та інше.

2.3 Синтез функціональних блоків моделі

2.3.1 Алгоритм розбиття внутрішньої області печі на елементарні об'єми

Перш ніж змодельовати процес розподілення енергії у ванні руднотермічної печі, потрібно розбити її внутрішній об'єм на елементарні складові. Для цього існує багато способів, але нами обраний та дещо змінений метод, який базується на системі циліндричних координат і був успішно використаний раніше для побудови динамічної моделі температурного поля в електричному теплоакumuлюючому перетворювачі [51].

Геометрично ванну руднотермічної печі, де відбувається процес плавки, можна представити у вигляді циліндра з висотою H та радіусом R . Розіб'ємо його на ряд елементарних об'ємів у вигляді сектора зі сторонами ΔR , Δz та кутом $\Delta \varphi$, як представлено на рисунку 2.5. Подальші розрахункові точки розташуємо в геометричних центрах кожного з цих елементарних об'ємів.

Введемо наступні позначення: R_l – радіус ванни; ΔV – об'єм елементарного сектору; k – номер елементарного об'єму за віссю R ; N_φ – кількість сегментів $\Delta \varphi$ розбиття циліндра за кутом φ ; N_z – кількість проміжків Δz розбиття циліндра за висотою H_c заповнення ванни шихтою; R, φ, z – координати центру; $\Delta \tau$ – проміжок часу.

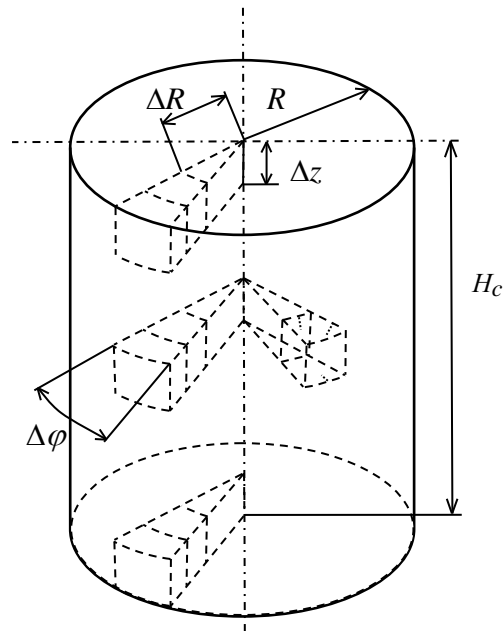


Рис. 2.5. Розбиття ванни руднотермічної печі на елементарні об'єми.

Зазначені параметри Δz та $\Delta \varphi$ розраховуються за допомогою нескладних формул:

$$\Delta \varphi = \frac{360}{N_{\varphi}}; \quad (2.13)$$

$$\Delta z = \frac{H_c}{N_z}. \quad (2.14)$$

де N_{φ} – кількість сегментів розбиття циліндра за кутом φ ; N_z – кількість проміжків розбиття циліндра за висотою; H_c – висота заповнення ванни шихтою.

Прийнявши значення елементарного об'єму ΔV незмінним та, у відповідності до цього, визначимо інтервали ΔR_k за віссю R :

$$\Delta R_k = \sqrt{\frac{\Delta V \cdot N_{\varphi}}{\pi \cdot \Delta z}} \cdot (\sqrt{k+1} - \sqrt{k}),$$

де k – номер створеного кола за віссю R .

Послідовність запропонованого розбиття ванни руднотермічної печі на елементарні об'єми представлена на рисунку 2.6. Завдяки наведеному алгоритму можна синтезувати спрощену сегментну модель об'єму печі у тривимірному просторі, яка в подальшому використовується у якості базової для багатьох розрахунків щодо показників ефективності роботи технологічної установки, що розглядається.

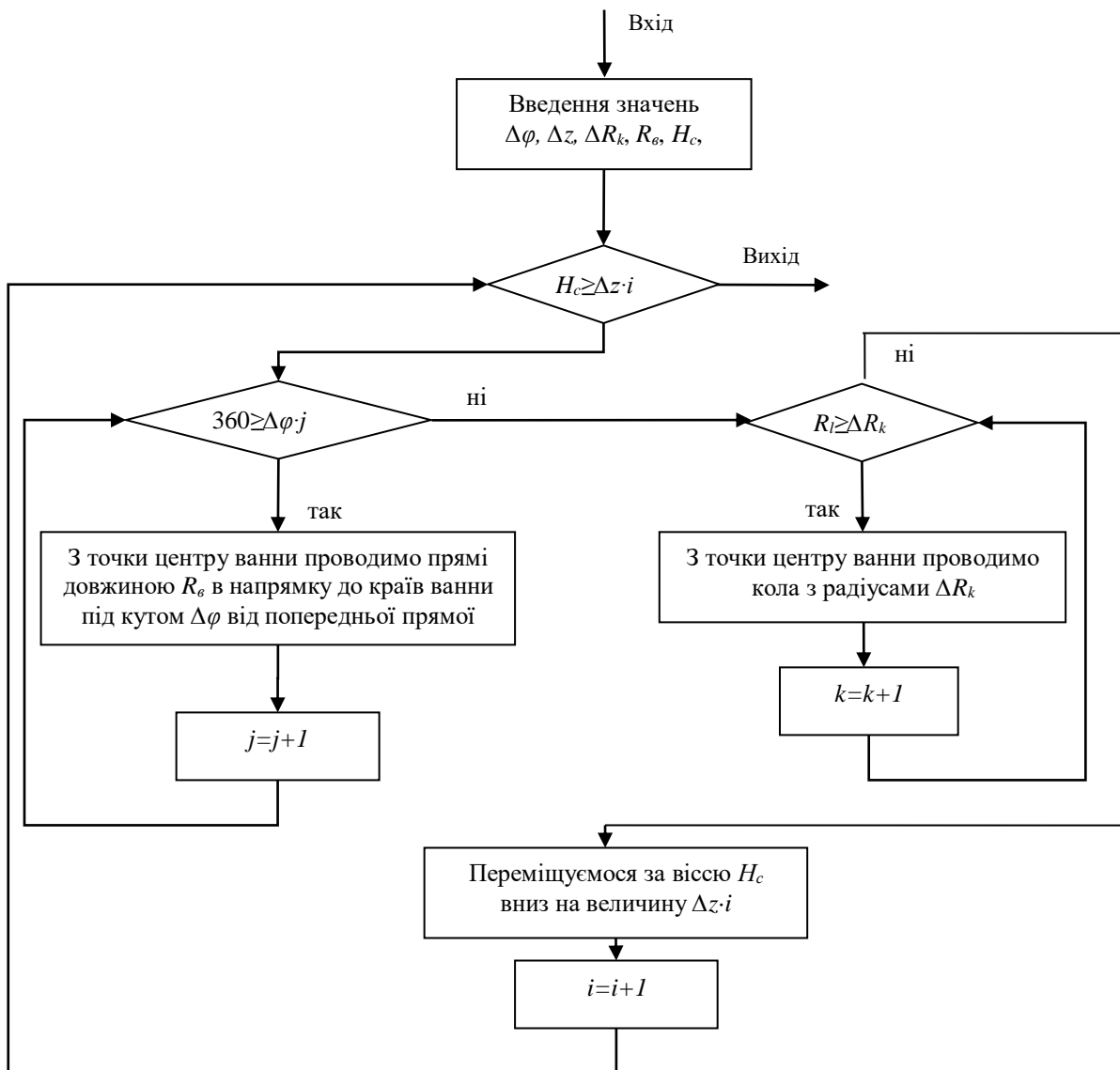


Рис. 2.6. Алгоритм розбиття внутрішньої області ванни руднотермічної печі на елементарні об'єми

Початковою інформацією для алгоритму є значення: $\Delta\varphi$, Δz , ΔR_k , R_l , H_c , які розраховуються за наведеними вище формулами чи є геометричними параметрами печі. Змінні j , k , i виконують роль лічильника для переходу на наступний крок дій. Після завершення всіх циклів, відбувається вихід з алгоритму для проведення подальших розрахунків електричних параметрів і інших величин на основі такого розбиття ванни РТП.

Так, якщо елементарні об'єми будуть дуже малими за розмірами, то через значний масив даних уповільнюється швидкість проведення необхідних розрахунків. Коли ж робочий простір печі поділити на невелику кількість зазначених сегментів, то це може призвести до неадекватності отриманої моделі. Тож у кожному конкретному випадку це питання необхідно вирішувати окремо.

2.3.2 Алгоритм визначення шляхів розтікання струму в ванні руднотермічної печі

Як зазначено в [52], для того щоб визначити кількість введеної електричної енергії в кожний елементарний об'єм печі необхідно з'ясувати як саме розтікається стум у робочому просторі її ванни. Адже шихта для виплавки феросплавів являє собою середовище, де за певними траєкторіями між електродами і протікають струми. Припустимо що вони матимуть, як представлено на рисунку 2.7, форму дуги і будуть направлені як до країв ванни так і до її центру у горизонтальній площині. У вертикальній же площині протікання буде проходити між кінцями електродів у напрямку до подини ванни. Дане припущення зроблене на основі наукових праць [53, 54], в яких траєкторії протікання струмів в піделектродному просторі зображені лініями, що направлені від електрода до подини ванни РТП та мають дуговий характер.

Розбиття області плавки відбувається за параметром H_c – глибиною заповнення ванни шихтою. Нульова точка відліку – верхня межа цього заповнення.

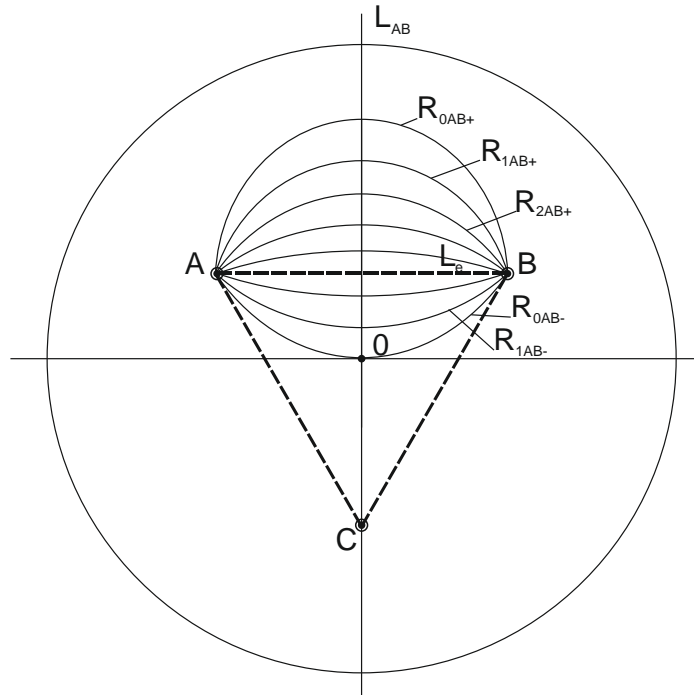


Рис. 2.7. Шляхи розтікання струму між електродами фаз A та B

Шляхи протікання струму між електродами в горизонтальній площині можна представити як дуги з радіусами, що проходять через центри електродів і зміщуються в напрямку до країв ванни R_{a+} та до її центру R_{a-} .

Для того щоб провести дуги між електродами необхідно знати їх радіуси та координати центрів. Останні знаходяться на лінії, що проходить через третій електрод перпендикулярно найкоротшому шляху між двома іншими з них. Радіус та довжину кожної такої дуги можна розрахувати за допомогою формул, які можна отримати з дещо видозмінених загальновідомих геометричних залежностей для знаходження різних параметрів кола.

Змоделюємо шляхи розтікання струму між електродами фаз A та B в напрямку до країв ванни печі. Між центрами електродів проводиться лінія довжиною L_e . Розрахуємо шаг зміни радіуса дуги:

$$\Delta k_{a.c+} = \frac{L_e}{2 \cdot k_{a.c+}}, \quad (2.15)$$

де $k_{a.c+}$ - кількість прийнятих до розгляду шляхів розтікання струму між електродами A та B в напрямку до країв ванни печі.

Креслимо нульову дугу з радіусом R_{a0AB+} та центром що знаходиться посередині зазначеної лінії L_e . Радіус та її довжину визначаємо таким чином:

$$R_{a0AB+} = \frac{L_e}{2} \quad (2.16)$$

$$L_{a0AB+} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{L_e}{2 \cdot R_{a0AB+}}\right) \cdot R_{a0AB+} \quad (2.17)$$

Для того щоб провести наступну дугу розрахуємо її радіус та зміщення точки центру на відстань відносно лінії L_e в бік до центру печі по лінії L_{AB} , що проходить між центрами ванни печі та третім електродом у фазі С за виразами:

$$R_{a1} = \frac{(L_e / 2 - \Delta k_{a.c} \cdot 1)}{2} + \frac{L_e^2}{8 \cdot (L_e / 2 - \Delta k_{a.c} \cdot 1)} \quad (2.18)$$

$$-c.p.R_{a1} = \sqrt{R_{a1}^2 - (L_e / 2)^2} \quad (2.19)$$

Щодо будь-якої іншої дуги іншої вирази (2.17)-(2.19) приймають наступний вигляд:

$$R_{ai} = \frac{(L_e / 2 - \Delta k_{a.c} \cdot i)}{2} + \frac{L_e^2}{8 \cdot (L_e / 2 - \Delta k_{a.c} \cdot i)} \quad (2.20)$$

$$-c.p.R_{ai} = \sqrt{R_{ai}^2 - (L_e / 2)^2} \quad (2.21)$$

$$L_{ai} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{L_e}{2 \cdot R_{ai}}\right) \cdot R_{ai} \quad (2.22)$$

де i – номер дуги, який змінюється в межах від 0 до $ka.c+..$

Щоб визначити шляхи розтікання струму між електродами фаз A та B у

бік до центру ванни печі необхідно провести наступні розрахунки. Як зазначалося вище всі точки центрів дуг знаходяться на лінії L_{AB} , а нульовою точкою відліку є перетин її з лінією L_e . В даному випадку скоригуємо нульову точку відліку перемістивши її на відстань $+c.p.R_{a0}$ та розрахувавши радіус нульової дуги R_{a0AB-} , шаг зміни радіуса $\Delta k_{a.c-}$:

$$R_{a0AB-} = R_e \quad (2.23)$$

$$+c.p.R_{a0} = \frac{R_e}{2} \quad (2.24)$$

$$\Delta k_{a.c-} = \frac{R_e}{2 \cdot k_{a.c-}} \quad (2.25)$$

де $k_{a.c-}$ - кількість шляхів розтікання струму між електродами A та B в напрямку до центру ванни печі; R_e – радіус на якому розташовані електроди відносно центру ванни печі.

Для того щоб провести наступні дуги скористаємося вище описаною послідовністю та наведеними виразами (2.18)-(2.21). В результаті і отримаємо картину розтікання струму між електродами, що вже представлено на рисунку 2.7. Аналогічним чином відбувається процес моделювання шляхів розтікання струму між фазами BC та CA .

Після того як визначено шляхи розтікання струму, використавши запропонований варіант розбиття робочого простору РТП на елементарні об'єми, отримаємо двовимірне зображення, представлене на рисунку 2.8 в горизонтальній площині та у піделектродному просторі відповідно рисунок 2.9 [55].

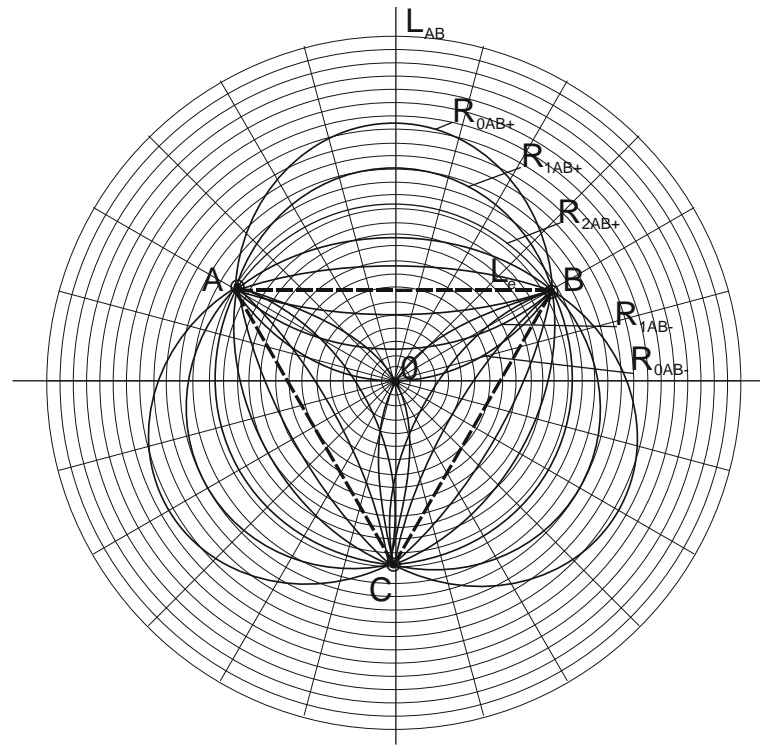
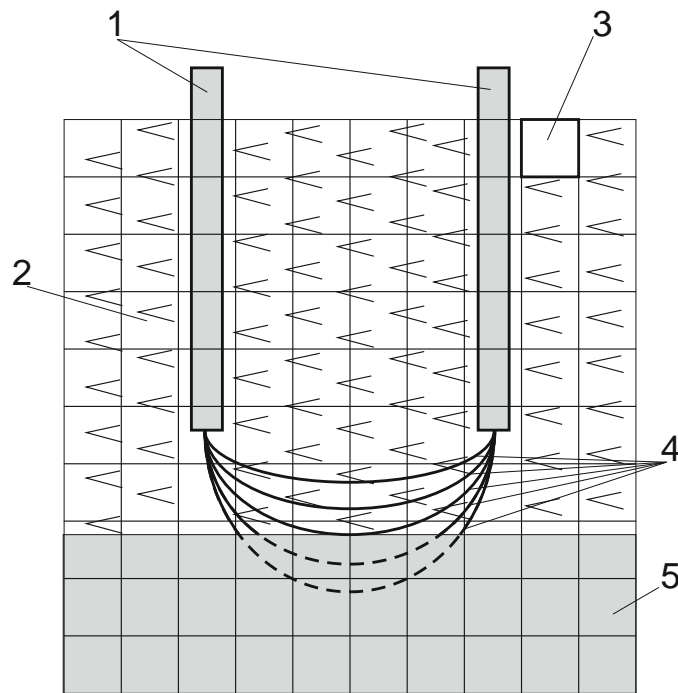


Рис. 2.8. Шляхи розтікання струму між трьома електродами в робочому просторі ванни.



1 – електроди; 2 – шихта в твердому стані; 3 – елементарний об'єм; 4 – шляхи протікання струму; 5 – рідкий розплав.

Рис. 2.9. Шляхи розтікання струму між електродами фаз А та В в піделектродному просторі.

Шихта в кожній елементарній об'ємній складовій ΔV за певної

температури має свій питомий електричний опір [56, 57]. Тоді значення електричного опору елементарного об'єму буде визначатися, як:

$$R_{R,\varphi,z} = \rho_{R,\varphi,z}(t) \cdot \Delta V \quad (2.26)$$

де $\rho_{R,\varphi,z}(t)$ – питомий опір елементарного об'єму, Ом/м³;

Маючи шляхи розтікання струму в робочому просторі РТП, на основі запропонованого методу розбиття ванни на елементарні об'єми, можна розрахувати кількість введеної в них електричної енергії за певний проміжок часу. Для цього необхідно виділити конкретну траєкторію протікання струму і розрахувати її повний електричний опір. Останній може бути визначений як сумарний опір всіх об'ємів шихти через які проходить зазначений струм:

$$R_t = \sum R_{R,\varphi,z} \quad (2.27)$$

де R_t – повний електричний опір будь-якої траєкторії протікання струму, Ом; $R_{R,\varphi,z}$ – усереднене значення електричного опору об'єму, Ом.

Очевидно, що в подальшому у заданій системі координат необхідно вибрати тільки ті елементарні об'єми де пройшов струм, шлях якого розглядається, та підсумувати їх загальний опір, який розраховується для конкретної температури шихти. В результаті може бути отримана величина струму, що протікає за розглядуваною траєкторією:

$$I_i = \frac{U}{R_t} \quad (2.28)$$

де I_i – сила струму на i -му шляху, А; U – напруга між відповідними фазами, В; R_t – повний електричний опір i -го шляху, Ом.

Отже, підставивши в формулу (2.28) вирази (2.26, 2.27), і отримаємо

залежність для знаходження сили струму за певною траєкторією розтікання:

$$I_i = \frac{U}{\sum (\rho_{R,\phi,z}(t) \cdot \Delta V)} \quad (2.29)$$

де I_i – сила струму на i -му шляху, А; U – напруга між відповідними фазами, В; $\rho_{R,\phi,z}(t)$ – питомий опір елементарного об'єму, Ом/м³; ΔV – об'єм елементарної частинки, м³.

В результаті кількість енергії, що виділилась в елементарному об'ємі за рахунок електричного струму за проміжок часу $\Delta\tau$ може бути визначена як [58]:

$$Q_{e(R,\phi,z)} = I_i^2 \cdot R_{R,\phi,z} \cdot \Delta\tau, \quad (2.30)$$

де $R_{R,\phi,z}$ – значення електричного опору елементу, Ом; $\Delta\tau$ – проміжок часу, с.

Якщо ж через один і той самий елементарний об'єм проходить декілька різних траєкторій розтікання струму, то результуюче значення останнього визначається як сума складових за кожною з них. Тоді формула (6) прийме вигляд:

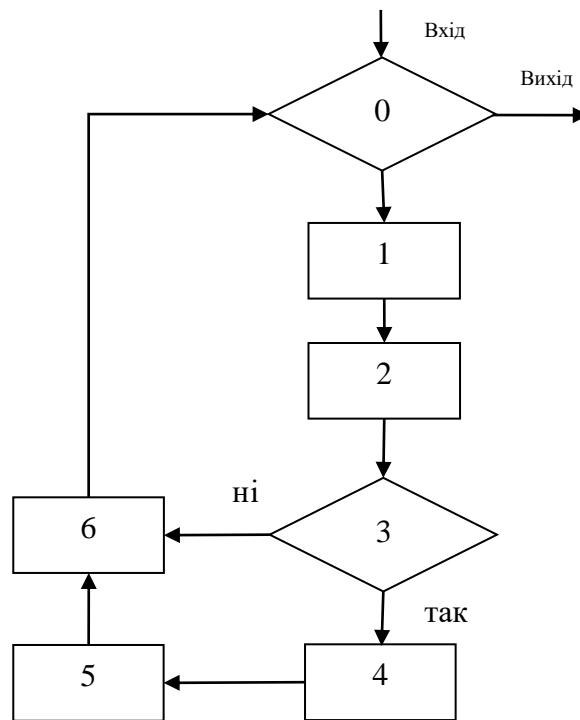
$$Q_{e(R,\phi,z)} = (\sum I_i)^2 \cdot R_{R,\phi,z} \cdot \Delta\tau, \quad (2.31)$$

де $\sum I_i$ - сума струмів за i -тими шляхами розтікання, що проходять через елементарний об'єм, що розглядається.

2.3.3 Алгоритм розрахунку температурного поля в ванні печі

Для визначення температурного поля ванни руднотермічної печі в динаміці необхідно розрахувати температуру в кожному елементарному об'ємі

печі в будь-який момент часу. Запропонований для цього алгоритм представлений на рисунку 2.10.



0 – Перевірка розрахункового часу; 1 – Визначення введеної кількості теплоти за рахунок електричного струму в кожний елементарний об'єм протягом часу $\Delta\tau$; 2 – Розрахунок значення температури кожного елементарного об'єму; 3 – Перевірка відповідності температури елементарного об'єму температурі самозаймання коксиду; 4 – Розрахунок введеної кількості теплоти в кожний елементарний об'єм за рахунок згорання коксиду; 5 – Перерахунок температури кожного елементарного об'єму; 6 – Розрахунок температури кожного елементарного об'єму з урахуванням процесу теплопередачі між ними.

Рис. 2.10. Блок-схема алгоритму розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі в динаміці

Вхідними даними для алгоритму є початкові значення таких параметрів шихти як: питома щільність та електричний опір, коефіцієнт теплопровідності, масова теплоємність, які визначаються в залежності від складу шихти та її температури. Визначення введеної кількості теплоти за рахунок електричного

струму в кожний елементарний об'єм проводиться за певний проміжок часу $\Delta\tau$. Знаючи шляхи розтікання струму та його значення у цих напрямках в плавильній ванні з урахуванням елементарних об'ємів на які поділена піч можна розрахувати кількість енергії, яка виділилась в кожному з них.

Наступним кроком є розрахунок значення температури кожного елементарного об'єму, який робиться за допомогою формули зміни теплоємності:

$$\Delta J_{R,\varphi,z} = c_{m(R,\varphi,z)} \rho_{(R,\varphi,z)} (t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau} - t_{R,\varphi,z}^{\Delta\tau}) \Delta V, \quad (2.32)$$

де c_m – масова питома теплоємність елементарного об'єму, Дж/(кг·К);

ρ - питома густина розрахункового об'єму, кг/м³;

$t_{R,\varphi,z}^{\tau}, t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau}$ - розрахункова температура в проміжку часу між моментами τ та $\tau+\Delta\tau$ у центрі елементарного об'єму, К;

R, φ, z - координати центру.

На даному етапі розрахунків зміна теплоємності відбувається за рахунок внесення електричної енергії, тобто $\Delta J_{R,\varphi,z} = Q_{e(R,\varphi,z)}$. Тоді для знаходження температури елементарного об'єму формула (2.32) прийме вигляд:

$$t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau} = \frac{Q_{e(R,\varphi,z)}}{c_{m(R,\varphi,z)} \rho_{R,\varphi,z} \Delta V_{R,\varphi,z}} + t_{R,\varphi,z}^{\Delta\tau} \quad (2.33)$$

В алгоритмі враховується також той факт, що при певній температурі відбувається процес самозаймання і подальшого згорання коксиду, що супроводжується додатковим виділенням теплоти. Тому в блоці 3 передбачена перевірка відповідності зазначених умов температурі кожного елементарного об'єму. Якщо це «Так», то робиться перехід до блоку 4, якщо ж «Ні» до блоку 6. Очевидно, що процес горіння коксиду в різних елементарних об'ємах ванни

буде не одночасним. Там де це відбувається розраховується кількість додатково введеної теплоти (Блок 4) за наступною формулою:

$$Q_{v(R,\varphi,z)} = m_{R,\varphi,z} \cdot q, \quad (2.34)$$

де $Q_{v(R,\varphi,z)}$ - теплота, що виділилась при згоранні коксика;

$m_{R,\varphi,z}$ – маса коксика, що знаходиться в елементарному об'ємі;

q – питома теплота згорання коксика.

При зазначеному виділені додаткової теплоти зміниться теплоємність об'єма і відповідно значення температури, тож необхідно зробити відповідний перерахунок (Блок 5):

$$t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau} = \frac{Q_{vi}}{c_{m(R,\varphi,z)} \rho_{R,\varphi,z} \Delta V_{R,\varphi,z}} + t_{R,\varphi,z}^{\Delta\tau} \quad (2.35)$$

Процес теплопередачі між елементарними об'ємами (Блок 6) розраховується за допомогою рівняння теплового балансу для розглянутого елементарного об'єму, який визначається як:

$$\Delta J_{R,\varphi,z} = \sum_I^{VI} Q_i, \quad (2.36)$$

де $Q_I, Q_{II}, Q_{III}, Q_{IV}, Q_V, Q_{VI}$ - кількість теплоти, що увійшло або вийшло з елементарного об'єму за час $\Delta\tau$ через відповідні індексам грані;

$\Delta J_{R,\varphi,z}$ - зміна теплоємності останнього. Індокси i – номер грані елементарного об'єму.

Так згідно гіпотезі Фур'є [59], кількість теплоти, що входить в елементарний об'єм зі сторони i -й грані можливо представити у вигляді:

$$Q_i = -\lambda_i \text{grad}_i S_i \Delta \tau, \quad (2.37)$$

де λ_i - еквівалентний коефіцієнт теплопровідності в i -м напрямку, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

grad_i – градієнт температури в i -му напрямку, $(\text{К}/\text{м})$;

S_i - площа i -ї грані, м^2 ;

$\Delta \tau$ - проміжок часу, с .

Розглянемо більш детально визначення величин, що зазначені в рівнянні (2.37). Так еквівалентні коефіцієнти теплопровідності:

$$\lambda_I = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^r + \lambda_{R,\varphi,z+\Delta z}^r}{2}, \quad (2.38)$$

$$\lambda_{II} = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^r + \lambda_{R-\Delta R,\varphi,z}^r}{2}, \quad (2.39)$$

$$\lambda_{III} = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^r + \lambda_{R,\varphi+\Delta\varphi,z}^r}{2}, \quad (2.40)$$

$$\lambda_{IV} = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^r + \lambda_{R,\varphi-\Delta\varphi,z}^r}{2}, \quad (2.41)$$

$$\lambda_V = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^r + \lambda_{R+\Delta R,\varphi,z}^r}{2}, \quad (2.42)$$

$$\lambda_{VI} = \frac{\lambda_{R,\varphi,z}^r + \lambda_{R,\varphi,z-\Delta z}^r}{2}. \quad (2.43)$$

Що ж до градієнтів температур в i -му напрямку, то вони розраховуються за формулами:

$$\Delta t_I = \frac{t_{R,\varphi,z}^\tau - t_{R,\varphi,z+\Delta z}^\tau}{\Delta z}, \quad (2.44)$$

$$\Delta t_{II} = \frac{t_{R,\varphi,z}^\tau - t_{R-\Delta R,\varphi,z}^\tau}{\Delta R}, \quad (2.45)$$

$$\Delta t_{III} = \frac{t_{R,\varphi,z}^\tau - t_{R,\varphi+\Delta\varphi,z}^\tau}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2} (2\Delta R_k + \Delta R_{k+1})}, \quad (2.46)$$

$$\Delta t_{IV} = \frac{t_{R,\varphi,z}^\tau - t_{R,\varphi-\Delta\varphi,z}^\tau}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2} (2\Delta R_k + \Delta R_{k+1})}, \quad (2.47)$$

$$\Delta t_V = \frac{t_{R,\varphi,z}^\tau - t_{R+\Delta R,\varphi,z}^\tau}{\Delta R}, \quad (2.48)$$

$$\Delta t_{VI} = \frac{t_{R,\varphi,z}^\tau - t_{R,\varphi,z-\Delta z}^\tau}{\Delta z}. \quad (2.49)$$

А площі верхньої та нижньої поверхонь, що обмежують елементарний об'єм:

$$S_I = S_{VI} = \frac{\Delta V}{\Delta z}. \quad (2.50)$$

бічних:

$$S_{III} = S_{IV} = \Delta R \cdot \Delta z. \quad (2.51)$$

радіусних:

$$S_{II} = \frac{2\pi \cdot \sum_{k=1}^k \Delta R_k}{N_\varphi} \Delta z, \quad (2.52)$$

$$S_{II} = \frac{2\pi \cdot \left(\sum_{\gamma=1}^k \Delta R_k + \Delta R_{k+1} \right)}{N_{\varphi}} \Delta z. \quad (2.53)$$

Тож алгоритм розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі за проміжок часу Δt складається з двох циклів. Знаючи значення температури елементарного об'єму після введення в нього електричної енергії (Блок 1 та Блок 2), відбувається перевірка на досягнення температури самозаймання коксиду та, якщо це має місце, враховується додаткове введення теплоти за рахунок процесу його горіння (Блоки 4, 5). Після чого моделюється процес розтікання теплоти за рахунок теплопередачі (Блок 6) та перераховується діюче значення температури.

Вихідною інформацією розрахункового алгоритму, що розглядається є значення температур елементарних об'ємів після електричних, хімічних та теплових процесів, що відбулися в них за проміжок часу Δt . Після чого повертаємося на початок всього алгоритму і розраховуємо значення температур для наступного інтервалу часу. Отже, розрахувавши послідовно значення температур в усіх заданих точках ванни руднотермічної печі ми отримаємо розподіл температур в об'ємі на усіх проміжках часу технологічного процесу і отримаємо динамічне зображення зміни температурного поля печі в процесі виплавки феросплавів.

2.3.4 Алгоритм процесу утворення та зливу розплаву з руднотермічної печі

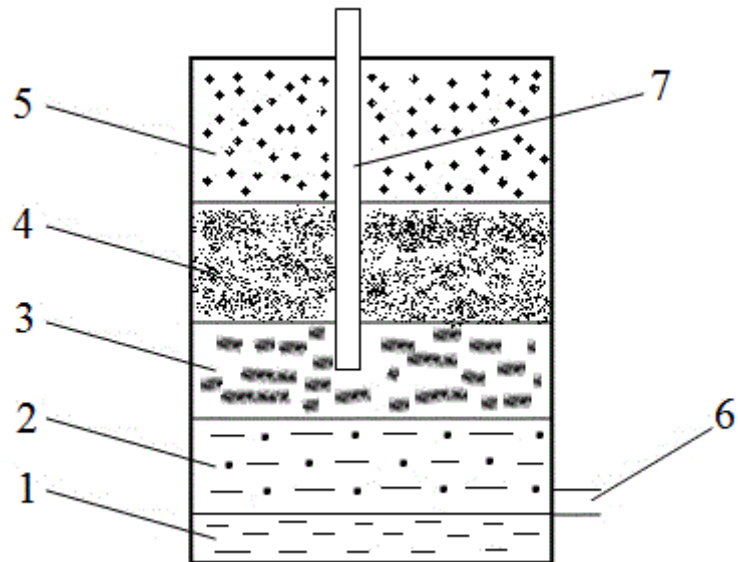
Заповнення ванни РТП є складним за своїм устроєм. Воно містить шихту, що знаходиться у різному фізико-хімічному стані (від твердих шматків до тістоподібної магми), шлак і метал. Фізичні процеси, що при цьому

відбуваються є дуже різними. Одні з них безперервні, а інші здійснюються одноразово до повного проплавлення завантажених матеріалів.

На більшості підприємств України процес виплавки феросплавів є безперервним, тобто випуск готової продукції відбувається циклічно з зупиненням РТП тільки у разі аварійних або технологічних ремонтів. При цьому виплавку здійснюють за допомогою технологічних карт, де завантаження шихти, тривалість виплавки, момент випуску рідкого металу та ін., обумовлюють показаннями електричних лічильників і нормами споживання електричної енергії на тонну завантаженої шихти.

Нагрівання матеріалів в об'ємі ванни є неоднорідним, але металурги розглядають температурні зони, відповідно тому, що подано на рисунку 2.11 [60]. Так у нижній частині ванни РТП знаходиться рідкий розплав, що називається демпферним прошарком, який необхідний для захисту внутрішньої футеровки ванни від температурних перегрівань. Над ним з температурою плавлення (на жаль, навіть більшою) знаходиться рідкий метал. На цьому ж рівні є отвір через який роблять зливання зазначеного продукту та випуск шлаку. В процесі нагрівання шихти до температури плавлення відбувається утворення останнього і його піднімання над першим. В так званій шлаковій зоні знаходяться електроди, глибину занурення яких можна змінювати.

У верхній частині ванни РТП виділяють дві зони: холодну (з температурою шихти 300...700 °С) та розігріту (вище 700 °С), що вже має червоний колір. Оскільки процес виплавки феросплавів є безперервним, то зливання рідкого металу й шлаку, засипання нових шихтових матеріалів відбувається циклічно впродовж певного часу. По завершенні плавки одержують готову продукцію, яку випускають з робочого об'єму ванни, проте зазначені температурні зони зберігаються і мають постійних характер.



1 - рідкий розплав (демпферний шар); 2 - рідкий розплавлений метал; 3 - шлакова зона; 4 – шихта, що розігріта до червоного кольору; 5 - зона холодної шихти; 6 - вікно для зливу рідкого феросплаву та шлаку; 7 – електрод.

Рис. 2.11. Температурні зони в ванні руднотермічної печі під час виплавки феросплавів

Якщо розглядати дію руднотермічної печі від початку її роботи, то у загальному вигляді можна виділити певні етапи. На першому з них розігрівається робочий об'єм. Щоб уникнути зайвих втрат електроенергії в шихту додають значну кількість коксик, оскільки він має найбільшу серед складових електричну провідність, це призводить до більш рівномірного початкового розігрівання. Внизу ванни поступово утворюється певний шар рідкого металу. Далі підсипають всі інші необхідні компоненти для виплавляння необхідної марки феросплавів, після цього починають утворюватися теплові зони, що зазначені на рисунку 2.11, і відбувається процес плавки, який і регламентується технологічними картами. З рештою рідкий метал разом зі шлаком випускається. Залишковий матеріал, що остається у печі, зі своєю певною температурою опускається до низу ванни на об'єм, який звільнився у ній. Після чого шихту знову підсипають і нагрівання матеріалів до рідкого стану повторюють, тож процес одержання феросплавів і набуває циклічного характеру.

Перетворення матеріалу з твердої фази у рідку визначається значенням температури, за якої відбувається розплавлення різних видів феросплавів. На рисунку 2.12 наведений запропонований алгоритм для визначення кількості утвореного розплаву та шлаку в дискретні проміжки часу [61].

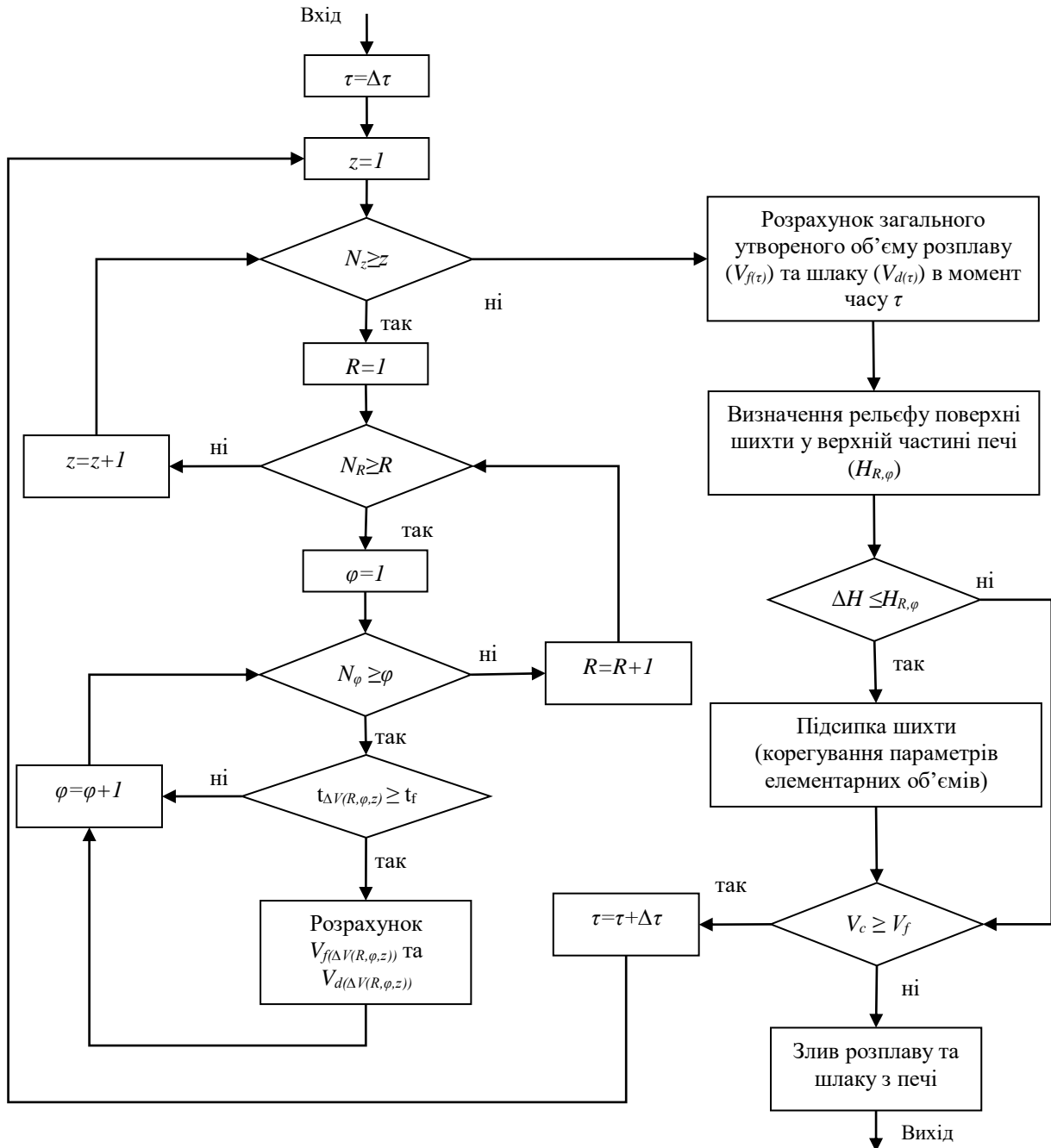


Рис. 2.12. Алгоритм для визначення кількості утвореного розплаву та шлаку в динаміці

Нами використані наступні позначення: τ – час; $\Delta\tau$ – проміжок часу; R, φ, z – координати центру елементарного об'єму за трьома осями; N_φ – кількість

сегментів $\Delta\varphi$ розбиття циліндра за кутом φ ; N_z – кількість проміжків Δz розбиття циліндра за висотою заповнення ванни шихтою; N_R – кількість сегментів за радіусами розбиття печі; ΔV – об'єм елементарного сектору; $t_{\Delta V(R,\varphi,z)}$ – температура елементарного об'єму з відповідними координатами; t_f – температура утворення розплаву та шлаку; $V_{f(\Delta V(R,\varphi,z))}$, $V_{d(\Delta V(R,\varphi,z))}$ – об'єм утвореного розплаву та шлаку в елементарному об'ємі з координатами R,φ,z ; $V_{f(\tau)}$ та $V_{d(\tau)}$ – загальний об'єм утвореного розплаву та шлаку в момент часу τ відповідно; $(H_{R,\varphi})$ – рівень просідання шихти від початкового його заповнення; ΔH – гранично допустимий рівень просідання шихти; V_c та V_f – заданий та розрахунковий загальний об'єм розплаву, що утворився з початку роботи печі.

Вхідними даними для розрахунків за цим алгоритмом є значення температури в кожному елементарному об'ємі, після чого на будь-якому етапі часу за допомогою відповідних циклів відбувається перевірка кожного елементарного об'єму на досягнення в ньому температури розплавлення. Якщо це відбувається то, знаючи масу та густину рідкого розплаву та шлаку при даній температурі, розраховується їх реальний об'єм, одержаний в результаті зазначених фазових переходів, в одному елементарному об'ємі:

$$V_{f(\Delta V(R,\varphi,z))} = \frac{m_c \cdot \alpha_f}{\rho_f}; \quad (2.54)$$

$$V_{d(\Delta V(R,\varphi,z))} = \frac{m_c \cdot \alpha_d}{\rho_d}, \quad (2.55)$$

де $V_{f(\Delta V)}$, $V_{d(\Delta V)}$ – об'єм рідкого феросплаву та шлаку в елементарному об'ємі (м^3);

m_c – маса шихтових матеріалів, що знаходиться в елементарному об'ємі (кг);

ρ_f – густина рідкого розплаву $\rho_f=7140$ (кг/м³);

ρ_d – густина шлаку $\rho_d=2800$ (кг/м³);

α_f – коефіцієнт отримання чистих феросплавів з шихтових матеріалів $\alpha_f=0,7$;

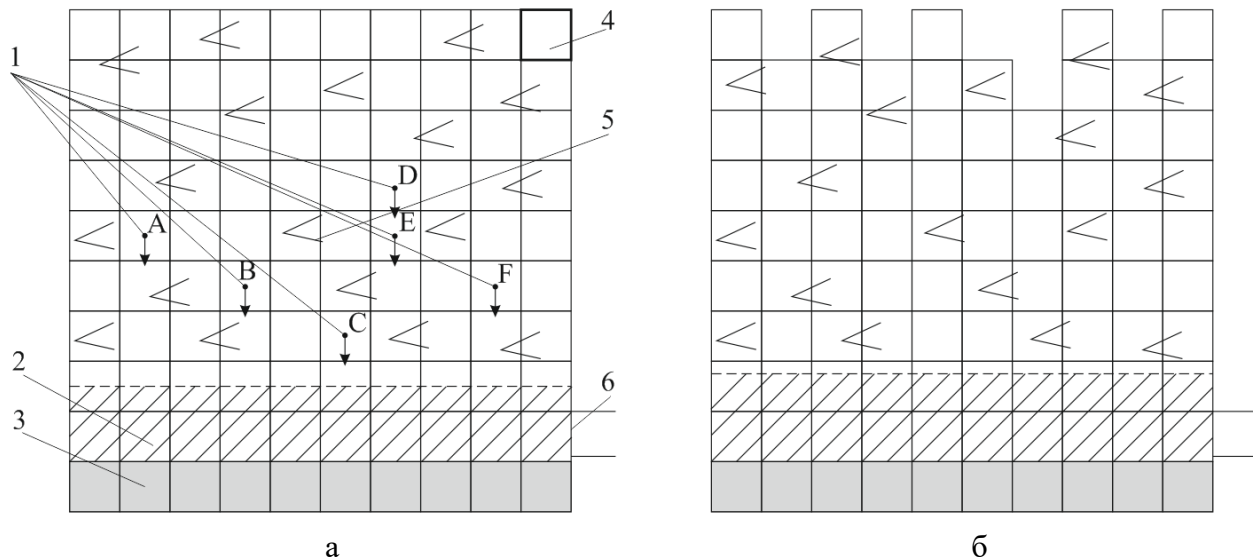
α_d – коефіцієнт отримання шлаку з шихтових матеріалів $\alpha_d = 0,3$.

Після цього розраховується загальний утворений об'єм розплаву та шихти за даний проміжок часу:

$$V_{f(\bar{\alpha})} = \sum V_{f(\Delta V(R,\varphi,z))}; \quad (2.56)$$

$$V_{d(\bar{\alpha})} = \sum V_{d(\Delta V(R,\varphi,z))}. \quad (2.57)$$

При фазовому переході шихта перетворюється в розплав та шлак внаслідок чого в відповідних місцях ванни руднотермічної печі відбувається її осідання до низу. Припустимо, що в елементарних об'ємах *A, B, C, D, E, F* це сталося і розплав та шлак, який просочився по вертикалі (рисунок 2.13а), вивільнив простір, куди переміщається верхній об'єм, а зона розплаву при цьому збільшується на таку ж величину (рисунок 2.13б).



1 – елементарні об'єми, температура яких досягла величини за якої відбувається фазовий перехід ; 2 – рідкий розплав; 3 – демпферний шар розплаву; 4 – елементарний об'єм; 5 – шихтові матеріали; 6 – отвір для зливу рідкого феросплаву та шлаку.

Рис. 2.13. Просідання шихти внаслідок утворення розплаву та шлаку

З рисунку 2.13б видно, що в результаті фазових перетворень шихтових матеріалів в різних об'ємних точках робочого простору РТП збільшується кількість готового рідкого феросплаву та відбувається просідання шихти у верхній частині ванни. Максимально допустима величина просідання шихти поблизу електродів строго регламентується технічною документацією печі, тому якщо розрахункова величина $H_{R,\varphi}$ досягла її значення необхідно робити підсипку шихти під електроди. Внаслідок чого в алгоритм вносяться корективи щодо стану поверхні рельєфу та параметрів верхніх елементарних об'ємів.

Наступним кроком в алгоритмі є порівняння розрахункового об'єму утвореного розплаву за здійснений проміжок плавки з його заданим значенням. Якщо ці показники вже співпадають то треба зливати розплав та шлак, в іншому випадку переходимо до наступного проміжку часу і виконуємо ці розрахунки доки зазначена умова не виконається знову.

Тож, сумуючи всі елементарні об'єми, що досягли температури розплаву, можна визначити реальну кількість рідкого феросплаву, що утворюється в печі. Завдяки цьому стає можливим проводити злив готової продукції та шлаку з ванни РТП не за встановленими показниками спожитої електроенергії, а коли кількість розплаву досягне необхідної величини. Тобто, знаючи розподіл температури у ванні печі в певні проміжки часу [62], стає можливим розрахувати об'єм рідкого феросплаву, що утворився, і визначати кількість наявної готової продукції в будь-який момент плавки. Також завдяки представленій методиці можна відслідковувати в якій саме частині ванни РТП відбувається просідання шихти. А так як технологічний процес отримання феросплавів в більшості випадків є безперервним, то це дає змогу визначити де і в якій кількості необхідно її підсипати.

2.4 Висновки за розділом

1. Існуючі математичні моделі круглої трьохелектродної руднотермічної печі розглядають окремо питання розподілу електричної та теплової енергії в

середині її ванни. Вони не дають змогу отримати повну інформацію про піч та шихту протягом всього часу виплавки феросплавів.

2. Порівняльний аналіз відомих моделей свідчить про те, що всі вони спираються на метод вторинних джерел, який має ряд суттєвих недоліків. Тепломасообмінні процеси також розраховуються на основі системи інтегральних рівнянь з певними обмеженнями. Все це призводить до великих обсягів необхідних обчислювальних операцій.

3. Структура запропонованої моделі дає можливість об'єднувати всі електричні, теплові та технологічні процеси, які безпосередньо пов'язані між собою, в єдине ціле, що дозволяє отримувати повну інформацію про плавку в динаміці впродовж всього часу її проведення.

4. Розроблені алгоритми функціональних блоків моделі та запропонований математичний апарат для розрахунків, які в них здійснюються, легко реалізується за допомогою програмних засобів сучасної комп'ютерної техніки.

5. Налаштування запропонованої комплексної алгоритмічної моделі на роботу конкретної круглої трьохелектродної руднотермічної печі здійснюється за її геометричними та електричними параметрами, а також за фізичними властивостями шихти. Подальше використання цієї моделі щодо підвищення енергоефективності печі потребує перевірки на її адекватність реальному процесу.

РОЗДІЛ 3. ЗАХОДИ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ ТА НАЛАШТУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУДНОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ.

3.1 Взаємодія основних блоків математичної моделі печі

Приведений вище алгоритм моделі об'ємний і складний, а його практична реалізація в значній мірі залежить від правильної взаємодії розрахункових блоків, оскільки останні є окремі та завершені частини. Тому на основі запропонованого узагальненого алгоритму роботи руднотермічної печі в динаміці (рисунок 2.4) розроблена схема взаємодії блоків та потоків обміну даних між ними.

На рисунку 3.1 використовуються наступні позначення: R_l – радіус ванни [м]; H_c – висота заповнення ванни шихтою [м]; D_e – діаметр електродів [м]; H_e – глибина занурення електродів у ванну [м]; L_e – відстань між електродами [м]; R_e – радіус на якому розташовані електроди відносно центру ванни печі [м]; ΔV – об'єм елементарного сектору [м³]; N_φ – кількість сегментів $\Delta\varphi$ розбиття циліндра за кутом φ ; N_z – кількість проміжків Δz розбиття циліндра за висотою H_c заповнення ванни шихтою; $k_{a.c+}$, $k_{a.c-}$ – кількість дуг струму в напрямку до країв та центру ванни відповідно; $Vol(r, \varphi, z)$ – масив елементарних об'ємів з відповідними координатами; $Dugs$ – масив шляхів розтікання струму; $\rho_e(t)$ – залежність електричного опору шихти від температури [Ом/м]; $\Delta\tau$ – інтервал часу [с]; $Q_{w(r, \varphi, z)}$ – масив даних щодо виділеної енергії за рахунок проходження струму через кожний елементарний об'єм [кДж]; $t_{(r, \varphi, z)}$ – масив даних значень температури в елементарних об'ємах [°C]; $c_m(t)$ – залежність масової теплоємності шихти від температури [Дж/(кг·K)]; ρ – питома щільність шихти [кг/м³]; m_c – маса шихтових матеріалів, що знаходиться в елементарному об'ємі (кг); V_f – об'єм утвореного розплаву [м³]; W_f – спожита електрична енергія [кВт·год].

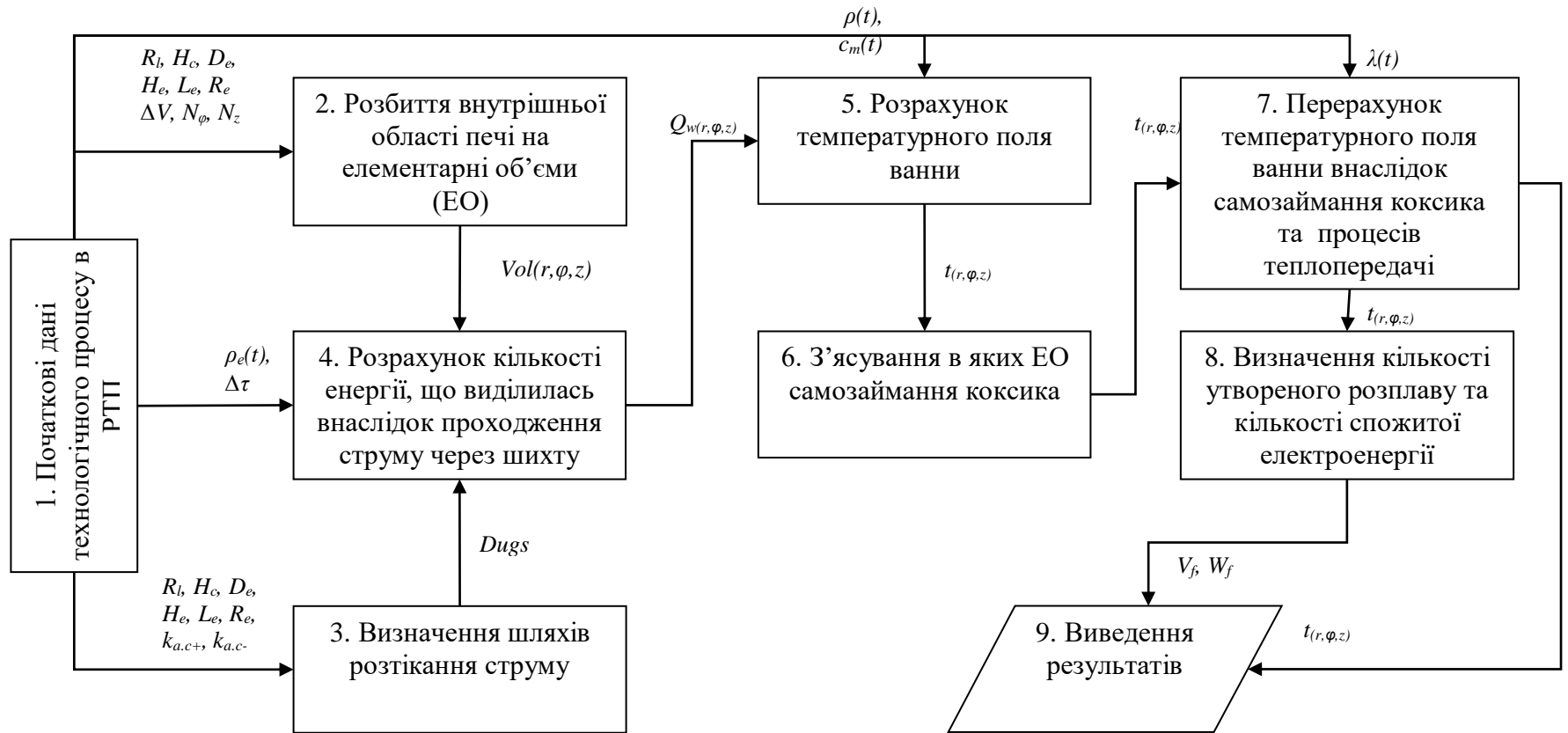


Рис. 3.1. Схема взаємодії основних блоків моделі

З цієї схеми взаємодії блоків видно, що в деяких з них (2, 3) розрахунки проводяться однократно на основі початкових умов технологічного процесу й в результаті формуються масиви даних, які в подальшому багаторазово використовуються впродовж дослідження. Інші ж блоки (4-8) входять до циклічної частини програми, де безпосередньо взаємодіють між собою на кожному етапі й накопичують дискретні та загальні результати обробки даних (блок 9).

3.2 Практична реалізація моделі

Комплексна модель роботи круглої руднотермічної печі реалізована за допомогою мови програмування *Python* з використанням бібліотек:

- *SciPy*, яка підтримує інтеграцію, градієнтну оптимізацію, спеціальні функції, засоби вирішення звичайних диференціальних рівнянь, інструменти паралельного програмування та багато іншого;

- *Matplotlib* для відображення проміжних результатів.

Візуалізацію отриманих результатів реалізовано в програмному забезпеченні *OpenSCAD*, данні в яке імпортуються за допомогою бібліотеки *SolidPython*.

Для зручності в користуванні окремо розроблений інтерфейс користувача, який дозволяє вводити початкові данні та переглядати результати розрахунків. Приклад його реалізації представлений на рисунках 3.2-3.3.

The screenshot shows a software window titled 'Furnace'. The main area is titled 'Початкові умови' (Initial Conditions) and contains several input fields with numerical values and units:

- Маса завантаженої шихти: 0 кг
- Залишок шихти: 0 кг
- Температура завантажувальної шихти: 0 °C
- Температура залишкової шихти: 0 °C
- Температура демпферного шару розплаву: 0 °C
- Дискретність розрахунків (Δt): 0.0 хв

On the right side, there is a vertical menu with the following items:

- Геометричні параметри
- Електричні параметри
- Початкові умови (highlighted)
- Параметри розбиття ванни печі на елементарні об'єми
- Умови завершення розрахунків
- Розрахунок
- Результати розрахунків

At the bottom of the window, there are three buttons: 'Нові вхідні дані', 'Завантажити вхідні дані', and 'Зберегти вхідні дані'. To the right of these are navigation buttons: '< Назад' and 'Далі >'.

Рис. 3.2. Введення початкових умов при моделюванні.

Рис. 3.3. Введення геометричних параметрів руднотермічної печі.

Аналогічним чином вводяться електричні та параметри розбиття ванни печі на елементарні об'єми, а результати розрахунків представлені у скороченому (рисунок 3.4) вигляді або ж можна зробити їх деталізацію за допомогою додаткових вкладок.

Рис. 3.4. Результати розрахунків.

Отже, як видно з рисунків, інтерфейс програми легкий і зручний у користуванні. Його можна змінювати, додаючи елементи або нові обмеження в розрахунках.

Реалізація моделі за допомогою мови програмування *Python* складається з модуля елементарних об'ємів, який містить в собі два класи *ElementaryUnit* – безпосередньо елементарний об'єм та *ElementaryVolumes* в якому зосередженні і обробляються масиви елементарних об'ємів за допомогою реалізації певних методів. Програмний код представлений нижче.

```
import math
from functions import
frange,cos,sin,tan,X,Y,pol_to_cart,pol_to_cart3d,card_to_pol,to180
,thirdPoint
class ElementaryUnit:
    def __init__(self, R1, R2, fi1, fi2, z1=0.0, z2=0.0):
        self.R1 = R1
        self.R2 = R2
        self.fi1 = fi1
        self.fi2 = fi2
        self.z1 = z1
        self.z2 = z2
    def __repr__(self):
        # return
        f'[R1={self.R1},R2={self.R2},fi1={self.fi1},fi2={self.fi2},z1={sel
f.z1},z2={self.z2}]'
        return
        f'[{self.R1},{self.R2},{self.fi1},{self.fi2},{self.z1},{self.z2}]'
class ElementaryVolumes:
    def __init__(self, DV=5.3, HV=2.0, d_z=0.1, d_fi=1.0,
c_k=15):
        self.DV=DV
        self.HV=HV
        self.d_z=d_z
        self.d_fi=d_fi
        self.c_k=c_k
        self.RV=DV/2.0
        self.d_V = ((math.pi * (self.RV**2) *
self.d_fi)/360) * self.d_z) / self.c_k
        self.d_Rk = lambda k: math.sqrt((360 * self.d_V) *
k/(math.pi * self.d_fi * self.d_z))
        self.Z_Array = list(frange(0.0, self.HV, self.d_z))
        self.FI_Array = list(frange(0.0, 360.0, self.d_fi))
        self.K_Array = list(range(1,self.c_k+1))
        self.Rk_Array = [0.0]
        for k in range(2,self.c_k+1):
            self.Rk_Array.append(self.d_Rk(k))
        self._genVolumes3d()
    def _genVolumes3d(self):
```

```

self.Vs = []
z_=self.Z_Array[0]
for z in self.Z_Array[1:]:
    fi_=self.FI_Array[0]
    for fi in self.FI_Array[1:]:
        rk_=self.Rk_Array[0]
        for rk in self.Rk_Array[1:]:

self.Vs.append(ElementaryUnit(rk_,rk,fi_,fi,z_,z))
                rk_=rk
                fi_ = fi
                z_ = z
    return self.Vs
def getVolumes(self):
    return self.Vs

```

Також присутній модуль побудови можливих шляхів розтікання струму, що представляють собою дуги проведені між двома електродами в напрямку до центру та країв ванни печі. Він складається з класу *Arc*, який реалізує побудову безпосередньо дуг та визначення їх параметрів в полярних координатах. Для цього використовується методи: *getR*, який бере в залежності від кута значення радіусу в полярних та декартових координатах; а також інші. Програмна реалізація наведена нижче.

```

from math import sqrt
from functions import
frange, drange, cos, sin, tan, X, Y, pol_to_cart, pol_to_cart3d, cart_to_po
l, to180, thirdPoint
from scipy.optimize import fsolve
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
class Arc:
    def __init__(self, e1, e2, k=1.0, kc=5.0, z=0.0):
        self.e1 = e1
        self.e2 = e2
        self.R = e1[0]
        self.z = z
        M_3_2 = sqrt(3.0)/2.0
        ki = ((M_3_2*self.R)/kc)*k

        self.r1, self.fi1 = r1, fi1 = self.e1
        self.r2, self.fi2 = r2, fi2 = self.e2
        self.r3, self.fi3 = r3, fi3 =
thirdPoint(self.e1, self.e2, ki)
    def eq(p):
        r0, fi0, a0 = p
        return ((r1**2)-(2*r1*r0*cos(fi1-fi0))+(r0**2)-(
(a0**2),
                (r2**2)-(2*r2*r0*cos(fi2-
fi0))+(r0**2)-(a0**2),

```

```

                                (r3**2)-(2*r3*r0*cos(fi3-
fi0))+(r0**2)-(a0**2))
                                self.r0,self.fi0,self.a0 = fsolve(eq, [1.0, 1.0,
1.0])

                                #print(self.r0,self.fi0,self.a0)
                                # self.R_array = dict()
                                # self.FI_array = dict()
                                # for fi in drange(self.fi1,self.fi2,d_fi):
                                #     rfi.append((self.getR(fi),fi))
def getR(self, fi):
    a = 1
    b = -2*self.r0*cos(fi-self.fi0)
    c = (self.r0**2)-(self.a0**2)
    d = (b**2)-(4*a*c)
    if d > 0:
        d_ = sqrt(d)
        r = (-b+d_)/(2*a)
        r_ = (-b-d_)/(2*a)
        if r > r_ and r > 0:
            return r
        elif r_ > 0:
            return r_
        else:
            return 0.0
    elif d == 0:
        r = -b/(2*a)
        if r > 0:
            return r
        else:
            return 0.0
    else:
        return 0.0

def getRZ(self, fi):
    return (self.getR(self,fi),self.z)
def getPointsCart(self, d_fi=1.0):
    xy = list()
    for fi in drange(self.fi1,self.fi2,d_fi):
        xy.append(pol_to_cart((self.getR(fi),fi)))
    return xy
def getPointsPol(self, d_fi=1.0):
    rfi = list()
    for fi in drange(self.fi1,self.fi2,d_fi):
        rfi.append((self.getR(fi),fi))
    return rfi
def fillPointsPol(self, d_fi=1.0):
    self.R_array = dict()
    self.FI_array = dict()
    for fi in drange(self.fi1,self.fi2,d_fi):
        self.R_array.append(self.getR(fi))
        self.FI_array.append(fi)

```

Створений модуль, за допомогою якого визначається кількість пройдених шляхів розтікання струму через кожний елементарний об'єм і навпаки, які саме ЕО пронизує кожний окремий шлях струму. Реалізований також модуль *function*, де присутні окремі функції, які використовуються в програмі.

```
import math, cmath
def frange(start=0.0, stop=1.0, step=0.1):
    count = 0
    while True:
        i = float(start + count * step)
        if step > 0 and i > stop:
            break
        elif step < 0 and i < stop:
            break
        yield i
        count += 1
def drange(start=0.0, end=360.0, step=1.0):
    nextEnd = False
    i = start
    while True:
        if nextEnd:
            break
        yield i
        if i == end:
            nextEnd = True
        i += step
        if i > 360.0:
            i -= 360.0
def inDegInterval(d, start, end):
    if d == start:
        return True
    elif d == end:
        return True
    elif start < end:
        if d > start and d < end:
            return True
    elif start > end:
        if d == 360.0 or d == 0.0:
            return True
        elif d > start and d < 360.0:
            return True
        elif d > 0.0 and d < end:
            return True
    return False
def cos(fi):
    return math.cos(math.radians(fi))
def sin(fi):
    return math.sin(math.radians(fi))
def tan(fi):
    return math.tan(math.radians(fi))
def X(r, fi):
```

```

        return r*cos(fi)
def Y(r, fi):
    return r*sin(fi)
def pol_to_cart(c):
    return (c[0]*cos(c[1]), c[0]*sin(c[1]))
def pol_to_cart3d(c):
    return (c[0]*cos(c[1]), c[0]*sin(c[1]), c[2])
def cart_to_pol(x, y):
    r = math.sqrt((y**2)+(y**2))
    if x > 0 and y >= 0:
        t = math.atan2(y,x)
    elif x > 0 and y < 0:
        t = math.atan2(y,x)+(math.pi*2)
    elif x < 0:
        t = math.atan2(y,x)+math.pi
    elif x == 0 and y > 0:
        t = math.pi/2
    elif x == 0 and y < 0:
        t = (3*math.pi)/2
    return r, math.degrees(t)
def to180(f):
    f_ = f % 180
    if f_ < f: f_ = -1*f_
    return f_
def rotate_around_point_lowerperf(point, radians, origin=(0,
0)):
    x, y = point
    ox, oy = origin
    qx = ox + math.cos(radians) * (x - ox) +
math.sin(radians) * (y - oy)
    qy = oy + -math.sin(radians) * (x - ox) +
math.cos(radians) * (y - oy)
    return qx, qy
def thirdPoint(e1,e2,k):
    ra = e1[0]
    fa = e1[1]
    rb = e2[0]
    fb = e2[1] if fa <= e2[1] else e2[1] + 360
    fs = (fa+fb)/2
    rs = k #ra+k
    return (rs, fs)
from concurrent.futures import ThreadPoolExecutor
def TLoop(func):
    def wrap(array):
        with ThreadPoolExecutor() as executor:
            rs = executor.map(func, array)
        r = []
        for r_ in rs:
            if isinstance(r_, list):
                r.extend(r_)
            else:
                r.append(r_)
        return list(r)

```

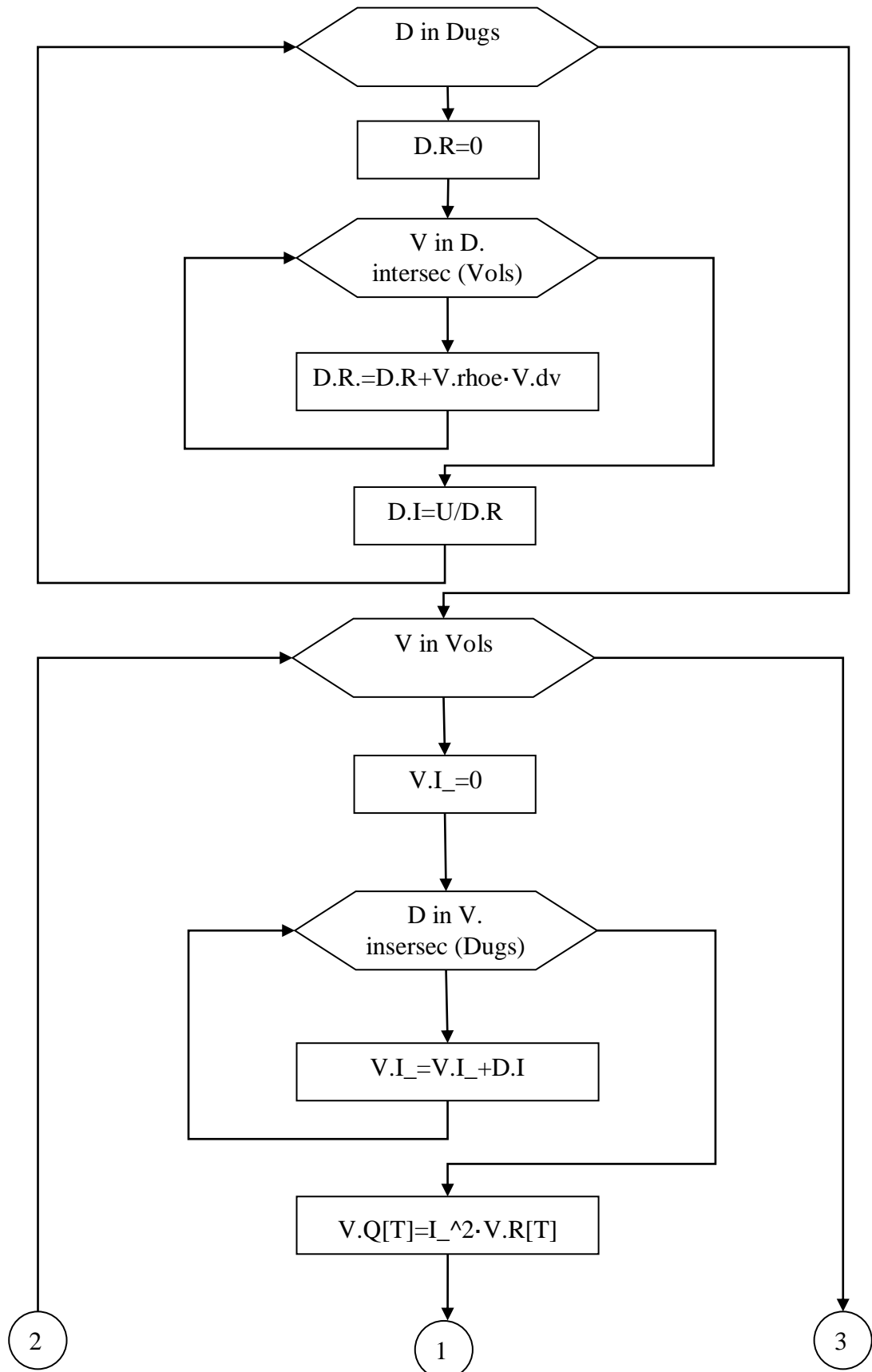

return wrap

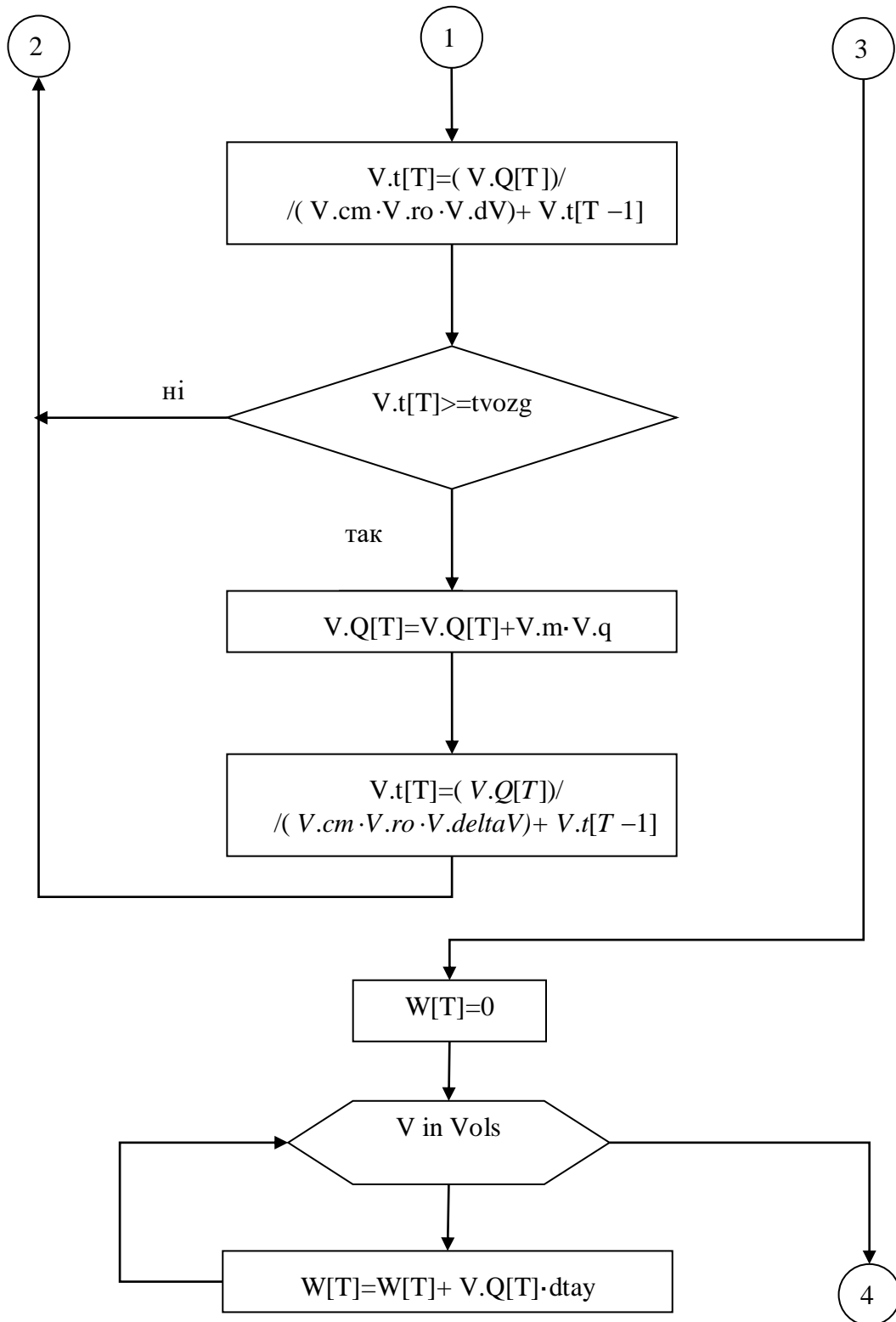
Всі вище перераховані модулі програми є початковими при моделюванні. В головному блоці, який названий «*main*» реалізовані основні цикли математичних розрахунків, частина якого представлена на рисунку 3.5.

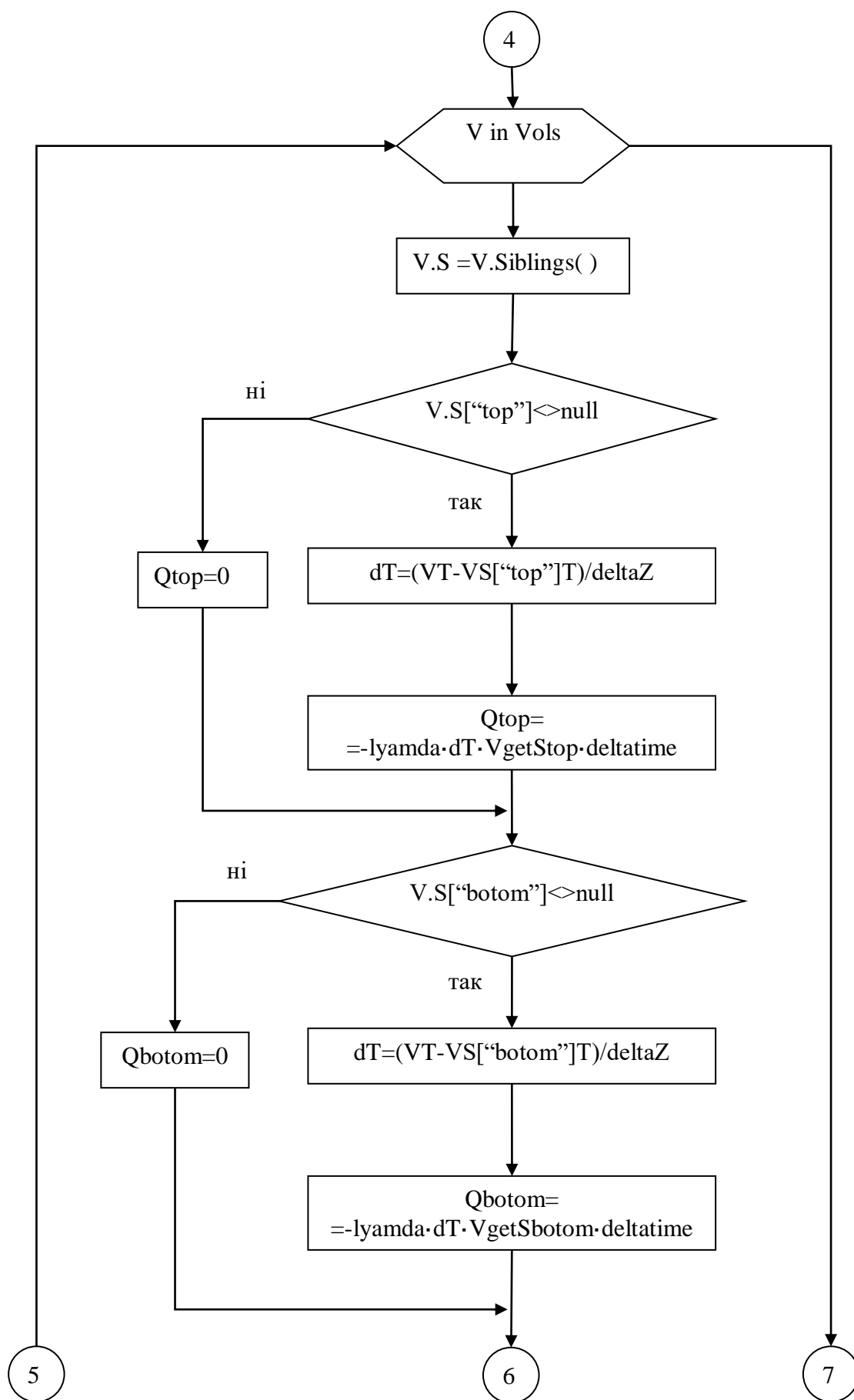
Ці розрахунки будуть проводитись на кожному часовому інтервалі. Спочатку з масиву шляхів розтікання струму береться кожний окремий його елемент і визначається через які елементарні об'єми він пройшов і при цьому знаходиться сумарний електричний опір всього шляху. Після чого розраховується величина струму.

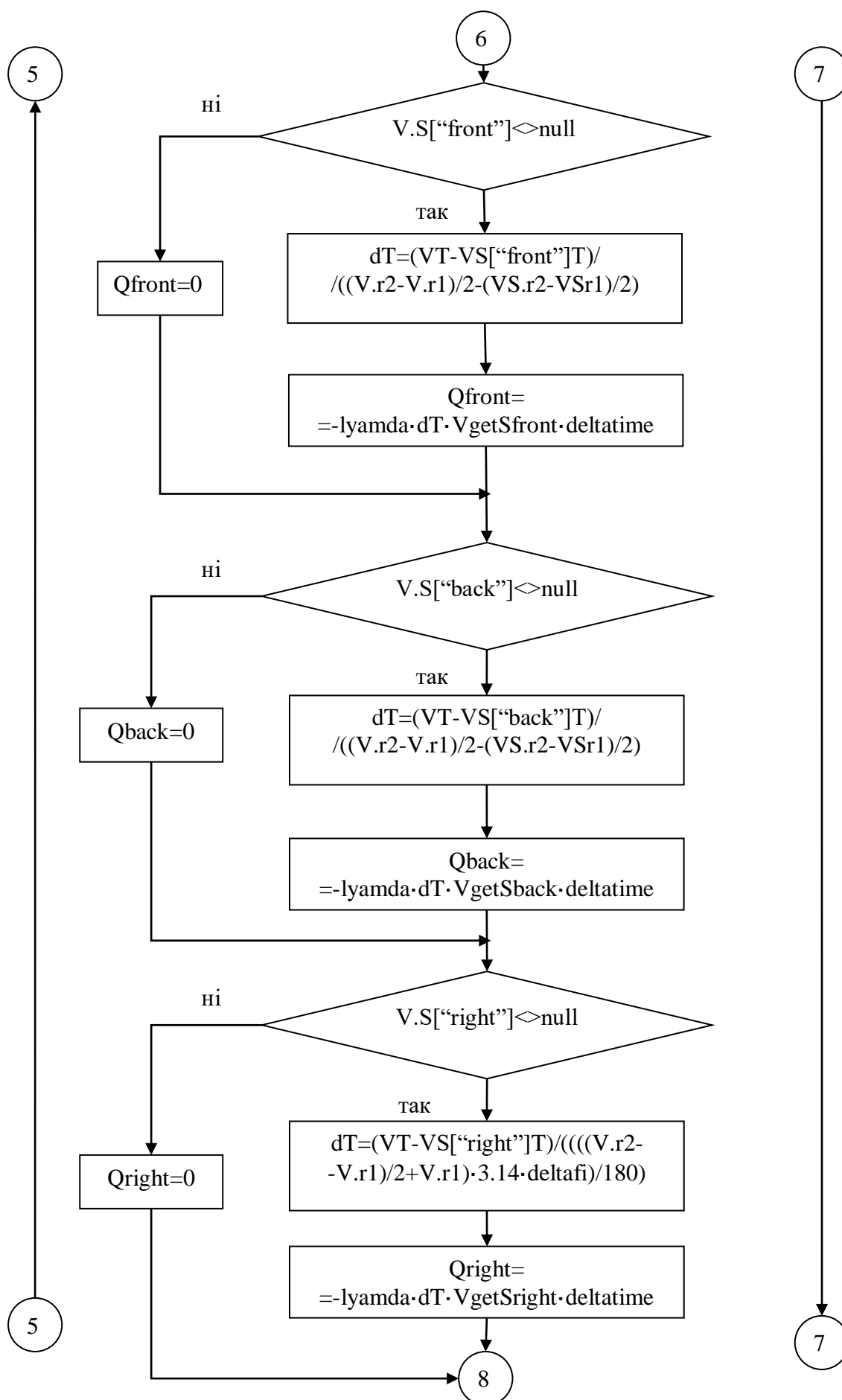
Потім для кожного елементарного об'єму визначається кількість шляхів протікання струму та його загальна величина на основі якої розраховується обсяг енергії, що виділилась у ньому в даний момент часу. Далі визначається значення температури та відбувається перевірка на можливість займання коксика і, якщо це сталося, робиться знову її перерахунок. Потім розраховується кількість спожитої електричної енергії піччю.

В наступному блоці реалізований цикл за всіма елементарними об'ємами в якому для кожного з них знаходять усі ті, що є його сусідами. Після чого для кожної сумісної стінки зверху, внизу, з лівої та правої сторони, спереду та ззаду за допомогою формули теплопередачі розраховується кількість енергії, яка надійшла чи вийшла з неї та складається загальний тепловий баланс, на основі якого перераховується значення температури на даний момент часу. Таким чином формується температурне поле ванни печі, при цьому отримуються значення температур на попередньо і поточному кроці розрахунків. Після цього відбувається фіксація значення температури останнього для кожного елементарного об'єму.









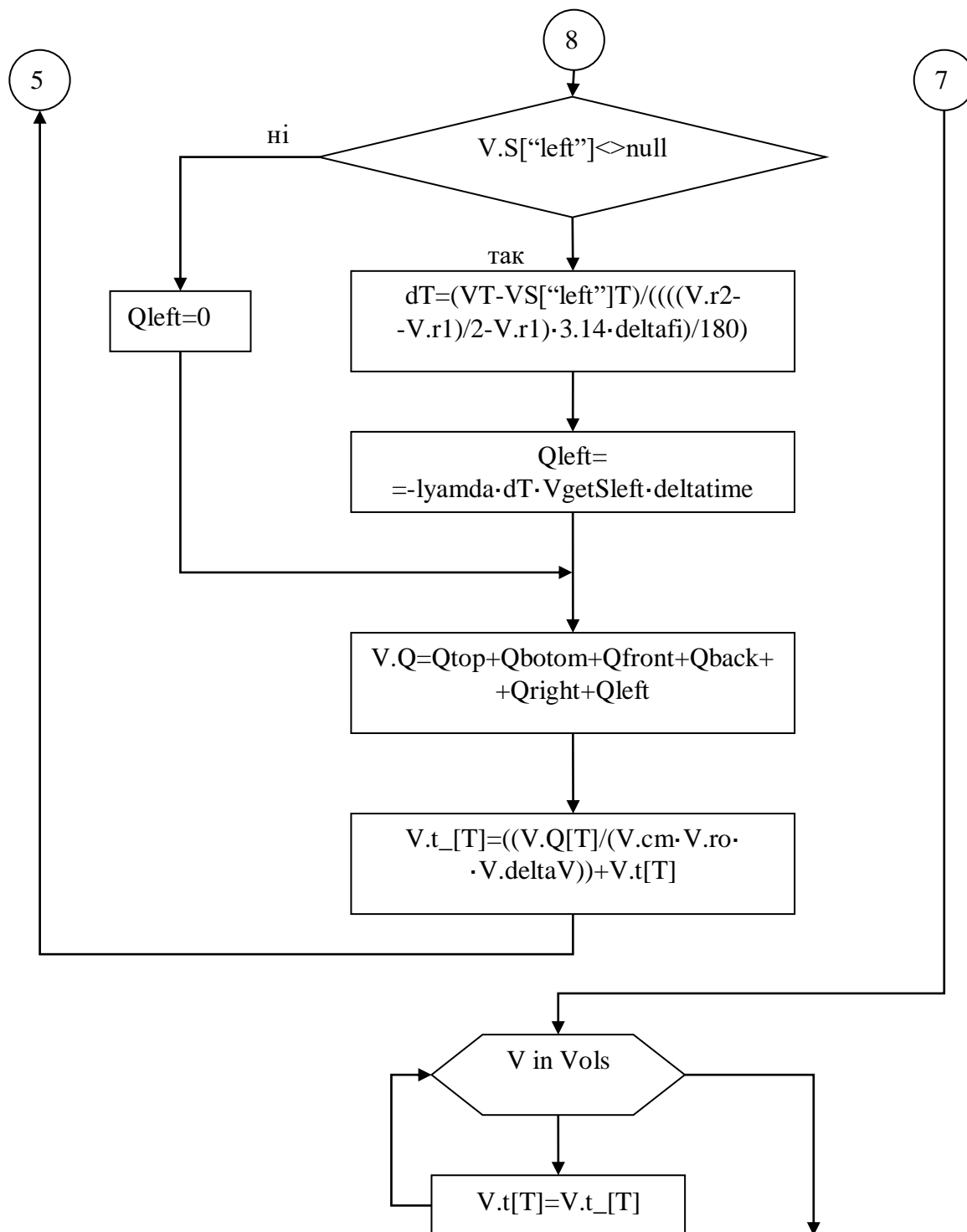


Рис. 3.5. Схема алгоритму програмної реалізації частини модуля «main»

Отже представлена частина алгоритму безпосередньо демонструє взаємозв'язок між електричними та тепловими процесами, що відбуваються у ванні руднотермічної печі на кожному інтервалі часу.

3.3. Вхідні данні запропонованої моделі печі.

3.3.1. Характеристика геометричних та електричних параметрів печі за якими налаштовується модель.

Вхідними даними запропонованої математична модель руднотермічної печі є геометричні та електричні параметри печі, а саме:

- радіус ванни;
- глибина ванни;
- висота заповнення ванни шихтою;
- діаметр електродів;
- діаметр розпаду електродів;
- глибина занурення електродів у ванну;
- напруга на електродах.

Всі вони є технічною характеристикою руднотермічної печі. Детальна інформація щодо основних типів руднотермічних та рафінувальних електропечей наведена у таблиці 3.1.

Проаналізувавши представлені дані можна зробити висновок, що всі параметри цих печей змінюються в залежать від їх потужностей та конструкцій, які відповідають критеріям подібності [63-65]. І все це залежать від виду технологічного процесу (шлаковий чи безшлаковий) та діаметру електродів.

Таблиця 3.1 – Характеристика деяких типів круглих руднотермічних печей.

Тип печі	Потужність тр-ра, МВА	Активна потужність електропечі, МВт	Напруга низької сторони, В	Максимальна сила струму на електроді, кА	Зовнішні розміри ванни, м	Глибина ванни, м	Діаметр, м	
							Електроду	Розпаду електродів
РКО-2,5 Н2	2,5	2,3	89-178	13,0	4,2/2,7	1,2	0,45	1,2-1,4
РКО-3,5 НО3	3,5	3,2	260-371	7,1	4,96/2,5	1,1	0,35	1,0
РКО-4,5 НО1,	4,5	4,2	89-178	20,3	6,1/3,5	1,34	0,4	1,0-1,3
РКЗ-10,5 РР-Н1	16,5	10,5	162,5-255	36,0	7,0/4,0	2,34	0,5	1,75
РКО-16,5	16,5	15,0	130-204	48	7,8/6,1	2,3	1,2	2,8-3,0
РКО-22-И1	22,0	17,0	127-240	77	8,2/6,3	2,3	1,2	3,0
РКЗ-16,5-Н9	16,5	15,0	130-204	60	8,2/6,63	2,8	1,2	3,1
РКЗ-24 М1	24,0	22,0	127-240	86	8,9/7,2	2,6	1,4	3,4
РКЗ-33 М2	40,0	36,0	142-282	93	10,8/6,1	3,5	1,5	3,9
РКЗ-63 И1	81,0	58,0	180-320	165	12,5/9,5	5,0	1,9	5,4
РКЗ-16,5 НО7	16,5	14,5	130-204	60	10,0/6,1	2,3	1,2	2,9-3,0
РКЗ-33 М1	40,0	30,0	140-282	93	12,5/9,5	3,85	1,5	4,35
РКЗ-16,5 НО8	16,5	14,5	130-204	60	8,3/6,1	2,2	1,2	2,9-3,0
РКЗ-33 М2	40,0	30,0	140-282	93	10,8/8,8	3,5	1,5	3,9
РКЗ-16,5 Н11	16,5	15,0	130-204	60	8,2/6,63	2,8	1,2	3,1

Останній, в свою чергу, розраховується на основі заданої потужності печі [66-68]. Тобто вхідні геометричні та електричні параметри щодо налаштування моделі для конкретного виду руднотермічної печі попередньо відомі й можуть одноразово вводитися у програму на початку її використання.

3.3.2. Визначення фізичних параметрів шихти за якими налаштовується модель.

До фізичних параметрів шихти відносять наступні величини:

- питомий електричний опір;
- теплоємність;
- теплопровідність;
- питома щільність.

Числові значення кожного з них визначаються співвідношенням компонентів шихти і, окрім останнього, мають великий діапазон коливання в залежності від температури. Для налаштування моделі за вказаними параметрами проведено аналіз наукових праць [69-76], які присвячені цьому питанню.

Так для різного відсоткового складу шихти, що представлений в таблиці 3.2 з роботи [74] взяті експериментальні залежності її електричного опору від температури. Вони свідчать, що найбільший вплив на питомий електричний опір (ПЕО) шихти має співвідношення між провідними (коксик) та мало провідними її частинами, тобто від вмісту у рудній складовій відновлювальних елементів (Mn, Fe), кількості флюсу та виду марганцеворудної сировини. Встановлено, що ПЕО шихт змінюється на кілька порядків в інтервалі температур 20-1300 °С до моменту закінчення їх розм'якшення і початку плавлення. Тобто в різних температурних зонах руднотермічної печі він не однаковий, що суттєво впливає на техніко-економічні показники процесу одержання марганцевих сплавів.

Таблиця 3.2

Математичні залежності ПЕО різного складу шихти, необхідної для отримання феромарганцю від температури.

Номер зразка	Кількість, %		
	Марганцева сировина	Вапняк	Коксик
1	77,80	10,14	12,07
	$\lg \rho = -(2,127 \cdot 10^{-22}) \cdot t^8 + (1,043 \cdot 10^{-18}) \cdot t^7 - (2,027 \cdot 10^{-15}) \cdot t^6 + (1,990 \cdot 10^{-12}) \cdot t^5 - (1,054 \cdot 10^{-9}) \cdot t^4 + (3,003 \cdot 10^{-7}) \cdot t^3 - (3,819 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - 0,0017 \cdot t + 0,359$		
2	73,98	12,58	13,44
	$\lg \rho = -(2,95 \cdot 10^{-25}) \cdot t^9 + (1,108 \cdot 10^{-21}) \cdot t^8 - (2,307 \cdot 10^{-18}) \cdot t^7 + (2,563 \cdot 10^{-15}) \cdot t^6 - (1,638 \cdot 10^{-12}) \cdot t^5 + (6,028 \cdot 10^{-10}) \cdot t^4 - (1,212 \cdot 10^{-7}) \cdot t^3 + (1,186 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - (4,856 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0,971$		
3	87,35	-	12,65
	$\lg \rho = -(3,212 \cdot 10^{-13}) \cdot t^4 - (7,246 \cdot 10^{-9}) \cdot t^3 + (1,329 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - 0,0064 \cdot t + 0,526$		
4	84,89	0,27	14,85
	$\lg \rho = (3,153 \cdot 10^{-13}) \cdot t^4 - (1,164 \cdot 10^{-8}) \cdot t^3 + (1,738 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - 0,0072 \cdot t + 1,376$		
5	69,73	16,79	13,48
	$\lg \rho = -(2,074 \cdot 10^{-9}) \cdot t^3 + (1,858 \cdot 10^{-6}) \cdot t^2 - (9,323 \cdot 10^{-4}) \cdot t + 0,757$		
6	76,35	12,65	10,99
	$\lg \rho = -(7,668 \cdot 10^{-15}) \cdot t^5 + (2,765 \cdot 10^{-11}) \cdot t^4 - (3,631 \cdot 10^{-8}) \cdot t^3 + (1,826 \cdot 10^{-5}) \cdot t^2 - 0,003 \cdot t + 0,56$		

На основі вище зазначених залежностей був проведений розрахунок конкретних значень ПЕО шихти для дискретних інтервалів температур, результати якого представлені в таблиці 3.3, де числа від 1 до 6 відповідають номерам зразків та їхньому відсотковому складу шихти, що представлені в попередній таблиці. Встановлені інтервали коливання цього параметра в межах дискретних температур, що проілюстровані діаграмою на рисунок 3.6 [77].

Таблиця 3.3

Значення ПЕО шихти різного відсоткового складу

Температура, °C	ПЕО шихти різного відсоткового складу, Ом·м					
	1	2	3	4	5	6
1	2	3	4	5	6	7
20	2,055	9,230	2,531	7,324	5,492	3,217
100	1,051	9,249	1,024	6,565	4,796	2,564
200	0,536	9,033	0,520	3,440	4,255	2,762
300	0,358	8,967	0,397	2,919	3,883	3,368
400	0,275	9,021	0,412	3,431	3,542	3,852
500	0,267	8,581	0,520	4,782	3,139	3,743
600	0,390	7,479	0,717	6,784	2,626	2,994
700	0,808	5,952	0,970	8,419	2,015	2,003

Продовження таблиці 3.3						
1	2	3	4	5	6	7
800	1,604	4,082	1,150	7,870	1,378	1,168
900	1,747	2,146	1,067	4,780	0,816	0,622
1000	0,766	0,846	0,690	1,630	0,407	0,311
1100	0,182	0,309	0,277	0,270	0,166	0,145
1200	0,050	0,100	0,061	0,019	0,054	0,059
1300	0,015	0,002	0,007	0,000	0,013	0,018

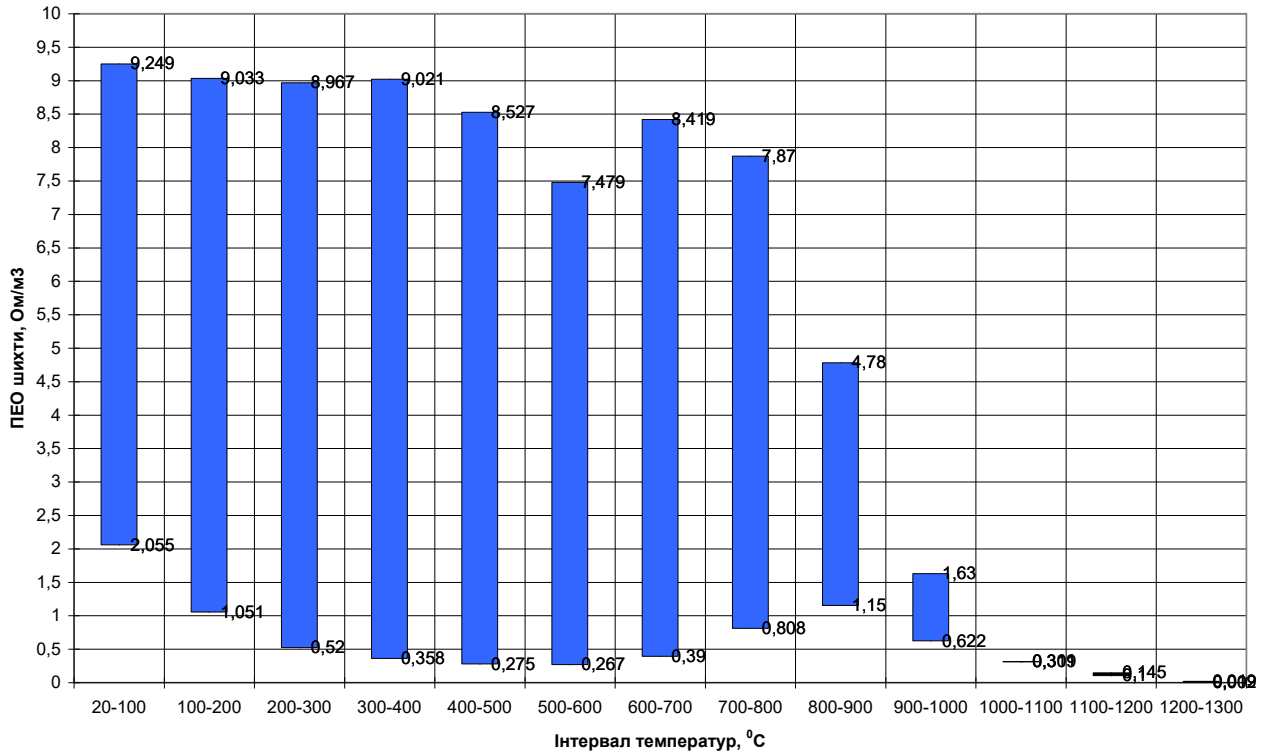


Рис. 3.6. Діапазон значень ПЕО шихти для різного її відсоткового складу в інтервалі температур.

Отже, якщо розглядати шихту в цілому, то значення питомого електричного опору в залежності від температури коливаються в межах від 2,055 до 9,249 Ом·м за низьких температур та від 0,002 до 0,018 Ом·м в діапазоні 1200-1300⁰C. І це зумовлено різним відсотковим складом її компонентів.

Із статей науковців [78, 79], які проводили експериментальні дослідження зміни теплоємності і теплопровідності шихти від температури для трьох комбінацій її відсоткового складу з різною основністю агломерату (а саме 0,5; 2,0 та 2,5), встановлені їх конкретні значення, що приведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Теплофізичні властивості шихти високовуглицевого феромарганцю

t, °C	Теплоємність [кДж/кг·°C]			Теплопровідність [Вт/м·°C]		
	Основність агломерату			Основність агломерату		
	0,5	2,0	2,5	0,5	2,0	2,5
100	0,646	0,575	0,846	0,938	0,734	1,215
200	0,843	0,534	0,873	1,038	0,633	1,194
300	0,914	0,486	0,873	1,124	0,65	1,177
400	1	0,498	0,89	1,273	0,704	1,225
500	1,024	0,479	0,847	1,454	0,754	1,223
600	1,033	0,461	0,807	1,805	0,82	1,194
700	1,023	0,448	0,783	1,804	0,868	1,93
800	1,015	0,441	0,782	1,741	0,868	1,229
900	1,281	0,428	0,812	1,705	0,902	1,293
1000	1,339	0,438	0,87	1,54	0,914	1,356
1100	1,358	0,45	0,95	1,541	0,957	1,429

На основі приведених в цій таблиці значень визначені межі коливання теплопровідності шихти в інтервалах зазначених температур на основі трьох основностей агломерату, які проілюстровані на рисунку 3.7. Отже, найбільші коливання теплопровідності шихти присутні в діапазоні температур від 500⁰C до 900⁰C і становлять 0,754-1,93 Вт/м·°C.

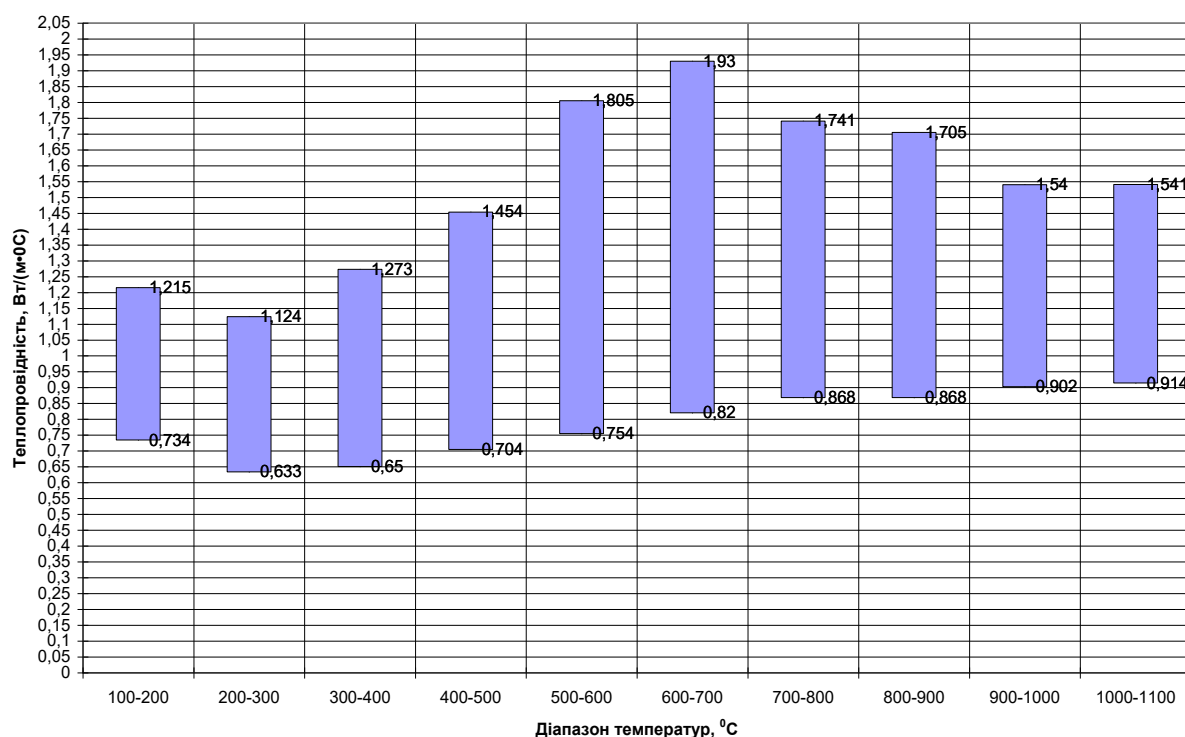


Рис. 3.7. Діапазони значень теплопровідності шихти за різних температур отриманих на основі трьох різних основностей агломерату.

Що ж до теплоємності, яка напряму впливає на енергоємність процесу отримання марганцевих сплавів, межі її коливань також встановлені на основі даних таблиці 3.4. Вони представлені на рисунку 3.8. Отже найбільші коливання теплоємності шихти також притаманні високим температурам.

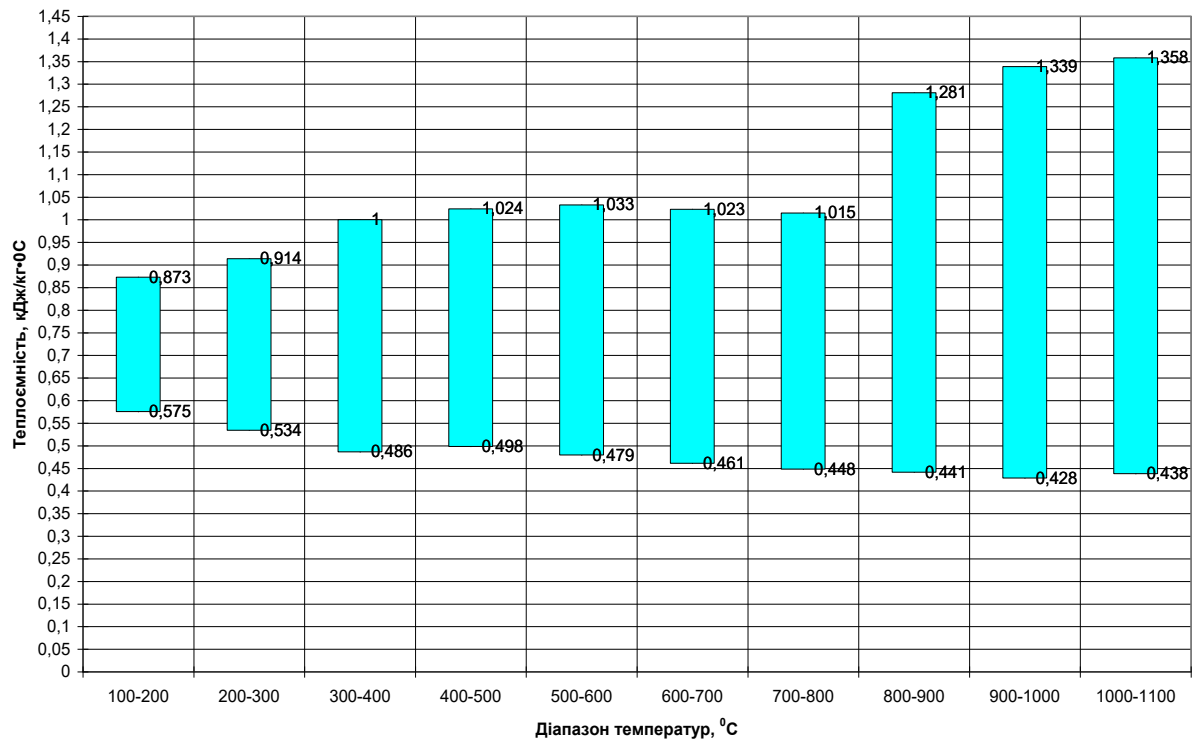


Рис. 3.8. Діапазон значень теплоємності шихти за різних температур, отримані на основі трьох різних основностей агломерату.

Серед вхідних параметрів комплексної моделі роботи руднотермічної печі є ще й насипна густина шихти, яка теж має свої межі коливання, однак відомі тільки межі щодо її компонентів. Як зазначає автор [73] останні знаходяться в таких інтервалах: 2000-2100 кг/м³ для марганцевої руди; 550-600 кг/м³ для коксу; 1500-1800 кг/м³ для сталльної стружки витої та 1800-2200 кг/м³ для меленої; 1600-1700 кг/м³ і 600-720 кг/м³ для вапняку та вапна відповідно. Тож середньозважене значення густини шихти пропонується визначати за допомогою формули:

$$\rho = a_1 \cdot b_1 + a_2 \cdot b_2 + a_3 \cdot b_3 + \dots + a_n \cdot b_n, \quad (3.1)$$

де b_1, b_2, b_3, b_n – значення густини компонентів шихти, кг/м³;

a_1, a_2, a_3, a_n – доля відповідних компонентів шихти відносно одиниці.

Підставляючи в неї спочатку мінімальні, а потім максимальні значення густини кожного компонента, отримаємо межі коливання останньої для конкретної шихти в цілому. Результати розрахунків представлені в таблиці 3.5, де числа від 1 до 6 відповідають номерам зразків та їхньому відсотковому складу шихти, що наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.5

Межі коливання питомої густини шихти для різного її відсоткового складу

Значення	Питома щільність шихти, кг/м ³					
	1	2	3	4	5	6
Мінімальне	1784,6	1754,8	1816,6	1783,8	1737,4	1789,8
Максимальне	1878,6	1848,1	1910,3	1876,4	1830,6	1884,3

Розглянутий щойно параметр є одним із вхідних в моделі і використовується лише на початку розрахунків за запропонованим алгоритмом. Просідання матеріалу під час плавки враховується зменшенням зайнятого обсягу елементарних об'ємів на кожному часовому кроці.

Отже, кожний із розглянутих параметрів має свої інтервали коливань. Деякі (питомий електричний опір, теплопровідність та теплоємність) мають великий діапазон значень і суттєво залежать від температури, а інші, як щільність, значно менший інтервал.

Межі коливання цих значень дуже великі і неоднозначні та залежать від багатьох факторів, а саме: відсотковий склад шихти, хімічний склад електропровідних компонентів (марганцева руда) та місця виготовлення відновників (напівкокс, кокс, вугілля). Однак цієї інформації достатньо для проведення більш точних технологічних розрахунків щодо зазначених властивостей при різних температурах та складових шихти, з яких виплавляють певні марки феросплавів. Очевидно, що у разі реалізації оптимізаційної задачі щодо мінімізації можливої похибки прогнозу конкретної вхідної величини процесу, що розглядається, в якій використані ці інтервали будуть визначені їх конкретні значення.

3.4. Промислові дослідження задля налаштування математичної моделі печі.

Промислові дослідження проводились на ТОВ «ЗАПОРОЖСПЕЦСПЛАВ», яке займається виробництвом феросплавів. На підприємстві використовують руднотермічну піч малої потужності РКЗ-2,5, характеристики якої представлені таблиці 3.6.

Таблиця 3.6

Характеристика електропечі РКЗ-2,5

Параметри	Од. виміру	Значення
Електричні		
Номінальна потужність	МВ·А	2,5
Номінальна напруга (висока сторона)	кВ	10
Діюча напруга на електродах	В	89..178
Геометричні		
Вид печі	-	кругла
Діаметр корпусу (зовнішній)	мм	3700
Діаметр ванни	мм	2100
Висота корпусу (зовнішня)	мм	2730
Глибина ванни	мм	1550
Кількість електродів	шт	3
Діаметр електрода	мм	350
Діаметр розпаду електродів	мм	1100

Електропіч призначена для роботи в помірно-холодному кліматі за таких умов: - висота над рівнем моря не більше 1000 м; - температура навколишнього середовища від 1 до 35 °С; - відносна вологість навколишнього повітря трохи більше 65% за нормальної температури 20°С; - навколишнє середовище вибухобезпечне, не містить струмопровідного пилу, а також агресивних газів та пари у концентрації, що руйнує метали та електроізоляцію.

Первинна напруга трансформатора, В – 6000 (10000). Межі вторинної напруги трансформатора, В – 180-80 при 6000 В; 172,6-77,1 при 10000 В. Максимальний струм електрода – 11800 А при 6000В; 12280 А при 10000 В. Номінальна частота струму – 50Гц. Кількість фаз – 3. Кількість електродів – 3.

Тип електрода – графітований, що самоспікається. Коефіцієнт потужності в номінальному режимі – 0,82.

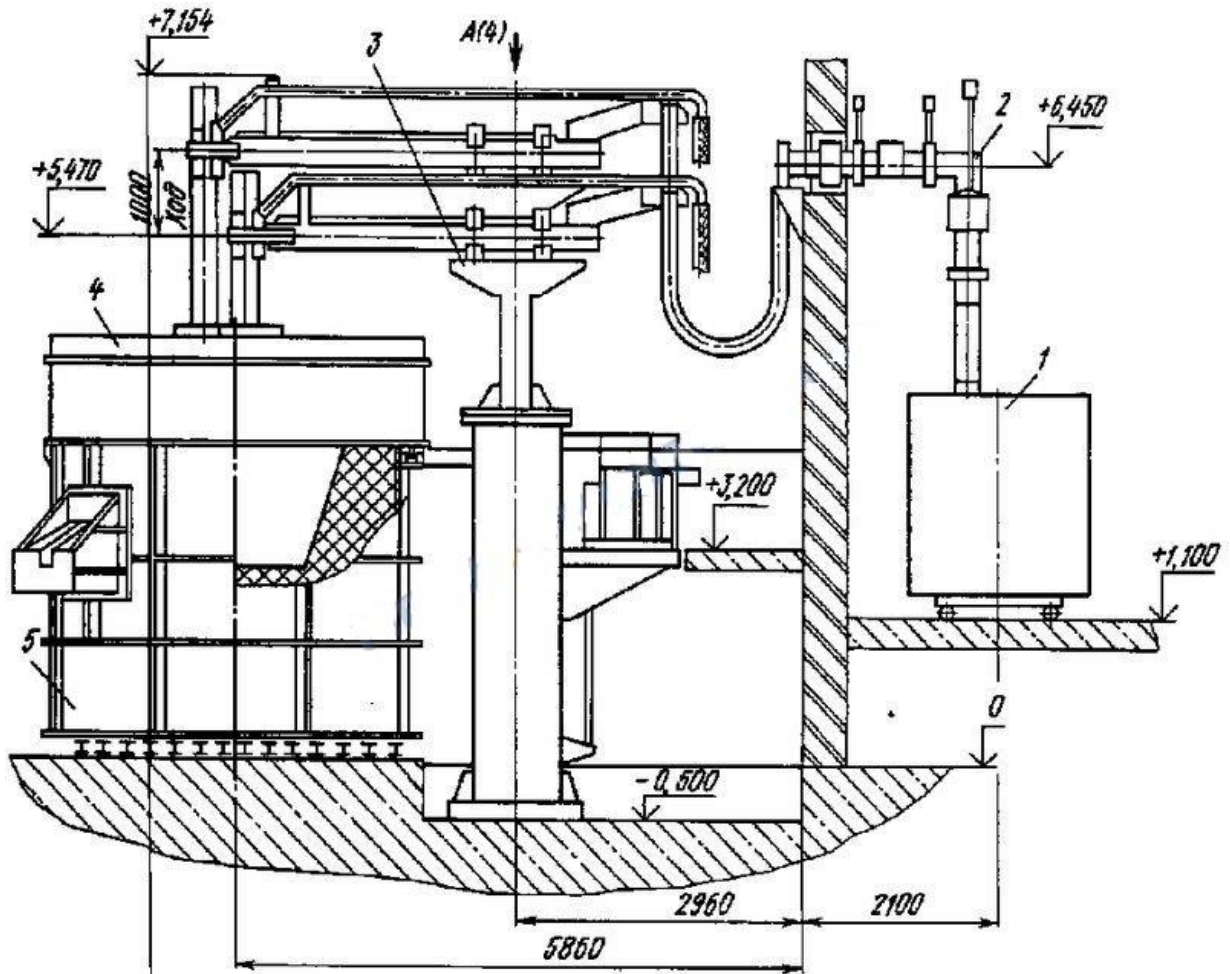


Рис. 3.9. Загальний вид печі РКЗ-2,5

Електропіч (рисунок 3.9) складається з: кожуха (5); парасольки (4); шахти; колонки електродотримача; системи вертикального переміщення електродів (3); підвіски колонок та противаг; короткої електричної мережі (2); системи водоохолодження; системи підведення повітря; установки кінцевих вимикачів; трансформатора електропечного (1); регулятора потужності; комплектного розподільчого пристрою.

Кожух електропечі є звареною конструкцією у формі циліндра з листової сталі. Парасолька призначена для укриття ванни електропечі і виконана аналогічним чином. В ній передбачено три отвори для проходу електродів, а один отвір для завантаження шихти та один для газовідведення. Шахта є звареною прямокутною конструкцією з кутового прокату. Має вертикальні

колодязі, в яких переміщуються колонки з противагами та електродотримувачами. Останні складаються з трубчастого рукава, всередині якого встановлені пружини, та основи, яка виконана з листової сталі та за допомогою зварювання з'єднана з рукавом. До корпусу рукава на болтах кріпиться водоохолоджувана мідна контактна щока.

Коротка мережа служить для підведення електричного струму від електропічного трансформатора до головки електродотримувача. Складається вона із шихтованих пакетів мідних шин, гнучких струмопідводів, стрічкових компенсаторів та деталей кріплення й підвіски.

Система водоохолодження забезпечує підведення та відведення води для охолодження наступних елементів електропечі: струмопровідних труб та контактних щік електродотримувачів. Повітря надходить до циліндрів механізму віджиму електродів за допомогою пневмопроводу. Управління віджиманням роздільне для кожного електрода і проводиться за допомогою кранів, встановлених на робочому майданчику цеху. Установка кінцевих вимикачів призначена для обмеження крайніх положень колонок електродотримувачів.

Розглянута руднотермічна піч отримує живлення від трьохфазного електропічного трансформатора, встановленого у спеціальному приміщенні. Приєднання останнього до розподільного фідера підстанції виконується за допомогою високовольтного роз'єднувача та підземною кабельною лінією. Вмикання та вимикання печі виконуються високовольтним вимикачем. Контрольно-вимірювальна апаратура та необхідні для управління механізмами РТП зібрана в шафах, які встановлюються у спеціальному пультовому приміщенні.

На підприємстві встановлений пічний трансформатор ЕТЦХ-5000/10, характеристики якого представлені в таблиці 3.7. Особливість трансформаторів серії ЕТЦХ-5000/10 в універсальності. Апаратура випускається або з вільними кінцями на 5/8 ступенів вторинної напруги, або з комплектним РПН/ПБВ

(резисторним пристроєм, що перемикає) на 9 положень, що дозволяють мати в кожному діапазоні по 9 значень вторинної напруги. У останньому випадку

Таблиця 3.7

Характеристика пічного трансформатора ЕТЦХ-5000/10

Тип	ЕТЦХ-5000/10
Номінальна потужність, кВ·А	2500-2000
Напруга первинної обмотки, В	10500
Напруга вторинної обмотки, В	176,5-88
Схема з'єднання обмоток	Д/Д-0
Перемикач шагу напруги	ПБВ
Кількість положень перемикачання	5
Вид охолодження	олійно-водяне
Габаритні розміри, мм	3380 x 3165 x 3760

трансформатор при відносно невеликій потужності має дуже низькі вторинні напруги, що дозволяє отримувати вторинні струми до 18-22 кА. Зроблено це для того, щоб він міг використовуватися для руднотермічних печей різного призначення завдяки можливості приєднання виходів (на кришці) до 4-х діапазонів вторинної напруги і струмів.

На основі звітностей пічної документації, яку надало підприємство, було відібрано тридцять плавок, що відбувалися безперервно одна за одною протягом шести днів. В даному випадку виплавляли феросилікомарганець (силікомарганець). Склад і витрати шихтових матеріалів та споживання електричної енергії приведені в таблиці 3.8.

Аналізуючи наведені в цій таблиці дані можна відмітити наступне:

- витрата шихтових матеріалів майже однакова, окрім деяких плавок, що пояснюється специфікою технологічного процесу;
- кількість споживаної електричної енергії на один процес не змінна (злив рідкого феросплаву відбувається саме за цим показником);
- обсяги фактично одержаної продукції (силікомарганця) коливається в межах 2,07-2,39 тон;
- тривалість плавки знаходиться в інтервалі від 240 до 255 хвилин.

Таблиця 3.8

Витрати шихтових матеріалів та електричної енергії для безперервної серії плавок.

Найменування	Од. вим.	1					2					3				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Отримано селікомарганцю ФАКТ	нат.т	2,18	2,21	2,41	2,09	2,21	2,22	2,28	2,12	2,10	2,23	2,03	1,93	2,42	2,16	2,37
Марганцева руда	вл. кг	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600
Кокс W-14,0%	вл. кг	800	800	800	800	800	800	800	800	700	880	880	880	880	880	980
Вапняк	кг	500	500	500	500	500	500	500	500	450	500	500	500	500	500	500
Кварцит Васильківський	кг	400	400	400	400	400	400	400	400	400	500	500	400	400	400	500
Скрап власного виробництва ~ 25% мет.фази	кг	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Техногенний матеріал фр.0-30мм	кг	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400
Техногенний матеріал фр.0-300мм	кг	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Витрата електричної енергії на плавку	кВт·год	6 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	4 900	4 900	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000
Найменування	Од. вим.	4					5					6				
№ плавки		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Отримано селікомарганцю ФАКТ	нат.т	2,32	2,29	2,11	2,20	2,23	2,19	2,31	2,15	2,25	2,29	2,24	2,06	2,37	2,19	2,20
Марганцева руда	вл. кг	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600
Кокс W-14,0%	вл. кг	800	820	800	800	800	800	800	800	800	800	800	700	880	880	980
Вапняк	кг	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	450	500	500	500
Кварцит Васильківський	кг	400	400	500	400	400	400	400	400	400	500	500	500	400	400	500
Скрап власного виробництва ~ 25% мет.фази	кг	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
Техногенний матеріал фр.0-30мм	кг	1 400	1 400	1400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1 400	1400	1 400	1 400	1 400
Техногенний матеріал фр.0-300мм	кг	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	100	200	200	200
Витрата електричної енергії на плавку	кВт·г	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	4 900	5 000	5 000	5 000	4 900	5 000	5 000	5 000

Отримані дані від ТОВ «ЗАПОРОЖСПЕЦСПЛАВ» про роботу руднотермічної печі РКЗ-2,5 використані для налаштування і перевірки на адекватність запропонованої моделі та при подальших дослідженнях щодо підвищення енергоефективності печі.

3.5. Методика та результати перевірки адекватності запропонованої моделі.

На рисунку 3.10 представлена загальна блок-схема реалізації обчислювального експерименту для вибору значень параметрів налаштування моделі.

На початку цього експерименту вибирається кількість інтервалів для розбиття значень параметрів в попередньо визначених їх діапазонах та створюється відповідні масиви даних. Далі обирається перша комбінація і проводяться всі необхідні розрахунки на імітаційній математичній моделі руднотермічної печі, результати яких порівнюються із реальними значеннями, отриманих на об'єкті та вираховується похибка прогнозу. Потім береться інша комбінація значень параметрів і проводяться ті ж самі розрахунки. Далі таким же чином робиться перебір усіх можливих варіантів значень. Після закінчення циклу перебору виводяться значення усіх параметрів налаштування моделі при яких була отримана мінімальна похибка розрахунку. Якщо остання прийнятна з точки зору досліджень, то вважається, що комбінація значень параметрів налаштування моделі знайдена, а саме модель адекватна процесу. А це, в свою чергу, дає можливість використовувати її для подальших обчислювальних розрахунків.

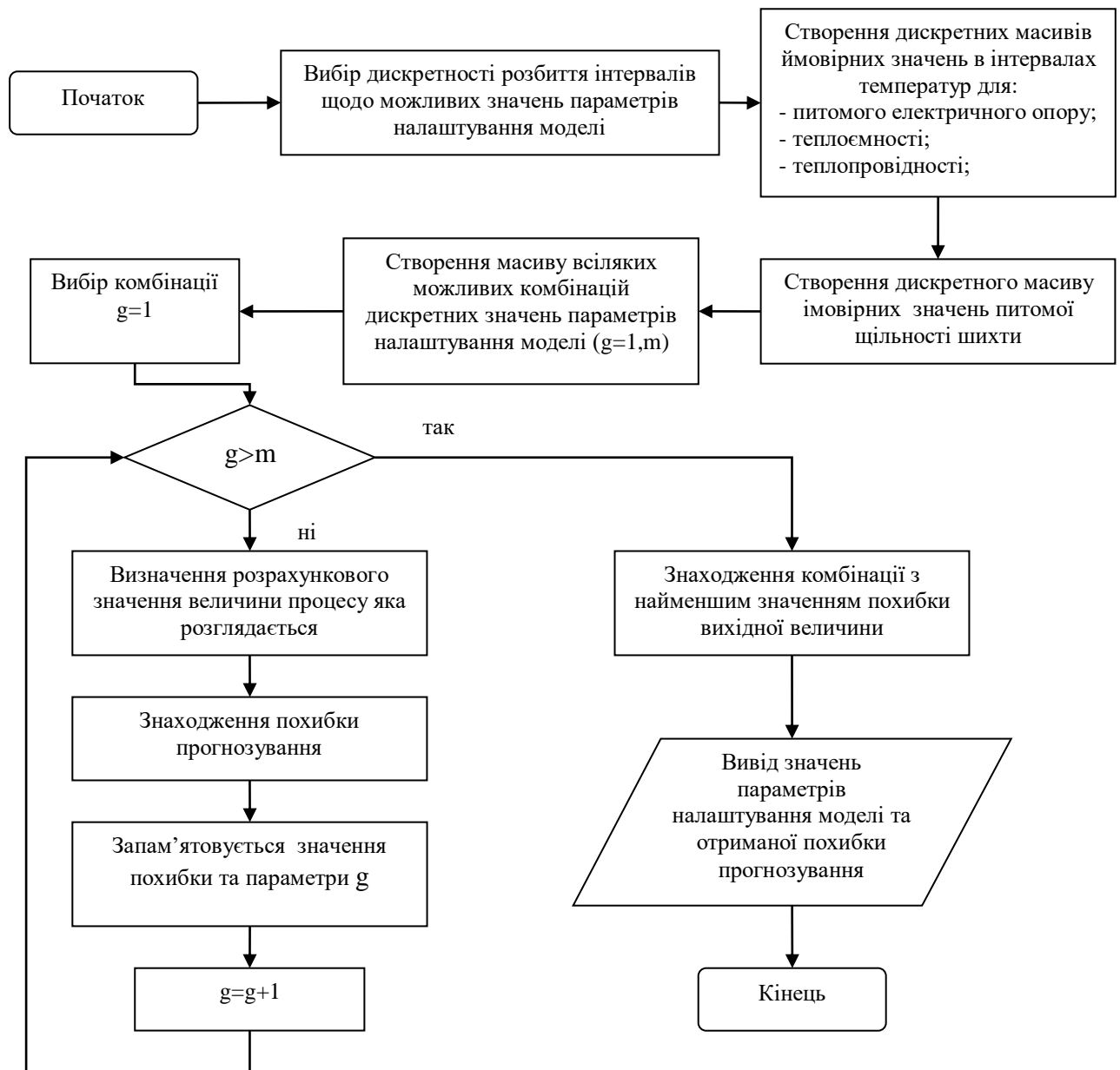


Рис. 3.10. Блок-схема алгоритму щодо вибору значень параметрів налаштування моделі

У розглянутому алгоритмі (рисунок 3.10) оптимізація здійснюється за досить розповсюдженим у застосуванні методом повного перебору можливих варіантів [78-80]. Розрахунок похибки прогнозу теж виконується за відомою методикою [81], яка не викликає жодних сумнівів щодо її доцільності. Тож реалізація алгоритму й зроблена з використанням вже відомих програмних засобів щодо цього.

На основі вище описаного алгоритму (рисунок 3.6) та реалізації його за допомогою програмних засобів отримані наступні результати, що представлені в таблиці 3.9.

Значення вихідних величин, використаних для налаштування моделі, одержані в результаті реалізації тридцяти реальних плавок на печі РКЗ-2,5. Отримані при цьому значення параметрів налаштування моделі, про які згадано раніше, представлені в таблиці 3.9. Щодо похибки прогнозу, то за величиною обсягу спожитої електричної енергії її мінімальне значення склало 3,1%, а за кількістю отриманого феросилікомарганцю – 3,3%. Обидві вони прийнятні для дослідження щодо технічних об'єктів, тож можна вважати, що запропонована модель є структурно й параметрично адекватною.

Таблиця 3.9

Отримані результати розв'язання оптимізаційної задачі значень параметрів налаштування моделі руднотермічної печі типу РКЗ-2,5

Параметр	Інтервали температур, °С									
	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	600-700	700-800	800-900	900-1000	1000-1100
ρ_e Ом/м ³	4,599	3,336	3,246	3,026	3,472	3,066	3,162	2,763	0,846	0,309
C_m Дж/(кг·°С)	0,741	0,746	0,772	0,790	0,787	0,711	0,763	0,814	0,833	1,051
λ Вт/(м·°С)	0,843	0,960	1,065	1,121	1,221	1,437	1,450	1,240	1,327	1,332
ρ кг/м ³	1846,0									

Перевірка на адекватність комплексної математичної моделі руднотермічної печі проводилась на діючій печі РКЗ-2,5 ТОВ «Запорозжспецсплав» на основі даних тридцяти плавок. В результаті перевірки підтверджена адекватність розробленої моделі про що складений відповідний акт [додаток А].

3.6. Висновки за розділом.

1. У зв'язку з об'ємністю і складністю запропонованої математичної моделі руднотермічної печі доцільно реалізувати її у вигляді окремих завершених розрахункових блоків, які взаємодіють між собою на основі узагальненого динамічного алгоритму процесу виготовлення феросплаву.

2. Визначити конкретні значення параметрів налаштування моделі печі, які змінюються в залежності від відсоткового складу компонентів шихти й температури розплаву за інформацією із наявних наукових джерел зараз, на жаль, не можливо. Зіставивши результати розрізаних досліджень щодо цього питання вдається встановити лише можливі інтервали їх коливань.

3. За наявності значень інтервалів коливань параметрів налаштування запропонованої моделі печі виконати останнє доцільно шляхом реалізації розрахункового експерименту щодо мінімізації похибки прогнозу конкретної вихідної величини за результатами реальних плавок.

4. Методика налаштування моделі печі за результатами зазначеного оптимізаційного розрахункового експерименту дає можливість одночасно з'ясувати і її адекватність, до того ж, у кожному конкретному випадку застосування.

5. Результати ідентифікації параметрів розглянутої моделі запропонованим оптимізаційним методом за результатами проведених реальних плавок на печі РКЗ-2,5 свідчить про можливість її використання для проведення подальших розрахункових експериментів з метою підвищення енергоефективності технологічного процесу, який розглядається.

6. Отримані при проведенні оптимізації ідентифікації параметрів моделі значення і її середньоквадратичних похибок щодо обсягу спожитої електричної енергії чи кількості отриманого силікомарганцю свідчать про те, що при такому налаштуванні моделі відносно однієї з зазначених прийнятої вихідних величин переналаштувати її для розгляду другої (чи навпаки) фактично не потрібно.

РОЗДІЛ 4. РОЗРАХУНКОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ФЕРОСПЛАВІВ ЗАДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЙОГО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ.

4.1. Вибір методики дослідження.

На розробленій математичній моделі роботи руднотермічної печі, яка представлена вище, пропонується задля підвищення її енергоефективності провести ряд розрахункових досліджень. Вхідними даними для них будуть геометричні, електричні та технологічні параметри діючої печі типу РКЗ-2,5 для отримання феросилікомарганцю (силікомарганцю), що представлені в таблиці 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1

Електричні та геометричні параметри печі РКЗ-2,5

Параметр	Од.виміру	Значення
Геометричні		
Зовнішній діаметр корпусу, D_3	мм	3700
Зовнішня висота печі, H_3	мм	2730
Внутрішній діаметр ванни, D_6	мм	2100
Внутрішня висота ванни, H_6	мм	1550
Діаметр електрода, d_e	мм	350
Діаметр розпаду електродів, d_p	мм	1100
Глибина занурення електродів у шихту	мм	1000
Електричні		
Потужність печі	МВА	2,5
Потужність пічного трансформатора	МВА	5,0
Електродний струм	кА	12
Напруга на електродах	В	89-178

Таблиця 4.2

Компонентний та кількісний склад шихт, що використовуються при одержанні феросилікомарганцю

Назва компоненту	Од. вимір	Склад шихти			
		Шихта-1	Шихта-2	Шихта-3	Шихта-4
1	2	3	4	5	6
Марганцева руда	кг	2 600	2 600	2 600	2 600
Кокс W-14,0%	кг	700	800	880	980

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5	6
Вапняк	кг	450	500	500	500
Кварцит Васильківський	кг	400	400	400	400
Скрап власного виробництва ~ 25% мет.фази	кг	400	400	400	400
Техногенний матеріал фр.0-30мм	кг	1400	1 400	1 400	1 400
Техногенний матеріал фр.0-300мм	кг	200	200	200	200
Загальна маса шихти	т	6,15	6,30	6,38	6,48

Також в таблиці 4.3 представлена інформація щодо витрати електричної енергії, загальної маси завантаженої шихти та кількості отриманого феросплаву для тридцяти заводських плавок проведених на підприємстві ТОВ «Запоріжспецсплав». Останні здійснювалися безперервно протягом шести днів на підприємстві.

Таблиця 4.3

Показники заводських плавок при одержанні силікомарганцю

Показник	Од. вим.	Номер плавки									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Витрата ел.енергії	кВт·год	5000									
Загальна маса шихти	т	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,30	6,15	6,15	6,15	6,48
Отримано феросплаву	т	2,18	2,26	2,21	2,19	2,21	2,25	2,11	2,12	2,10	2,39
Показник	Од. вим.	Номер плавки									
		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Витрата ел.енергії	кВт·год	5000									
Загальна маса шихти	т	6,48	6,48	6,38	6,38	6,38	6,30	6,30	6,30	6,30	6,38
Отримано феросплаву	т	2,41	2,40	2,30	2,31	2,32	2,23	2,22	2,20	2,19	2,33
Показник	Од. вим.	Номер плавки									
		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Витрата ел.енергії	кВт·год	5000									
Загальна маса шихти	т	6,38	6,15	6,15	6,38	6,30	6,30	6,48	6,48	6,38	6,38
Отримано феросплаву	т	2,36	2,12	2,08	2,33	2,23	2,21	2,42	2,40	2,30	2,32

В даний час на підприємстві злив феросплаву з печі відбувається за умови досягнення заданої кількості спожитої електричної енергії, яка становить 5000 кВт·год на плавку, а її тривалість зазвичай складає близько 4 години 15 хвилин або ж 455 хвилин не залежно від того який пропорційний склад шихти. Стационарний діаметр розпаду електродів у ванні печі становить 1,1м. За існуючою технологічною документацією необхідна температура розплаву до 1600⁰С

В подальших розрахункових дослідженнях враховано, що піч вже виведена на нормальний режим своєї роботи, а це означає наступне:

- так як при плавці утворюються теплові зони (рисунок 2.11) і вся шихта не розплавляється, то певний її залишок задається одноразова на початку розрахунків і більше не враховується в подальшому;
- початковий залишок шихти розраховано як 15% від об'єму завантаженої з середньою температурою 700⁰С і розташований внизу ванни;
- початкова температура футерування прийнята у зонування шарів шихти у ванні (рисунок 2.11);
- демпферний шар розплаву прийнятий в 1550⁰С;
- облік всіх використаних шихтових матеріалів для кожної плавки ведеться шляхом сумування кількості її компонентів, що були засисанні на початку та протягом періоду між моментами закриття-відкриття лебідки (зливу розплаву).

При моделюванні процесу утворення розплаву запропоновано розділити плавки на групи за загальним об'ємом витраченої шихти (таблиця 4.3), що відповідає певному компонентному складу. При цьому середня кількість отриманого силікомарганцю для кожної із них становить 2,1т; 2,2т; 2,32т та 2,4т відповідно, та відстежити час його утворення і кількість спожитої електричної енергії. Отримані дані порівняти з реальними та провести відповідний аналіз.

Для проведення розрахункових досліджень впливу зміни діаметру розпаду електродів на кількість спожитої піччю електроенергії зробити по шість експериментів для кожного, приведеного в таблиці 4.2, складу шихти:

спочатку з існуючим розпадом електродів в 1,1 м, а потім з 1,2м, 1,3м, 1,4м, 1,5м та 1,6м відповідно. Якщо ж розглядати зазначені величини у відносних одиницях до діаметру електродів, то вони складатимуть 3,14; 3,43; 3,71; 4,00; 4,29 та 4,57. Подальше збільшення цього показника є неможливим, через геометричні розміри ванни. Також обмежуючим фактором є те, що футеровка реальних печей виконується з вогнетривких матеріалів, нижній шар якої є шамотна цегла, а верхній – високоглинозесті вироби, що мають максимально допустиму температуру в 1600°C [82-84]. Тому для контролю цього показника ванна печі ще розділена на зони (рисунок 4.1) в яких і визначається динаміка зростання температури.

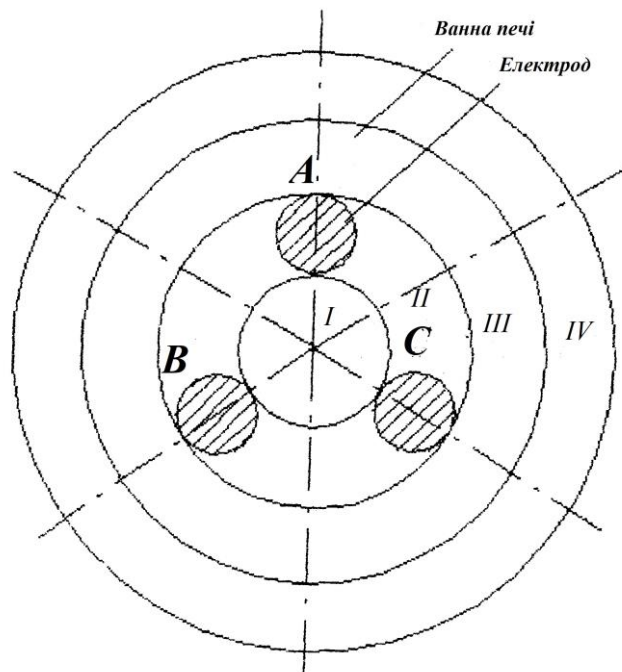


Рис. 4.1. Температурні зони руднотермічної печі.

Таким чином запропоновано, визначаючи динаміку зростання температури в зазначених зонах печі (I, II, III, IV), змінювати діаметр розпаду електродів для кожної умовної плавки з метою знаходження доцільного його значення, яке забезпечить більш рівномірний прогрів шихти з урахуванням щойно вказаних вище обмежень.

4.2 Дослідження динаміки утворення розплаву в руднотермічній печі

Оскільки показником завершення плавки на підприємстві є регламентована кількість спожитої електричної енергії та встановлена її тривалість, то можливо що при цьому має місце не виправданий перегрів розплаву. Тому пропонується за вказаною вище методикою змоделювати процес утворення силікомарганцю для чотирьох різних компонентних складів шихти (таблиця 4.2).

В таблиці 4.4 представлені результати моделювання динаміки утворення розплаву та споживання електричної енергії для кожного виду шихти наприкінці плавки, що проілюстровано на графіках (рисунок 4.2-4.5).

Таблиця 4.4

Результати моделювання плавки

Час, хв	Шихта-1		Шихта-2		Шихта-3		Шихта-4	
	Кіл-сть розплаву, т	Витрачена ел.ен., кВт-год	Кіл-сть розплаву, т	Витрачена ел.ен., кВт-год	Кіл-сть розплаву, т	Витрачена ел.ен., кВт-год	Кіл-сть розплаву, т	Витрачена ел.ен., кВт-год
1	2	3	4	5	6	7	8	9
225	2,00	4382,27	2,05	4367,27	2,09	4397,27	2,15	4407,27
226	2,01	4400,53	2,05	4385,53	2,11	4415,53	2,15	4425,53
227	2,01	4419,82	2,08	4404,82	2,12	4434,82	2,16	4444,82
228	2,02	4438,84	2,08	4423,84	2,15	4453,84	2,19	4463,84
229	2,02	4458,38	2,09	4443,38	2,15	4473,38	2,19	4483,38
230	2,03	4476,83	2,09	4461,83	2,15	4491,83	2,21	4501,83
231	2,03	4494,36	2,10	4479,36	2,19	4509,36	2,21	4519,36
232	2,05	4515,09	2,12	4500,09	2,19	4530,09	2,24	4540,09
233	2,05	4535,16	2,13	4520,16	2,21	4550,16	2,24	4560,16
234	2,07	4556,23	2,13	4541,23	2,21	4571,23	2,25	4581,23
235	2,08	4578,55	2,13	4563,55	2,23	4593,55	2,26	4603,55
236	2,08	4601,10	2,15	4586,10	2,23	4616,10	2,26	4626,10
237	2,09	4624,59	2,15	4609,59	2,24	4639,59	2,28	4649,59
238	2,09	4650,38	2,16	4635,38	2,24	4665,38	2,29	4675,38
239	2,11	4676,26	2,16	4661,26	2,25	4691,26	2,32	4701,26
240	2,11	4701,94	2,17	4686,94	2,25	4716,94	2,35	4726,94
241	2,11	4723,44	2,17	4708,44	2,27	4738,44	2,35	4748,44

Продовження таблиці 4.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
242	2,11	4746,04	2,18	4731,04	2,27	4761,04	2,37	4771,04
243	2,11	4765,66	2,18	4750,66	2,30	4780,66	2,37	4790,66
244	2,11	4783,03	2,20	4768,03	2,30	4798,03	2,38	4808,03
245	2,11	4800,60	2,20	4785,60	2,32	4815,60	2,39	4825,60
246	2,11	4821,42	2,20	4806,42	2,32	4836,42	2,39	4846,42
247	2,11	4842,92	2,20	4827,92	2,32	4857,92	2,40	4867,92
248	2,11	4863,99	2,20	4848,99	2,32	4878,99	2,40	4888,99
249	2,11	4886,72	2,20	4871,72	2,32	4901,72	2,40	4911,72
250	2,11	4909,77	2,20	4894,77	2,32	4924,77	2,40	4934,77
251	2,11	4933,38	2,20	4918,38	2,32	4948,38	2,40	4958,38
252	2,11	4959,27	2,20	4944,27	2,32	4974,27	2,40	4984,27
253	2,11	4984,32	2,20	4969,32	2,32	4999,32	2,40	5009,32
254	2,11	5009,38	2,20	4994,38	2,32	5024,38	2,40	5034,38
255	2,11	5035,00	2,20	5020,00	2,32	5050,00	2,40	5060,00

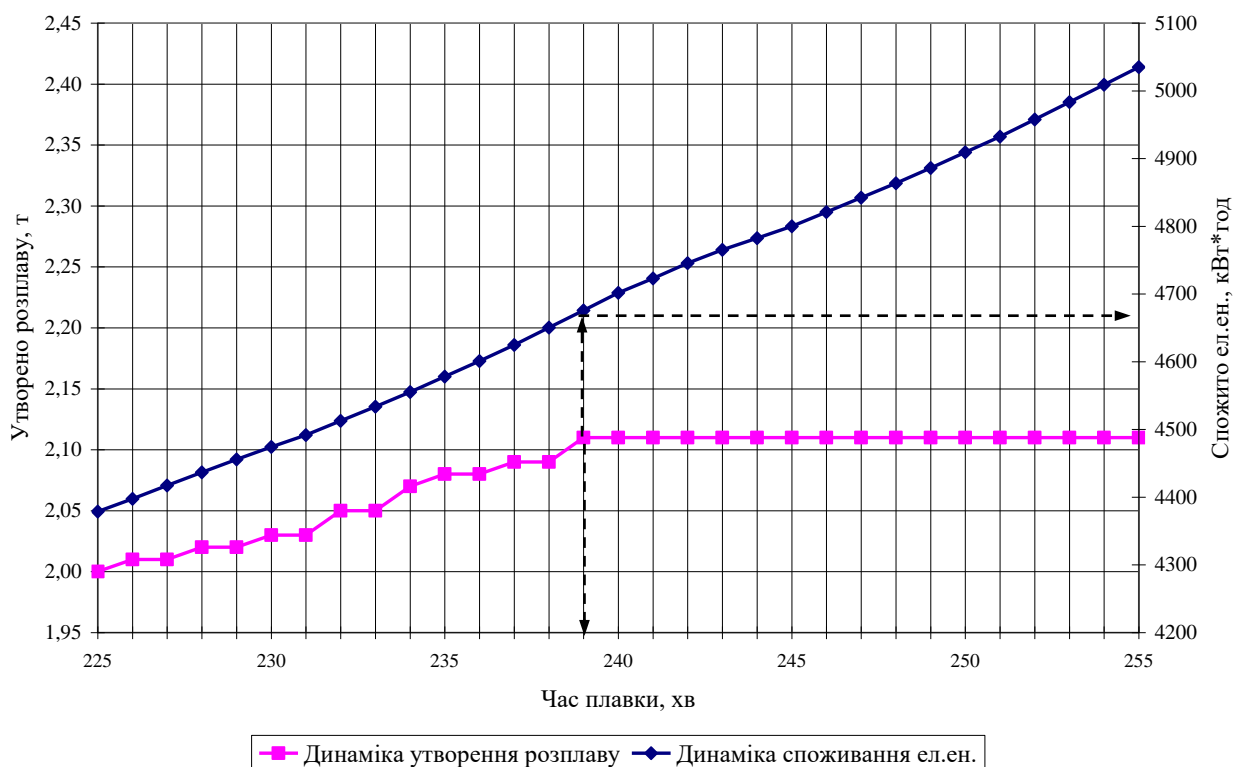


Рис. 4.2. Динаміка утворення розплаву та споживання електричної енергії для компонентно-кількісного складу «Шихта-1»

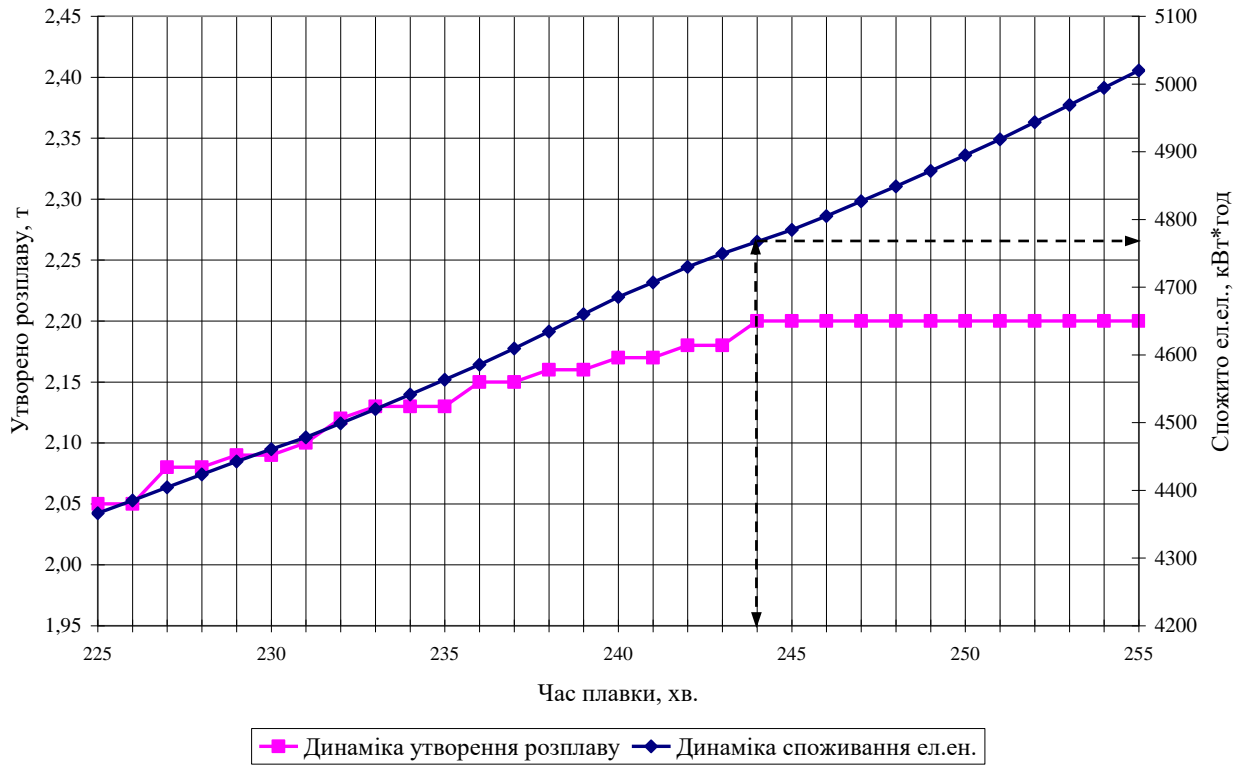


Рис. 4.3. Динаміка утворення розплаву та споживання електричної енергії для компонентно-кількісного складу «Шихта-2»

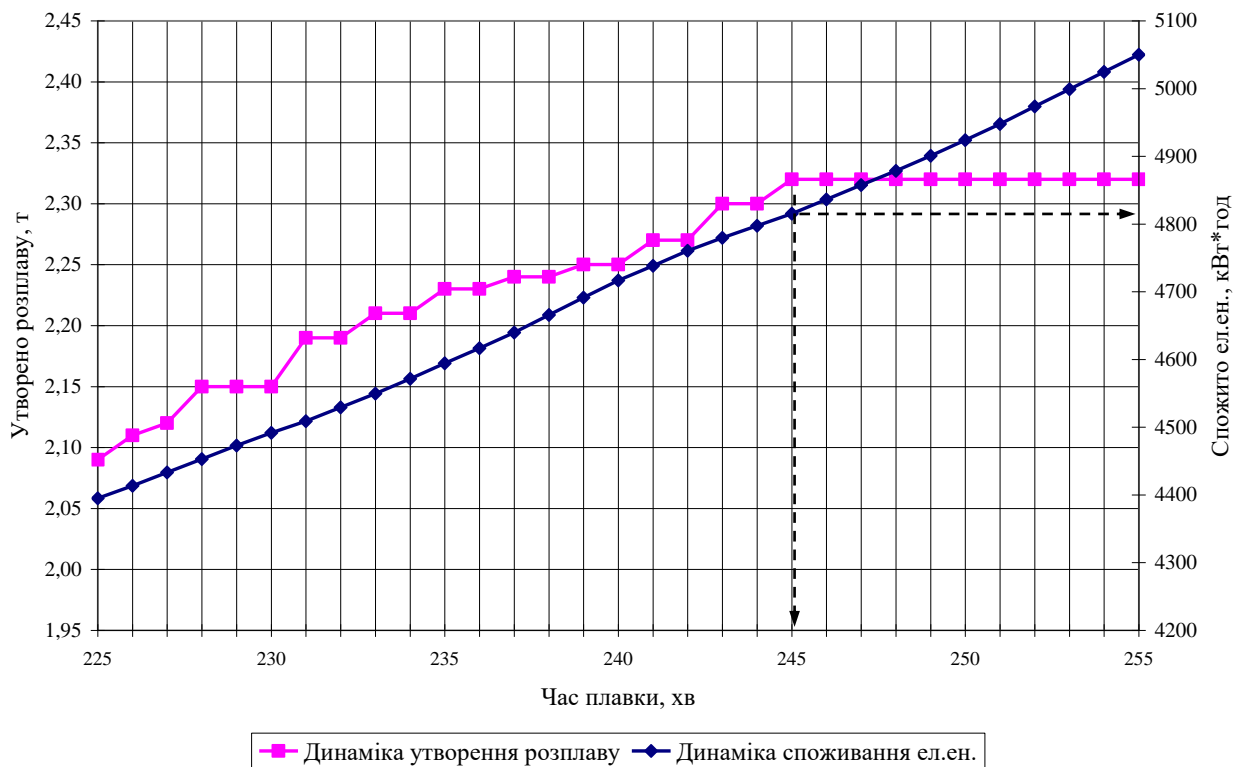


Рис. 4.4. Динаміка утворення розплаву та споживання електричної енергії для компонентно-кількісного складу «Шихта-3»

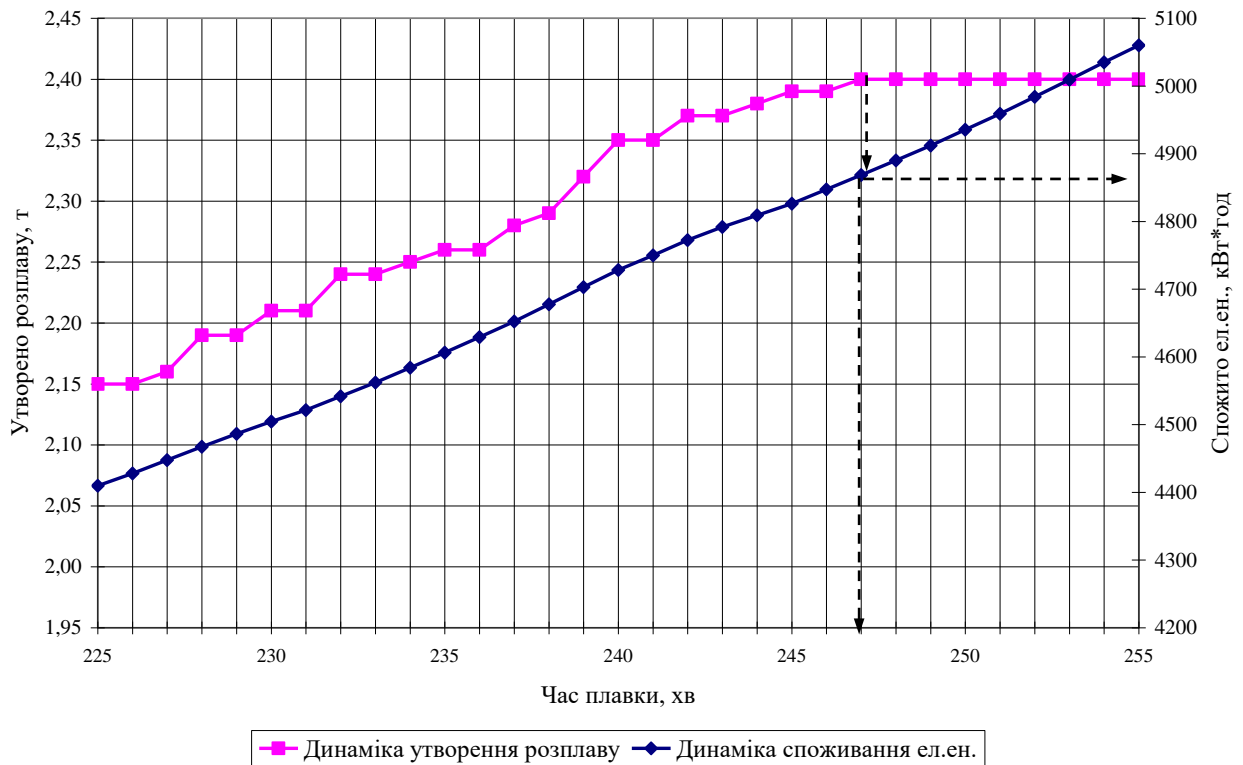


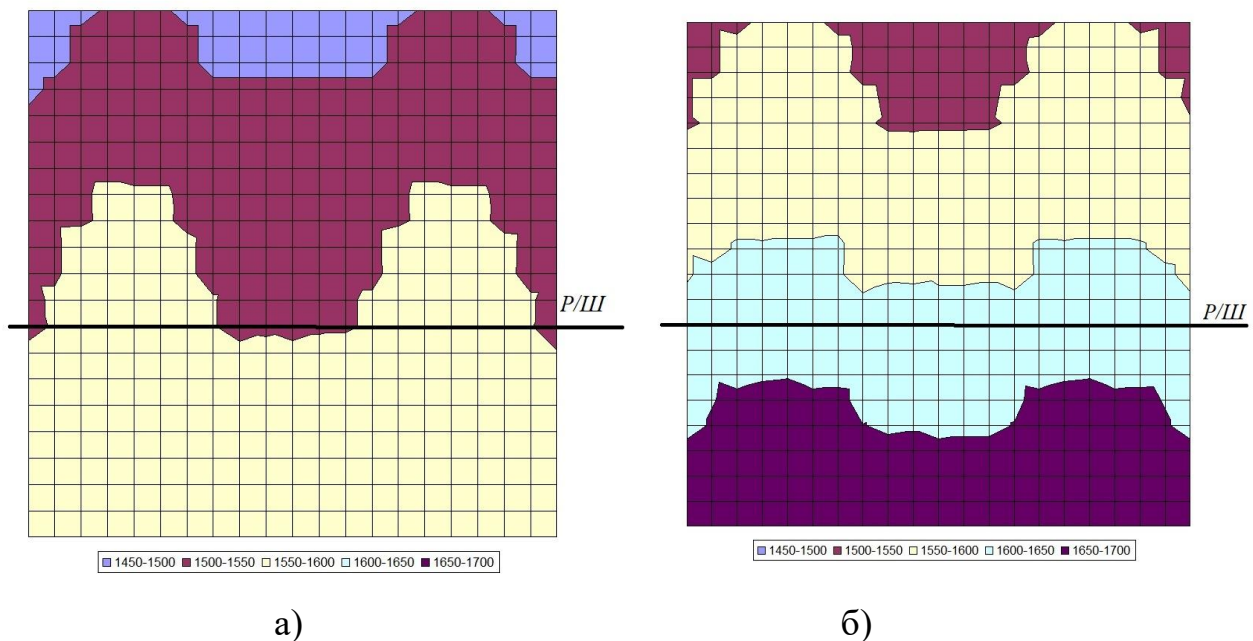
Рис. 4.5. Динаміка утворення розплаву та споживання електричної енергії для компонентно-кількісного складу «Шихта-4»

Як ми бачимо при різному компонентно-кількісному складі шихти об'єм утвореного розплаву різний та досягає свого максимального значення раніше ніж при стандартному часі в 255 хв. введення технологічного процесу і ця економія складає від 15 до 10 хвилин. Подальше його утворення не відбувається, оскільки, як зазначалось раніше, у ванні руднотермічної печі утворюються теплові зони (рисунок 2.11) проплавлення яких неможливе через низьку температуру. Тобто необхідно проводити злив феросплаву та шлаку, щоб дана шихта зайняла звільнений об'єм і з'явилась можливість для подальшого ведення процесу.

Також якщо змінювати компонентно-кількісний склад шихти, то мінімальна кількість отриманого феросплаву (2,11т) досягається за меншу тривалість плавки. Це пояснюється тим, що згідно даних таблиці 4.2 відмінність полягає у кількості коксу, який суттєво впливає на перебіг хімічних реакцій, а також є джерелом виділення додаткової енергії.

Щодо кількості спожитої електричної енергії, то цей показник є умовою завершення плавки на підприємстві і завжди тримається на рівні 5000 кВт·год для кожної з неї. Однак з графіків видно, що підтримуючи заданий параметр додатково розплав не утворюється, а це значить, що енергія витрачається на подальший його розігрів.

На рисунку 4.6 представлено температурне поле піделектродного простору ванни руднотермічної печі, де безпосередньо накопичується розплав та шлак, для двох моментів часу плавки та компонентно-кількісного складу «Шихта-1».



де *P/Ш* – умовна лінія розмежування розплаву та шлаку.

Рис. 4.6. Температурне поле піделектродного простору ванни печі: а) – на 240 хвилині та б) – на 255 хвилині плавки відповідно для «Шихта-1»

Як видно з рисунку 4.6а, при утворенні середньої кількості розплаву в 2,11т на момент часу в 240 хвилин для виду шихти «Шихта-1» температура феросилікомарганцю коливається в межах 1550-1600⁰С, що відповідає допустимим значенням. Однак за існуючої технології виплавки феросплаву на підприємстві плавка триває 255 хвилин і температурне поле піделектродного простору ванни вже має інший вигляд (рисунок 4.4 б). Тобто в зоні розплаву

температура вже становить 1600-1700⁰С, що вказує на його перегрів. Така ж сама ситуація прослідковується і для інших видів шихт, однак має дещо меншу різницю температур через зменшення тривалості перегріву. Хвилеподібні лінії розмежування температурних зон характеризуються тим, що саме над їх піком розташовані електроди, а тому прогрів розплаву та шлаку там інтенсивніший.

За даними таблиці 4.4, що представлена вище, зроблені розрахунки питомої витрати електричної енергії на тону готової продукції для чотирьох груп шихти, виходячи із середнього заданого показника утвореного розплаву, результати яких наведено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Питома витрати електроенергії на тону отриманого феросплаву в залежності від складу шихти та необхідної кількості силікомарганцю

Склад шихти	Одиниці виміру	Необхідна кількість силікомарганцю			
		2,11т	2,20т	2,32т	2,40т
Шихта-1	кВт·год/т	2228,0	-	-	-
Шихта-2	кВт·год/т	2132,9	2166,7	-	-
Шихта-3	кВт·год/т	2103,3	2058,8	2075,2	-
Шихта-4	кВт·год/т	-	2037,0	2026,0	2028,0

Якщо ж розглядати показник питомої витрати електричної енергії на тону готової продукції (таблиці 4.5), то при використанні компонентно-кількісного складу «Шихта-4» і випустити 2,32т феросилікомарганцю, цей показник буде найменшим. Тривалість плавки при цьому становить 240 хв., а загальне споживання складає 4700 кВт·год, що дає економію в 15 хвилин та 300 кВт·год за одну плавку, у порівнянні зі стандартним у 5000 кВт·год.

4.3. З'ясування впливу діаметру розпаду електродів на кількість спожитої піччю електроенергії.

В даний час для більшості руднотермічних печей величини піделектродного проміжку та діаметру розпаду електродів можуть змінюватись в незначному діапазоні відносних величин щодо їх діаметру 0,6-0,9d_e та 2,23-

2,32d_e відповідно [85,86]. Доцільність використання інших співвідношень у сучасних умовах отримання феросплавів досліджена недостатньо. Однак в роботі [87] все ж таки інформація щодо проведених відповідних промислових експериментів [88,89] на печах малої потужності щодо пошуку доцільних значень зазначених величин.

Були проведені плавки з іншими, ніж звичайні, значеннями міжелектродного проміжку та відстані між електродами. Оскільки це супроводжується поступовим зростанням додаткового перерізу провідника у ванні печі (електрод-подина) і його встановленого діаметра, то для нормальної роботи печі (при збереженні відсотка міжелектродного струму) необхідно або збільшити діаметр розпаду, або відстань між електродами та ванною. Для підтвердження цього були проведені пробні серії щодо виробництва силікомарганцю зі стандартним і збільшеним діаметром розпаду. При цьому розміри останнього встановлювали 2,18, 3,0, 4,5 і 6,0 одиниць відносно діаметрів електродів.

Випробування були проведені на печах малої потужності (138–329 кВА), розміри топки яких змінені відповідно до величини зазору. Діаметр графітових електродів становив 150 мм. Феросилікомарганець був виготовлений із суміші марганцевого агломерату, концентрату, кварцу і коксового дріб'язку. У кожному випадку сплав і шлак скидалися щогодини, а електродний струм зберігався на рівні 4 кА. Отримані результати представлені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Показники пробних плавок

Параметр	Номер плавки			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
Відстань між електродами, d _p /d _e	2,18	3,00	4,50	6,00
Глибина занурення електродів у шихту, h/d _e	1,5-1,7	1,4-1,5	1,5-1,6	1,5-1,7
Міжелектродний проміжок,	0,7-0,83	0,8-1,0	3,1-3,2	3,4-3,6
Використовувана потужність трансформатора, кВА	137,7	176,6	276,6	329,0
Активна потужність печі, кВт	110,6	159,8	265,7	319,8

Продовження таблиці 4.6

1	2	3	4	5
Корисна потужність, кВт	107,6	156,0	260,4	314,4
Опір ванни, мОм	6,73	9,75	16,28	19,65
Приріст опору ванни, %	-	44,9	141,9	192,0
Споживання електроенергії на базову тонну сплаву, кВт·год	9250	8690	7283	6982

Виготовлення феросилікомарганцю при різних діаметрах розпаду електродів та проміжку між ними показує, що при збільшенні цих параметрів одночасно істотно збільшується опір ванни і потужність, що виділяється в ній так як корисна напруга зростає без будь-якої зміни величини струму в електродах. Тобто автором доведено, що обсяг споживання електричної енергії піччю при цьому фактично зменшується.

До недоліків таких промислових експериментів можна віднести наступне:

- кожна діюча руднотермічна піч має свої геометричні розміри і відповідно діаметр електродів, що в ній використовуються. Тобто прийняті співвідношення d_p/d_e не завжди можуть бути фізично реалізовані;

- не врахована критично допустима межа близькості електродів до футерування ванни, що може призвести до швидкого руйнування останнього та пошкодження печі у цілому;

- не розглянуто й компонентно-кількісний склад шихти, який теж впливає на енергетичні показники РТП.

Тому для існуючих круглих трьохелектродних руднотермічних печей ці питання необхідно додатково дослідити, звісно, що вже на їх моделях, шляхом реалізації відповідних розрахункових експериментів.

За методикою, яка представлена вище, були проведені розрахункові дослідження, результати яких представлені в таблиці 4.7, де використані наступні позначення: τ_I , τ_{II} , τ_{III} , τ_{IV} – час досягнення температури розплаву в

1550⁰С зонами печі; t_{ϕ} – найбільша температура стінок футерування ванни печі навпроти електродів на момент завершення плавки; W – витрата електричної енергії. Тривалість плавки визначається найбільшим значенням τ .

Таблиця 4.7

Результати проведених розрахункових досліджень

Склад шихти	τ_I , хв	τ_{II} , хв	τ_{III} , хв	τ_{IV} , хв	t_{ϕ} , ⁰ С	W , кВт
<i>$d_p=1,1m$</i>						
Шихта 1	200	230	240	255	1450	5000
Шихта 2	195	230	239	255	1460	5000
Шихта 3	196	235	240	255	1450	5000
Шихта 4	193	228	237	255	1455	5000
<i>$d_p=1,2m$</i>						
Шихта 1	210	222	231	240	1480	4730
Шихта 2	205	220	230	235	1490	4670
Шихта 3	202	215	222	231	1485	4585
Шихта 4	199	211	220	227	1480	4495
<i>$d_p=1,3m$</i>						
Шихта 1	205	218	225	235	1510	4585
Шихта 2	205	222	226	230	1520	4480
Шихта 3	198	209	218	225	1510	4365
Шихта 4	195	211	215	221	1510	4215
<i>$d_p=1,4m$</i>						
Шихта 1	205	217	221	231	1560	4095
Шихта 2	205	219	221	225	1570	4050
Шихта 3	198	206	213	218	1550	3940
Шихта 4	193	204	211	213	1570	3860
<i>$d_p=1,5m$</i>						
Шихта 1	201	213	215	224	1640	3895
Шихта 2	200	205	210	220	1650	3860
Шихта 3	194	200	205	212	1650	3790
Шихта 4	190	198	203	209	1660	3705
<i>$d_p=1,6m$</i>						
Шихта 1	193	206	211	218	1710	3805
Шихта 2	190	195	198	212	1700	3720
Шихта 3	190	196	204	207	1700	3630
Шихта 4	185	194	199	201	1720	3585

Виходячи з максимально допустимої робочої температури футерування печі, максимальна межа зміни діаметру розпаду для всіх видів шихт склала 1,4м. Подальше розведення електродів призведе до швидкого зношування, а в деяких випадках, і до непередбачуваного руйнування футерування, що небезпечно для нормального функціонування всієї РТП.

Отже, для даної печі з її геометричними параметрами, компонентно-кількісний склад шихти практично не впливає на критичну межу розведення електродів при виплавленні силікомарганцю. Однак при суттєво інших комбінаціях шихтових матеріалів цей фактор необхідно додатково досліджувати. Встановлено, також, що в залежності від кількісного складу шихти споживання електричної енергії піччю змінюється. Це обумовлено збільшенням частки коксу, який має високу електропровідність та є додатковим джерелом тепла за рахунок його згорання.

Для ілюстрації рівномірності і швидкості прогріву шихти для максимально допустимої межі в 1,4м діаметру розпаду електродів та існуючої в 1,1м для «Шихти 2» на рисунках 4.7 та 4.8 наведенні відповідні графіки. З них видно, що в останньому випадку спостерігається значний перепад температур між зонами. Перша нагрівається дуже інтенсивно через протікання в ній великих струмів, тоді ж коли третя і четверта надто повільно, оскільки здебільшого зростання температури в них відбувається за рахунок теплопередачі від інших зон. Нерівномірність прогріву шихти складає 60 хвилин, тобто в першій зоні спостерігається тривалий і значний перегрів, що й зумовлює нераціональне використання електричної енергії.

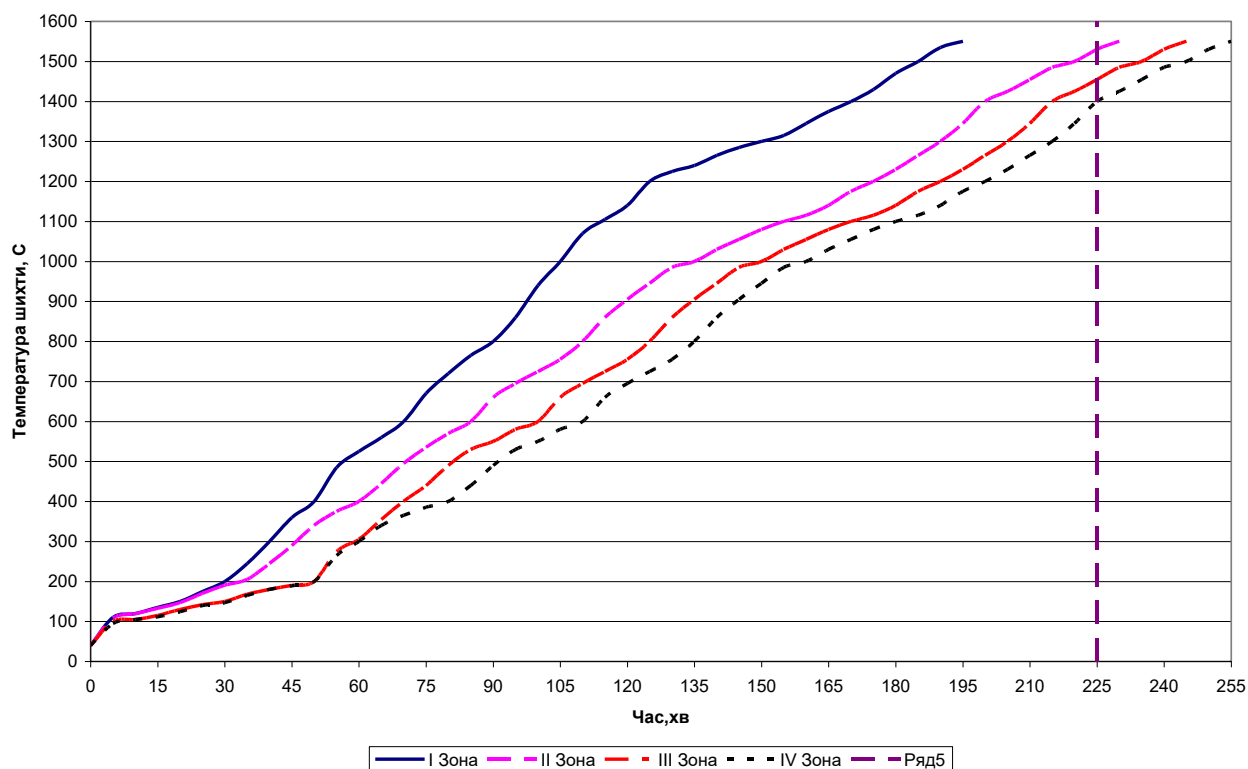


Рис. 4.7. Динаміка нагріву шихти за різними зонами ванни печі при діаметрі розпаду електродів в 1,1м

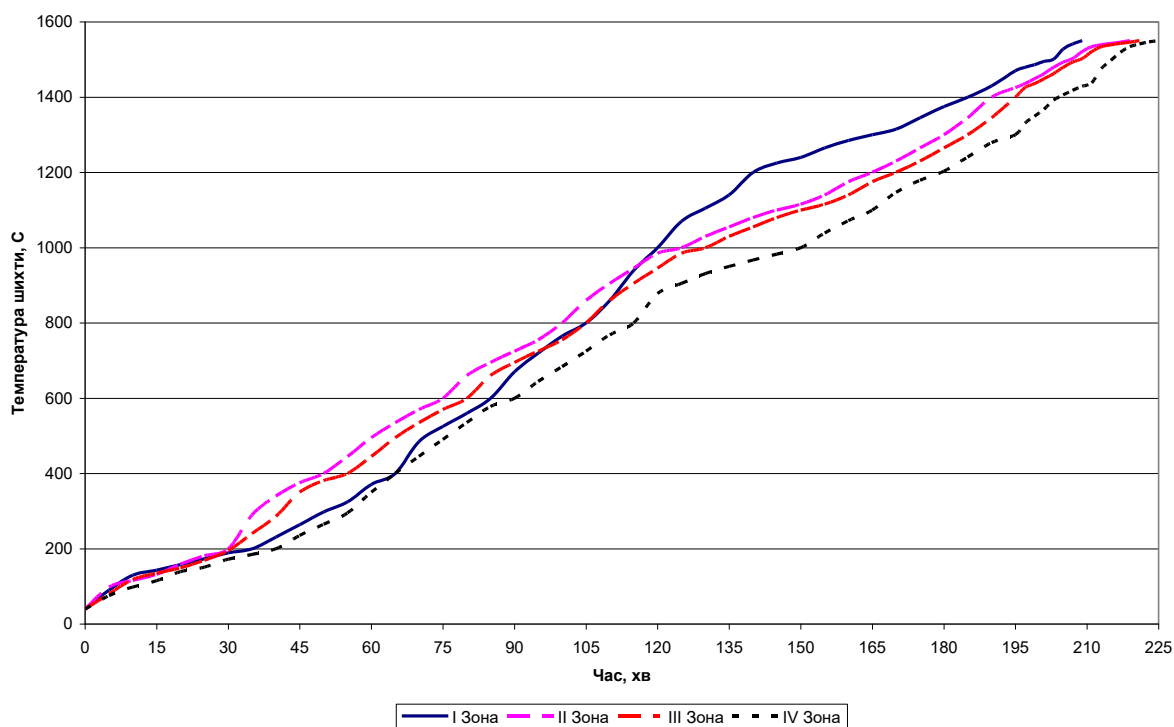


Рис. 4.8. Динаміка нагріву шихти за різними зонами ванни печі при діаметрі розпаду електродів в 1,4м

При критичному ж діаметрі розпаду електродів в $d_p=1,4\text{м}$ (рисунок 4.6) спостерігається інтенсифікація нагріву в другій та третій зонах, що обумовлено розташуванням електродів саме в цих зонах, а також спочатку дещо повільний прогрів першої зони. Економія у часі і нерівномірність нагріву склали 30 хвилин та 16 хвилин відповідно.

4.4. Висновки за розділом.

1. Результати дослідження роботи руднотермічної печі типу РКЗ-2,5 показали, що за існуючою технологією ведення плавки розплав утворюється швидше від встановленого регламентом часу і в подальшому має місце необґрунтований його перегрів, що в свою чергу призводить до марної витрати електричної енергії.

2. Отримані дані показують, що в залежності від кількісного та компонентного складу шихти тривалість плавки можна на деякий час зменшити, тим самим знизивши обсяги споживання електроенергії.

3. При використанні на даній печі переважно кількісно-компонентний склад «Шихта-4», який має найбільший вміст коксу, та проводити злив феросплаву через 240 хвилин після початку плавки, то буде отримано оптимальний обсяг селікомарганцю (2,32т) та найменша питома витрата електричної енергії.

4. Вперше на комплексній математичній моделі роботи руднотермічної печі проведені дослідження щодо впливу зміни діаметру розпаду електродів на енергоефективність її роботи з врахуванням додаткових факторів таких як: компонентно-кількісний склад шихти; максимально допустиме значення температури розплаву в зоні футерування; реальні геометричні розміри діючої РТП. Встановлено, що зазначені вище фактори впливають на максимально допустиму межу розведення електродів та на обсяги споживання електричної енергії.

5. Виявлено, що компонентно-кількісний склад шихти практично не впливає на критичну межу розведення електродів при виплавленні феросилікомарганцю. Однак обмежуючим фактором є максимально допустима температура футерування печі.

6. Крім зменшення кількості спожитої електричної енергії на одну плавку за виконанням отриманих рекомендацій, спостерігається ще і скорочення її проведення, а це підвищує продуктивність обладнання та ефективність використання футеровки і електродів

РОЗДІЛ 5. ПИТАННЯ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1 Технічно-конструктивні рекомендації при впровадженні результатів досліджень на підприємстві

Результати дослідження роботи круглої трьохелектродної руднотермічної печі типу РКЗ-2,5 для виплавки силікомарганцю за допомогою її комплексної математичної моделі, яка реалізована сучасними програмними засобами, показали, що існуючий показник закінчення плавки, а саме встановлена кількість спожитої електричної енергії, є не енергоефективним. Отримані дані показують, що в залежності від кількісного та компонентного складу шихти плавку можна закінчувати раніше, тим самим зменшувати обсяги споживання електроенергії. Це вдається оскільки у ванні печі не відбувається непотрібний перегрів розплаву після того як його можливий обсяг вже утворився в необхідній кількості. Тобто зайвого перегріву не має.

Для можливості визначення необхідної тривалості плавки в кожному конкретному випадку ТОВ «Запорозьспецсплав» передана для практичного використання комплексна математична модель руднотермічної печі, за допомогою якої можна прогнозувати тривалість плавки, кількості утвореного розплаву в залежності від компонентно-кількісного складу шихти, що завантажується у піч. Це підтверджено актом впровадження [додаток Б]. Також слід зазначити, що даний захід не потребує залучення додаткових коштів на його реалізацію, а вимагає лише зміни організаційного характеру.

Всі руднотермічні печі, які експлуатуються в Україні [8,9] в тому числі і на даному підприємстві, на жаль, не мають механізмів розведення електродів, однак в країнах СНД вже є [90]. А як показали результати досліджень можливість зміни положення електродів в горизонтальній площині суттєво впливає на обсяги споживання електричної енергії. Тож і запропоновано при реконструкції печі розглянути два можливі варіанти з цього приводу.

Встановити механізм разового розведення електродів для кожної серії плавок під конкретний компонентно-кількісний склад шихти діаметр якого визначається комплексною математичною моделлю руднотермічної печі. Тобто за показником найменшого обсягу споживання електричної енергії, визначати найбільш доцільний діаметр розпаду електродів, після чого виставити їх у відповідності до розрахунків. При зміні шихтових матеріалів або ж при виплавленні іншого виду феросплаву проводити нові розрахунки і заново налаштовувати піч для енергоефективної її експлуатації.

Якщо ж через якісь технічні, конструктивні, економічні проблеми це не можливо зробити, то необхідно, у відповідності до того які шихтові матеріали здебільшого використовуються на даній печі, одноразово визначити найбільш доцільний діаметр розпаду електродів і в процесі реконструкції встановити їх у відповідне положення. На ТОВ «Запорозьспецсплав» прийнято реалізувати другий варіант, хоча над можливістю першого теж проводиться робота.

5.2 Розрахунок техніко-економічного ефекту

За результатами розрахункових досліджень динаміки утворення розплаву можна зробити висновок, що має місце необґрунтований перегрів останнього після утворення його необхідної кількості, що стається раніше ніж за існуючої технології. Це дає можливість скоротити час плавки у відповідності до проведених розрахунків для різного компонентно-кількісного складу шихт, що використовуються на підприємстві. В середньому за місяць проводиться 120 плавок, а з врахуванням термінів технічного обслуговування печі за рік – 1400. Розрахуємо обсяги економії часу та електричної енергії за одну плавку та за всю їх річну кількість при зменшенні тривалості ведення технологічного процесу у відповідності до результату моделювання плавок (таблиця 4.4):

$$\Delta\tau = \tau_{існ} - \tau_{мод} \quad (5.1)$$

$$\Delta W = W_{ич} - W_{мод} \quad (5.2)$$

де $\Delta\tau$, ΔW – економія часу та електричної енергії за одну плавку; $\tau_{ич}$, $W_{ич}$ – існуючі показники введення плавки 255 хвилин і 5000 кВт·год відповідно; $\tau_{мод}$, $W_{мод}$ – результати визначення тривалості і спожитої електроенергії за допомогою моделі. За рік це складе:

$$\Delta\tau_{річ} = k \cdot \Delta\tau, \quad (5.3)$$

$$\Delta W_{річ} = k \cdot \Delta W, \quad (5.4)$$

де k – кількість плавок на рік.

Для прикладу підставимо у формули (5.1)-(5.4) значення для компонентно-кількісного складу «Шихта-1» при досягненні необхідного обсягу розплаву в 2,11т. Аналогічним чином проводимо розрахунки для інших шихт, результати яких представлені в таблиці 5.1.

$$\Delta\tau = 255 - 240 = 15 \text{ хв.}$$

$$\Delta W = 5000 - 4702 = 298 \text{ кВт}\cdot\text{год}$$

$$\Delta\tau_{річ} = 1400 \cdot 15 / 60 = 350 \text{ год,}$$

$$\Delta W_{річ} = 1400 \cdot 298 = 417200 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Таблиця 5.1

Обсяги економії тривалості плавки та електричної енергії за рік

Показник	Од. вим.	Склад шихти			
		Шихта-1	Шихта-2	Шихта-3	Шихта-4
Тривалість плавки	год	350	233	233	187
Електрична енергія	тис.кВт·год	417,2	301,0	259,0	184,8

Також виходячи з даних таблиці 4.5 про питому витрату електричної енергії та тону отриманого феросилікомарганцю, розрахуємо економію за найбільш доцільного варіанту застосування компонентно-кількісного складу «Шихта-4», при якому отримується 2,32т готової продукції:

$$\Delta\tau = 255 - 239 = 16 \text{ хв.}$$

$$\Delta W = 5000 - 4701 = 299 \text{ кВт·год}$$

$$\Delta\tau_{\text{річ}} = 1400 \cdot 16 / 60 = 373,3 \text{ год}$$

$$\Delta W_{\text{річ}} = 1400 \cdot 299 = 418600 \text{ кВт·год}$$

Якщо брати, що тариф на електричну енергію для підприємства складає 5,80 грн/кВт·год з ПДВ, то річна економія в грошовому еквіваленті складе:

$$E_{\text{річ}} = \text{Tar} \cdot \Delta W_{\text{річ}} = 5,8 \cdot 418,6 = 2427,88 \text{ тис.грн} \quad (5.5)$$

Тобто, змінюючи кінець завершення плавки на основі проведених розрахункових досліджень для кожного виду шихти можна отримати економію від 187 до 350 години експлуатаційного часу печі, який може бути використаний для технічного обслуговування РТП або для інтенсифікації

виробництва. Також при цьому зменшується обсяг споживання електричної енергії від 184,8 до 417,2 тис.кВт·год на рік, що становить від 2,6% до 5,9% відповідно. А при постійному використанні запропонованого вище складу шихти та зливу розплаву у відповідний час можна досягти найбільшого технічного і економічного ефекту щодо економії 373,3 год та 418,6 тис.кВт·год на рік. При цьому отримується найменша собівартість тони феросилікомарганцю в порівнянні з базовими показниками.

За результатами розрахункових досліджень на моделі з'ясувалось, що діаметр розпаду електродів суттєво впливає на кількість спожитої електроенергії, оскільки зі збільшенням його значення спостерігається рівномірність та більша інтенсивність прогріву шихти у ванні. Однак обмеженням у даному випадку є критично допустима температура футерування печі. Виходячи з цього для заданого нами її типу максимально можливий діаметр розпаду електродів склав 1,4м для всіх видів шихт.

Розрахуємо економію часу та електричної енергії для кожного діаметра розпаду електродів на основі даних таблиці 4.7 за формулами (5.1)-(5.4), як приклад для $d_p=1,4м$ з компонентно-кількісним складом «Шихта-4»:

$$\Delta\tau = 255 - 213 = 42 \text{ хв.}$$

$$\Delta W = 5000 - 3860 = 1140 \text{ кВт·год}$$

$$\Delta\tau_{pic} = 1400 \cdot 42 / 60 = 980 \text{ год,}$$

$$\Delta W_{pic} = 1400 \cdot 1140 = 1596000 \text{ кВт·год.}$$

Аналогічним чином проводимо розрахунки для інших значень, результати яких представлені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Обсяги економії щодо тривалості плавки та спожитої електричної енергії на рік за рахунок збільшення діаметру розпаду електродів.

Показник	Діаметр розпаду, м	Склад шихти			
		Шихта-1	Шихта-2	Шихта-3	Шихта-4
Тривалість плавки, год	1,2	350,0	466,7	560,0	653,3
	1,3	466,6	583,3	700,0	793,3
	1,4	560,0	700,0	863,0	980,0
Електрична енергія, тис.кВт·год	1,2	378,0	462,0	581,0	707,0
	1,3	581,0	728,0	889,0	1099,0
	1,4	1267,0	1330,0	1484,0	1596,0

Як видно з таблиці найбільша економія двох показників досягається при діаметрі розпаду електродів в 1,4м. Розрахувавши за формулою 4.5 річну економія в грошовому еквіваленті, отримаємо, що вона складе від 7348,6 тис.грн до 9256,8 тис.грн. в залежності від компонентно-кількісного складу шихти, яку будуть використовувати на підприємстві.

5.3. Використання результатів досліджень в навчальному процесу.

Результати досліджень впроваджені у навчальний процес кафедри електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка» [додаток В] шляхом використання розробленого у роботі способу підвищення енергоефективності руднотермічних печей за умови застосування її комплексної математичної моделі. Остання дозволяє розраховувати кількість спожитої електричної енергії в динаміці; прогнозувати час завершення плавки, виходячи із заданих вхідних параметрів технологічного процесу; контролювати температурне поле ванни печі; проводити подальші розрахункові дослідження щодо пошуку оптимальних з енергетичної точки зору режимів її роботи.

Для студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітньою

програмою «Електротехнічні системи електроспоживання» навчальним планом передбачено вивчення дисципліни «Електротехнологічні установки». Для однієї із тем лекційних занять використовуються матеріали стосовно ознайомленням з конструкцією та сучасним станом енергоефективності руднотермічної печі, оскільки остання є потужним споживачем електричної енергії.

Для студентів другого (магістерського) рівня вищої освіти тієї ж спеціальності за освітніми програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент» навчальним планом передбачено вивчення декількох дисциплін в яких впроваджено результати досліджень. А саме, в рамках предмету «Основи наукових досліджень енерговикористання» для студентів, на прикладі конкретного об'єкта – руднотермічної печі, наочно демонструється необхідність та важливість таких етапів в наукових дослідженнях як аналіз існуючих методів і відомих математичних моделей. При проведенні лекційних занять з дисципліни «Енергозбереження в технологічних установках та будівлях» розглядаються конкретні запропоновані заходи підвищення енергоефективності феросплавних печей.

5.4. Висновки за розділом.

1. Наведені результати розрахунків показують, що в залежності від кількісного та компонентного складу шихти тривалість плавки можна зменшити, тим самим знизивши обсяги споживання електроенергії від 2,6% до 5,9%.

2. Пропонується на даній печі по всяк час використовувати кількісно-компонентний склад «Шихта-4», який має найбільший вміст коксу, та проводити злив феросплаву через 240 хвилин після початку плавки при цьому отримується оптимальний обсяг селікомарганцю (2,32т) та найменша питома витрата електричної енергії.

3. Якщо конструкція РТП дозволяє розводити електроди у горизонтальній площині, і виставити їх у відповідності до результатів розрахунків, то це призведе до зменшення обсягів споживання електричної енергії в межах 20%.

4. При визначенні найкращого кількісного складу шихти, в межах технологічних умов плавки, додаткова економія електроенергії може скласти до 4,5%.

5. Якщо в реальній руднотермічній печі не має механізму зміни діаметру розпаду електродів, то необхідно встановити їх одноразово у відповідності з розрахунковим діаметром безпосередньо на підприємстві в процесі реконструкції, у відповідності до того які шихтові матеріали здебільшого використовуються на ньому.

6. Результати досліджень впроваджені у навчальний процес для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітніми програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент»

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі обґрунтовані організаційні й технічні рішення, впровадження яких дозволить зменшити обсяги споживання електричної енергії руднотермічною піччю при виплавці феросплавів.

Виконані в ній аналітичні й розрахункові дослідження дозволили отримати такі наукові результати:

1. Аналіз існуючих математичних моделей трьохелектродної руднотермічної печі показав, що кожна з них оснований переважно на електричних чи теплових процесах, які відбуваються у ванні, що ускладнює можливість враховувати їх взаємодію як у просторі останньої так і за перебігом процесу.

2. Розрахунки на основі розглянутих моделей базуються на методі вторинних джерел енергії (для електричних) та на системі інтегральних рівнянь з певними обмеженнями (для теплових процесів), що ускладнює можливість використання цих моделей через великий обсяг обчислювальних операцій.

3. Запропоновано використати структуру математичної моделі, що складається з окремих логічно завершених блоків, які постійно взаємодіють між собою у відповідності до протікаючих фізичних процесів у ванні руднотермічної печі, що дає можливість спростити розрахунки, використовуючи залежності, основані на законі Ома та лінійних рівняннях теплопередачі згідно гіпотези Фур'є.

4. Синтезована динамічна комплексна математична модель роботи круглої руднотермічної печі реалізована сучасними програмними засобами, дає можливість постійно відслідковувати зміни температурного поля у ванні, обсяги споживаної електричної енергії та кількість утвореного розплаву і шлаку за перебігом процесу.

5. Універсальність запропонованої моделі дає можливість використовувати її як у разових проектних розрахунках, так і за перебігом

реального процесу для відстеження параметрів плавки не залежно від того, який тип феросплаву виплавляється.

6. Налаштування запропонованої моделі на роботу конкретної руднотермічної печі за її геометричними й електричними параметрами, фізичними властивостями використаної шихти та показниками реальних плавок шляхом реалізації оптимізаційного розрахункового експерименту дозволяє отримати мінімально можливу за вибраної її структури похибку прогнозування.

7. При проведенні розрахункових досліджень на запропонованій моделі руднотермічної печі виявлено, що регламентована кількість розплаву утворюється раніше, ніж за існуючим показником завершення плавки, а тому має місце невиправдана перевитрата електричної енергії.

8. Використання кількості утвореного розплаву у якості показника завершення плавки дає змогу зменшити обсяги споживання електричної енергії в межах 184,8–417,2 тис.кВт·год (2,6–5,9%) на рік у залежності від компонентно-кількісного складу шихти, що використовується.

9. При можливості розведення електродів у горизонтальній площині відповідно до проведених розрахунків обсяги спожитої електричної енергії можуть бути зменшені майже на 20%.

10. При використанні визначеного розрахунковим дослідженням найбільш доцільного кількісного складу шихти, за незмінних умов плавки, додаткова економія електроенергії складе майже 4,5%.

11. Економічний ефект від впровадження запропонованих організаційних та технічних заходів щодо раціонального ведення процесу виплавки феросплавів на підприємстві ТОВ «Запорозьспецсплав», взяті ним до впровадження, може скласти 1071–9256 тис.грн на рік в залежності від кількості реалізованих заходів енергозбереження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Электрометаллургия ферросплавов: Учебник для вузов/ Гасик М.И., Емлин Б.И. – Киев; Донецк: Вища школа. Головное изд-во, 1983. – 376 с.
2. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов: Учебник для вузов/ Гасик М.И., Лякишев Н.П. – М.: СП Интермет Инжиниринг, 1999 г. – 764с.
3. Теория и технология производства ферросплавов. Учебник для вузов/ Гасик М.И., Лякишев Н.П., Емлин Б.И. М.: Metallurgy, 1988. 784 с.
4. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия [Текст]: учебник для вузов/ В.Г. Воскобойников, В.А. Кудрин, А.М. Якушев – 6-изд., перераб и доп. – М: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 768 с.
5. Ферросплавные электропечи. Учебник / В.А.Гладких, М.И. Гасик, А.Н. Овчарук, Ю.С. Пройдак. – Днепропетровск: Системные технологии, 2007. – 259с.
6. Проектування і обладнання електросталеплавильних і феросплавних цехів: Підручник \ В.А. Гладких, М.І. Гасик, А.М. Овчарук, Ю.С. Пройдак. — Дніропетровськ: Системи технологи, 2009. - 692 с.
7. Проектирование электрометаллургических цехов/ М.И. Гасик, В.А. Гладких, В.С. Игнатъев, В.М. Шифрин. – Киев; Донецк: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 144 с.
8. Офіційний сайт АТ «Запорізький завод феросплавів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zfz.com.ua/>
9. Офіційний сайт АТ «Нікопольський завод феросплавів» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nzf.com.ua/main.aspx>
10. Шкирмонтов А.П. Выплавка ферросилиция с позиции энерготехнологического критерия работы ферросплавной электропечи // Бюллетень «Черная металлургия», 2018 - №8 – с. 43-49.
11. Богданов, С.П. Расчет руднотермических печей [Текст]: методические указания / С.П.Богданов – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2011.- 38с.

12. Сальников В.Г., Мустафина Р.М., Мустафина Г.М., Танат А.Х. Пути повышения энергоэффективности работы ферросплавных электропечей // Павлодар. Вестник ПГУ, 2012, - №1-2. – с. 101-106.

13. Говорун В.Ф., Говорун О.В., Говорун Д.В., Копотун И.С., Кунцевич В.В. Влияние величины напряжения и несинусоидальности тока на режимы работы ферросплавной печи // Павлодар. Вестник ПГУ, 2011, - №4. – с. 53-61.

14. Клименко В. Ф., Кулинич И. В., Головачев Н. Г. и др. Параметры, определяющие производительность электрических установок // Сталь, 2002-№5 - С.30-34.

15. Маркова А.В. Разработка математической модели и программных средств для расчета и оптимизации плавления шихты в руднотермической печи: автореф.дис. ... к.т.н.: 05.13.18 Санкт-Петербург, 2005. 20с.

16. Армейский С.В. Разработка математической модели подэлектродного пространства руднотермических печей: автореф.дис. ... к.т.н.: 05.13.18 Санкт-Петербург, 2004. 20с.

17. Елизаров В.А. Разработка системы управления руднотермической печью, использующей гармонический кривой фазного тока: автореф.дис. ... к.т.н.: 05.09.10 Москва, 2012. 20с.

18. Деревянко Д.В. Визначення втрат енергії в металоко́нструкціях феросплавної електропечі шляхом математичного моделювання. / Д.В. Деревянко, В.Ю. Куваєв, В.І. Нежурін// Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2017): матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, 1-3 листопада 2017 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». – Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2017. – с. 43-45

19. Тозони О.В. Электромагнитное поле в неоднородной среде и метод вторичных источников. - Ст.: Кибернетики и вычтехника, Киев,1973,- кн.22, ст.166..

20. Тозони О.В. Расчет трехмерных электромагнитных полей.- Киев:Техника,1974-322ст.
21. Ольдзиевский С.А и др. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электротермии – М; Металлургия, 1990-107 ст.
22. Куваев В.Ю. Математическое моделирование распределения энергии в объеме рабочего пространства трехфазной рудовосстановительной электропечи/ В.Ю. Куваев, В.И. Нежурин, А.В. Николенко// Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (121). - Дніпро, 2019. – с. 49-55
23. Ялова К.М. Комплексна математична модель процесу плавлення шихти у дугових сталеплавильних печах / К. М. Ялова// Мат. мод. Випуск № 2 (21). – Дніпроздержинськ, 2009. – С. 72-75.
24. Ялова К. М. Математичне моделювання теплової роботи дугових печей на етапі проплавлення колодязів. / К.М. Ялова, А.М. Павленко// «Системные технологии». – 4 (63). – Днепропетровск, 2009. – С. 68-75.
25. Сергеев П.В. Энергетические закономерности руднотермических электропечей, электролиза и электрической дуги [Текст] / П. В. Сергеев. – Изд. АН КазССР, 1963. – 184с.
26. Платонов Г.Ф. Параметры и электрические режимы металлургических электродных печей [Текст] / Г. Ф. Платонов. – М.: Энергия, 1965. – 224 с.
27. Сисоян Г.А. Электрическая дуга в электрической печи [Текст] / Г. А. Сисоян. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 216 с.
28. Математическое моделирование электрических полей печей рудной электротермии / С. А. Ольдзиевский, В. А. Кравченко, В. И. Нежурин, И. А. Борисенко. – Москва: Металлургия, 1990. – 112 с.
29. Левченко С. А. Електромагнітне та теплове поля руднотермічної плавильної печі / С. А. Левченко. // Вісник НТУ«ХП». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2016. – №17. – С. 76–80.

30. Миронов Ю. М. Комплексное математическое моделирование энергетических процессов в электрических цепях и ваннах электропечей смешанного нагрева / [Ю. М. Миронов и др.] // Труды Академии электротехнических наук Чувашской Республики. – 2001. – № 2. – С. 82–90.

31. Альперович И.Г., Армейский СВ. Моделирование дуг в электротермических печах: Сб. тр. Междун. конф. ММТТ 15 - Тамбов, 2002.-Т. 10. -с . 107-110

32. Альперович И.Г., Армейский СВ., Холодное В.А. Экспериментальное исследование геометрических размеров свободно горящей электрической дуги: Сб. тр. Междун. конф. ММТТ-16 - Санкт-Петербург, 2003. - Т. 10. - с. 94-96

33. Армейский СВ., Холоднов В.А. Методы расчета теплофизических свойств электродуговой плазмы состоящей из смеси одноатомных газов // Изв. вузов. Химия и хим. технология - Т. 47 - 2004. Вып. 3-е. 100-103

34. Армейский СВ., Холоднов В.А. Математическая модель дуги в руднотермической печи // Изв. вузов. Химия и хим. технология - Т. 47 - 2004. Вып. 3-е . 108-111

35. Армейский СВ., Альперович И.Г., Холоднов В.А. Адаптация математической модели подэлектродного пространства руднотермических печей (зоны дуги и реакции) на промышленных печах: Компьютерное моделирование при оптимизации технологических процессов электротермических производств. Сб. тр. науч.-техн. совещ. "Электротермия-2004" - СПб.:СПбГТИ, 2004 - с. 247-259

36. Елизаров В.А. Разработка тепловой модели руднотермической печи с закрытой дугой. // Электрометаллургия. - 2011. - №10. - С. 32-39.

37. Елизаров В.А., Рубцов В.П. Анализ гармонического состава формы кривой фазного тока для оценки теплового режима в руднотермической печи с закрытой дугой. // Вестник МЭИ. - 2011. - Л'22. — С. 61-67.

38. Елизаров В.А., Рубцов В.П. Анализ гармонического состава кривой фазного тока для оценки распределения мощности в тигле рудно-термической печи. // Электрометаллургия. - 2011. - №3. - С. 11-19.

39. Елизаров В.А., Елизаров К.А., Рубцов В.П. Исследование электромеханического регулятора мощности дуговой сталеплавильной печи с асинхронным электродвигателем. // Вестник МЭИ. — 2010. - №5. — С. 54-60.

40. Елизаров В.А. Применение гармонического состава фазного тока для построения системы управления тепловым режимом руднотермической печи с закрытой дугой. И Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы XIV международной конференции. В 2-х ч. Ч. 1. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. С. 228-232.

41. Елизаров В.А., Крутянский М.М., Нехамин С.М. Электрическая дуга в руднотермической печи и возможности управления технологическим процессом. Н Проблемы рудной и химической электротермии. Сб. труд. Всероссийской науч.-техн. конф. с междунар. участ. «ЭЛЕКТРОТЕРМИЯ - 2010». СПб.: Проспект науки, 2010. - С. 13-21.

42. Куваев В. Ю. Математическое моделирование распределения энергии в объеме рабочего пространства трехфазной рудовосстановительной печи. / В.Ю. Куваев, В.И. Нежурин, А.В. Николенко // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 2 (121). - Дніпро, 2019. – С. 49-55.

43. Дереза В.А. Математическое распределение энергии в объеме рабочего пространства трехфазной рудовосстановительной электропечи. / В.А. Дереза, В.Ю. Куваев, В.И. Неружин // Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018): матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції (м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 року) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». – Дніпро: Баланс-клуб, 2018. – С. 63-66.

44. Островский Г. М., Маркова А. В., Марков А. В. Моделирование плавления шихты в руднотермической печи // Журн. прикл. химии. - 1994. - Т. 67, № 6. - С. 967-971.

45. Маркова А. В. Прогнозирование режима плавления шихты в руднотермической печи // СПб.: СПб. гос. технол. ин-т (техн. ун-т), 2004. -1 4 с - Деп. в ВИНТИ 07.05.04, №762-B2004.

46. Маркова А. В. Прогнозирование режима плавления шихты в руднотермической печи (Furnace) // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2004611406 (07.06.2004). Офиц. бюл. федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам «Программы для ЭВМ. Базы данных. Топология интегральных микросхем». Москва. 2004. - № 3(48). - С.137.

47. Маркова А. В., Юленец Ю. П. Анализ режима работы руднотермической печи на основе математической модели процесса плавления // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ-17: Сб. трудов XVII Международ. научи, конф. - Кострома: Изд-во Косромского гос. технол. ин-та, 2004. -Т. 3. - С. 194 -196.

48. Маркова А. В., Юленец Ю. П. Выбор режимных параметров фосфорной руднотермической печи на основе анализа процесса плавления // Компьютерное моделирование при оптимизации технологических процессов электротермических производств: Сб. трудов научно-техн. конф. "Электротермия-2004". - СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской гос. химико-фармацевтической академии, 2004. - С.,284 - 289.

49. Плетнев А. А. Математическая модель тепломассопереноса в ванне шлакового расплава многоэлектродной руднотермической электропечи. / А.А. Плетнев, В.А. Талалов// Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. – 2011. – №1. – С. 36-44.

50. Качан Ю.Г. Можливості зменшення обсягів електроспоживання руднотермічною піччю. / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №25, (2022). – Дніпро: УДУНТ – ІВК «Системні технології», 2022. – с. 75-84

51. Качан Ю.Г. Динамическая модель температурного поля в электрическом теплоаккумулирующем преобразователе / Ю.Г. Качан, Н.А.

Баташова // Теория и практика металлургии. Днепропетровск. – 2007. - №6 (61). – С. 63-66.

52. Качан Ю.Г. Щодо комплексного підходу при моделюванні роботи руднотермічної печі [Текст] / Ю.Г. Качан, М.Ю. Міщенко // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2018. – Вип. 1 (39). – С. 94-96.

53. Данцис Я.Б. Электрические характеристики дугового разряда печей химической электротермии и способы их контроля / Я.Б. Данцис, Г.М. Жилов, З.А. Валькова // - Л.: ЛНГХ, 1991. - 54 с.

54. Данцис Я.Б. Электротермические процессы химической технологии: Учебное пособие для вузов / Я.Б. Данцис, В.А. Ершов, Г.М. Жилов / Под ред. В.А. Ершова - Л: Химия. 1984. - 464 с.

55. Mishchenko V.Yu. Definition ways of the current spreading process in the internal volume of the ore-thermal furnace./ V.Yu. Mishchenko, Yu.H. Kachan// Electrical Engineering And Power Engineering. – №2. – 2019. – 51-57

56. Бакиров А.Г. Исследование удельного электрического сопротивления шихтовых смесей для вы-плавки ферросиликоалюминия/ А.Г. Бакиров, А.К. Жунусов, А.Ф. Чекимбаев, Ж. Шошай// Нау-ка и техника Казахстана. – Павлодар. – 2018. – №2. –С.14-18.

57. Качан, Ю. Г. Щодо змінювання питомого електричного опору шихти під час виплавки високо вуглецевого ферромарганцю [Текст] / Ю. Г. Качан, В. Ю. Міщенко // Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : РВВ ЗДІА, 2017. – Вип. 2 (38). – С. 131-133.

58. Kachan Yu. H. Determination of distribution of introduced energy by volume of ore-thermal furnace. / Yu.H. Kachan, V.Yu. Mishchenko// Naukovyi Visnyk NHU. – 2019. – № 3. – 138-145

59. Исаченко В.П. Теплопередача /В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел// – М.: Энергоиздат, 1981. – 416с.

60. Нехамин С. М. Управление энергетической структурой рабочего пространства дуговых сталеплавильных и руднотермических печей– механизм

повышения эффективности их работы / С. М. Нехамин // Электротехнология. – 2013. – № 11. – С. 9–16.

61. Качан Ю.Г. Визначення обсягів розплаву та шлаку під час плавки в феросплавній печі / Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко// СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ МЕТАЛУРГІЇ. Наукові вісті. №23, (2020). – Дніпро: НМетАУ –ІВК «Системні технології», 2020. – с. 53-62

62. Качан Ю.Г. Алгоритм розрахунку температурного поля ванни руднотермічної печі /Ю.Г. Качан, Ю.Б. Ліуш, В.Ю. Міщенко // Вісник ХНУ. – 2018. – № 3 (261). – С. 19-22.

63. Егоров А. В. Расчет мощности и параметров электропечей металлургии. Учебное пособие для ВУЗов. М.: Металлургия. 1997, - 280 с.

64. Кацевич Л.С. Расчет и конструирование электрических печей. - Л. : Госэнергоиздат . 1969. -440с.

65. Методичний посібник «Руднотермічні печі». /Укл.: Г.О. Козлов – Нікополь: НТ НМетАУ, 2005. – 28 с.

66. Богданов, С.П. Расчет руднотермических печей [Текст]: методические указания / С.П.Богданов – СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2011.- 38с.

67. Свенчанский А.Д. Электрические промышленные печи. Ч.2. Дуговые печи – М.: Энергия, 1970. – 264 с.

68. Рысс М.А.М. Производство ферросплавов. - М.: Металлургия, 1985, - 344 с.

69. Толымбеков Л.Б. Разработка технологии выплавки ферросиликомарганца из окомкованного высококремнистого марганцевого сырья/ Диссертация на на соискание ученой степени кандидата технических наук// Екатеринбург 2014

70. Мусина И.Б. Разработка технологии выплавки высокоуглеродистого феррохрома с использованием каменного угля Борлинского месторождения: Дисс. канд. техн. наук: 05.16.02. / Мусина Инкара Бахытовна. – Караганда, 2009. - 112 с.

71. Панов Е.Н. Оценка теплопроводности сыпучих углеродистых материалов по величине удельного электрического сопротивления. / Е.Н. Панов, Г.Н. Васильченко, Т.В. Чирка, Т.В. Лазарев// НТУУ «КПУ» Metallургическая и горнорудная промышленность, 2013. – с. 5-9

72. Панов Е.В. Результаты исследования теплопроводности дисперсных углеродных материалов. / Е.В. Панов, В.В. Буряк, В.М. Голчанская, Т.В. Чирка// Вісник НТУУ «КПІ» Серія «Хімічна інженерія 2011 №1(7) с. 63-68

73. Мысик В.Ф. Metallургия ферросплавов: технологические расчеты : учебное пособие /В. Ф. Мысик, А. В. Жданов, В. А. Павлов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 536 с.

74. Жданов А.В. Исследование metallургических характеристик марганцеворудного сырья различных месторождений./ Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук// Екатеринбург 2008

75. Ильченко К.Д. Теплофизические свойства шихт высокоуглеродистого ферромарганца с офлюсованным агломератом/ К.Д. Ильченко, Е.П. Морозенко// Metallургическая теплотехника. Сб.научн. трудов.- Днепропетровск: ПП Грек О.С.- 2006.- С. 157-161.

76. Ильченко К.Д. Теплофизические свойства шихт передельного силикомарганца/ К.Д.Ильченко, Е.П.Морозенко// Metallургическая теплотехника. Сб.научн. трудов.- Днепропетровск: Пороги, 2004. - С. 153-156.

77. Качан Ю.Г. Визначення інтервалів щодо можливих значень параметрів шихти при одержанні феросплавів/ Ю.Г. Качан, В.Ю. Міщенко // Збірник наукових праць ДДТУ № 2(41), 2022. – с. 107-114

78. Методи оптимізації та дослідження операцій [Текст] : навчальний посібник / Укладачі: Я. Б. Сікора, А.Й. Щехорський, Б.Л. Якимчук. – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. Івана Франка, 2019. – 148 с.

79. Методи оптимізації без використання похідних: практикум з дисципліни «Дослідження операцій»[Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 113 «Прикладна математика», спеціалізації «Наука про дані та математичне моделювання» / Т. С. Ладогубець, О. Д. Фіногенов; КПІ ім.

Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 493 Кбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 45 с.

80. Шелудько Г.А., Науменко В.В., Стрельнікова О.О. Методи розв'язання задач оптимізації: Конспект лекцій. - Харків: УкрДАЗТ, 2014. – 50 с.

81. Основи теорії похибок фізичних величин [Текст]: Методичні матеріали для загального фізичного практикуму/ Укладачі: Т.М. Демків, О.І. Конопельник, Я.І. Шопа. – Львів: Вид-во ЛНУ ім. Івана Франка, 2008. – 40с.

82. Єгоров, С. Г. Конструкції агрегатів кольорової металургії [Текст] / С. Г. Єгоров, І. Ф. Червоний, Р. М. Воляр, під ред. д.т.н., проф. Червоного І. Ф.; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2012. – 230 с.

83. Мастрюков, Б. С. Теория, конструкция и расчёт металлургических печей. Т.2. Расчёты металлургических печей [Текст] / Б. С. Мастрюков. – М.: Металлургия, 1986. – 376 с.

84. Металлургия марганца Украины / Б.Ф.Величко, В.А.Гаврилов, М.И.Гасик, С.Г.Грищенко, А.В.Коваль, А.Н.Овчарук // Київ, "Техніка" 1996 – 470 с

85. Струнский Б.М. Расчёты руднотермических печей. – М.: Металлургия. - 1982.- 192 с.

86. Гаврилов В.А., Поляков И.И., Поляков О.И. Оптимизация режимов работы ферросплавных печей. – М.: Металлургия. – 1996. -176 с.

87. Shkirmontov A.P. Establishing the theoretical foundations and energy parameters for the production of ferroalloys with a larger-than-normal gap under the electrode // Metallurgist. – 2009. – V. 53. – N 5-6. – P. 300 – 308. Scopus, Q3.

88. Shkirmontov A.P. Theoretical principles and energy parameters in ferrosilicon production with an increase in the electrode spacing and the distance from the electrodes to the bath // Metallurgist. – 2009. – V. 53. – N 5–6. – P. 373 – 379. Scopus

89. Shkirmontov A.P. Determination of the energy parameters for the smelting of manganese ferroalloys with increases in the electrode gap and electrode spacing // Metallurgist.–2009.– V. 53.– N 7-8. – P.512 – 517. Scopus, Q3

90. Офіційний сайт компанії «YDD CORPORATION» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://yddcorp.kz/>

ДОДАТКИ

Додаток А

Акт перевірки адекватності комплексної математичної моделі руднотермічної печі

Товариство з обмеженою відповідальністю «Запорожстепсплав»

юридична адреса: 69041, м. Запоріжжя, вул. Мінська, буд. 5
поштова адреса: 69091, м. Запоріжжя, А/Я 2130
Код ЄДРПОУ 32068473, ПІН 320684708286.
р/р № UA093133990000026002355250001
у ЗАП РУ АТ КБ «ПриватБанк»

«18» січня 2023р

АКТ

*перевірки адекватності комплексної математичної моделі
руднотермічної печі*

Даний акт складений про те, що розроблена в Національному університеті «Запорізька політехніка» (розпочата в Запорізькій державній інженерній академії до її реорганізації) комплексна математична модель руднотермічної печі перевірена на адекватність на основі даних тридцяти плавок, що були проведені на діючій печі РКО-2,5 ТОВ «Запорожстепсплав»

Математична модель дозволяє прогнозувати тривалість плавки, кількість утвореного розплаву та обсяги споживання електричної енергії при заданих геометричних і електричних параметрах печі та компонентно-кількісного складу шихти.

В результаті перевірки підтверджена адекватність розробленої моделі. Похибка склала 3,1% за обсягом спожитої електричної енергії та 3,3% за кількістю отриманого феросилікомарганцю.

Заступник директора з виробництва
ТОВ «Запорожстепсплав»
П.В. Жуденко



Зав. кафедрою електропостачання
промислових підприємств НУ
«Запорізька політехніка» к.т.н., доцент
О.А. Шрам
Асистент каф. електропостачання
промислових підприємств НУ
«Запорізька політехніка»
В.Ю. Міщенко

Додаток Б**Акт про практичне використання результатів кандидатської дисертації
здобувача Міщенко В.Ю.****Товариство з обмеженою відповідальністю «Запорожстепсплав»**

юридична адреса: 69041, м. Запоріжжя, вул. Мінська, буд. 5
поштова адреса: 69091, м. Запоріжжя, А/Я 2130
Код ЄДРПОУ 32068473, ПІН 320684708286.
р/р № UA093133990000026002355250001
у ЗАП РУ АТ КБ «ПриватБанк»

«20» вересня 2023р

АКТ

*про практичне використання результатів
кандидатської дисертації здобувача Міщенко В.Ю.*

Цей акт складений про те, що здобувач Міщенко В.Ю., передав для практичного використання ТОВ «Запорожстепсплав» комплексну математичну модель руднотермічної печі, за допомогою якої можна прогнозувати тривалість плавки, кількості утвореного розплаву в залежності від компонентно-кількісного складу шихти, що завантажуються у піч.

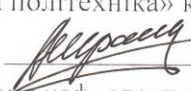
За результатами проведених розрахункових досліджень на моделі руднотермічної печі типу РКО-2,5 для уникнення перегріву розплаву пропонується зменшити тривалість плавки, що дасть змогу зменшити споживання електричної енергії до 10% у порівнянні з показниками діючої печі.

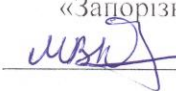
Запропоновано при реконструкції РТП передбачити механізм переміщення електродів у горизонтальній площині, та розводити їх у відповідності до результатів попередніх розрахунків на математичній моделі для кожної серії плавки в залежності від компонентно-кількісного складу шихти, що в свою чергу також призведе до зменшення обсягів споживання електричної енергії в межах 20%. Якщо ж це буде не можливо, то діаметр розпаду електродів буде встановлено одноразово у відповідності до того які шихтові матеріали будуть здебільшого використовуватися на підприємстві.

Заступник директора з виробництва
ТОВ «Запорожстепсплав»


П.В. Жукденко

Зав. кафедрою електропостачання
промислових підприємств НУ
«Запорізька політехніка» к.т.н., доцент


О.А. Шрам
Асистент каф. електропостачання
промислових підприємств НУ
«Запорізька політехніка»


В.Ю. Міщенко

Додаток В

Акт впровадження в освітній процес

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
 Проректор з наукової роботи
 НУ «Запорізька політехніка»
 д-р техн. наук, професор

 « 17 » вересня 2023 р.
 Вадим ШАЛОМЄЄВ



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Міщенко Владислава Юрійовича «Заходи підвищення енергоефективності руднотермічних печей», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, в навчальний процес

Результати дисертаційної роботи Міщенко В.Ю. впроваджені у навчальний процес кафедри електропостачання промислових підприємств шляхом використання запропонованих у дисертаційній роботі заходів підвищення енергоефективності руднотермічних печей. Розроблена пошукувачем комплексна математична модель печі дозволяє розраховувати кількість спожитої електричної енергії в динаміці; прогнозувати час завершення плавки, виходячи із заданих вхідних параметрів технологічного процесу; контролювати температурне поле ванни печі; проводити подальші розрахункові дослідження щодо пошуку оптимальних режимів її роботи з енергетичної точки зору. Вона є дієвим інструментом наукових досліджень.

Результати, отримані в процесі виконання дисертаційної роботи, впроваджено у навчальний процес при викладанні лекційних занять та практичних робіт з дисциплін: «Електротехнологічні установки», «Енергозбереження в технологічних установках та будівлях», «Основи наукових досліджень енерговикористання» та при виконанні бакалаврських та магістерських кваліфікаційних робіт щодо дослідження режимів роботи руднотермічних печей спрямованої на підвищення їх енергоефективності. Вище зазначені навчальні курси викладаються студентам спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» за освітніми програмами «Електротехнічні системи електроспоживання» та «Енергетичний менеджмент».

Декан електротехнічного факультету



Микола АНТОНОВ

Завідувач кафедри «Електропостачання промислових підприємств»



Олександр ШРАМ