

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

Міщенко Владислав Юрійович

УДК 621.365.3:621.311

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ РУДНОТЕРМІЧНИМИ ПЕЧАМИ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2024

Дисертація є рукописом

Робота виконана на кафедрі електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор

Качан Юрій Григорович, професор кафедри електропостачання промислових підприємств Національного університету «Запорізька політехніка» Міністерства освіти і науки України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор

Сінчук Олег Миколайович, завідувач кафедри електричної інженерії Криворізького національного університету Міністерства освіти і науки України

кандидат технічних наук, доцент

Курляк Петро Омелянович, завідувач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу Міністерства освіти і науки України

Захист відбудеться 24.05.2024 о 13:00 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.080.07 в Національному технічному університеті «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України за адресою: 49005, м. Дніпро, пр. Дмитра Яворницького, 19

Автореферат розіслано «22» квітня 2024 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., доцент



І.М. Удовик

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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 напрямам 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 дослідження. 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 методику 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.

Наукові положення, що виносяться на захист.

1. 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.

2. 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 одержаних результатів.

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

2. Вперше запропоновано параметри налаштування моделі, значення яких залежать від складу шихти і температури розплаву, а отже змінюються в процесі плавки і не можуть бути з достатньою точністю ідентифіковані за допомогою існуючих методів, визначити шляхом розв'язання оптимізаційної задачі щодо мінімальної середньоквадратичної похибки прогнозу вихідної величини моделі за всіляко можливих значень цих параметрів у попередньо встановлених межах їх коливань.

3. 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;

4. 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, дозволило врахувати додаткові фактори, такі як: компонентно-кількісний склад шихти; максимально допустиме значення температури розплаву в зоні футерування; реальну геометрію діючої РТП й дає можливість визначити найбільш доцільне значення зазначеного діаметру в кожному конкретному випадку.

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 пиччо 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 «Запоріжстале» 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. Здобувач самостійно сформулював завдання дослідження, наукову новизну одержаних результатів, виконав аналіз та систематизацію існуючих моделей руднотермічних печей, запропонував структуру нової моделі, провів розрахунок дослідження щодо підвищення енергоефективності руднотермічної печі.

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 наукометричної 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність роботи і показаний зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета і основні завдання дослідження, приведено наукову новизну і практичну цінність одержаних результатів, рівень їх апробації, кількість публікацій за темою дисертації і особистий внесок автора.

У першому розділі розглянуті існуючі конструкції руднотермічних печей (РТП) та характер ведення технологічних процесів в них. Виявлено, що найбільш розповсюдженими є круглі трьохелектродні руднотермічні печі через їх універсальність щодо можливості виплавляти різноманітні види феросплавів.

Проведений аналіз відомих заходів щодо підвищення енергоефективності зазначеної печі. Найбільш розповсюдженим є використання установок продольно-ємнісної компенсації (УПК) реактивної потужності, які зменшують дефіцит реактивної потужності та підвищують активну складову останньої.

Також проаналізовані існуючі методи, що використовуються для дослідження процесів у руднотермічних печах та виявлено, що найбільш розповсюдженим є математичне моделювання. Ним 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.

В одних моделях процеси в РТП розглядаються зазвичай тільки в стаціонарному режимі з чіткими межами теплових зон, що визначаються за

допомогою розв'язання диференціальних рівнянь у приватних похідних в системі програмування MathCAD. Не враховуються також ні коливання складу сировини, ні просідання шихти в процесі плавки. Припускається, що у РТП не відбуваються накопичення шлаку та відновленого продукту. При цьому також процеси моделюються як такі, що протікають у просторі навколо одного електрода й практично не розглядаються параметричні зв'язки, зумовлені структурою багатоелектродних печей.

В інших моделях, науковці приділяють увагу тільки тепловим процесам, що описуються за допомогою диференціального рівняння нестационарного теплообміну з внутрішніми джерелами теплоти, яке спільно з граничними та початковими умовами дає опис процесів, що відбуваються у ванні РТП із закритою дугою.

Ще одним досить цікавим напрямком моделювання РТП є метод вторинних джерел (метод інтегральних рівнянь), який використовується для розрахунку електромагнітного поля печі. Однак він має ряд недоліків. Наприклад, зі збільшенням кількості однорідних зон щодо провідності в об'ємі розглядуваного середовища інтегральні рівняння дуже ускладнюються, а це впливає на обсяг обчислювальних операцій, що, в свою чергу, може викликати необхідність зменшення кількості зазначених зон й збільшити похибку розрахунків. На точність отриманих результатів суттєво впливає також і кількість використаних розрахункових точок у виділених для експериментальних досліджень неоднорідних зонах печей.

На підставі проведеного аналізу сформульовані завдання дисертаційної роботи, в яких особлива увага сконцентрована на розробці комплексної моделі руднотермічної печі, 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.

У другому розділі проведено аналіз відомих на тепер математичних моделей руднотермічних печей і сфери їх застосування, виявлені їх переваги та недоліки. Зроблено припущення, що єдиної моделі, яка одночасно враховує взаємодію всіх процесів у ванні печі та дозволяє аналізувати їх за перебігом часу, не існує і, що найбільш доцільним варіантом є створення узагальненої моделі роботи руднотермічної печі в динаміці реалізований за представленим на рисунку 1 алгоритмом.

Він складається з функціональних блоків, кожний з яких має свій математичний опис. Деякі з них складають циклічну частину умовою завершення якої, в залежності від поставлених задач, може бути: - тривалість плавки; - кількість утвореного розплаву; - обсяг спожитої електричної енергії; тощо.

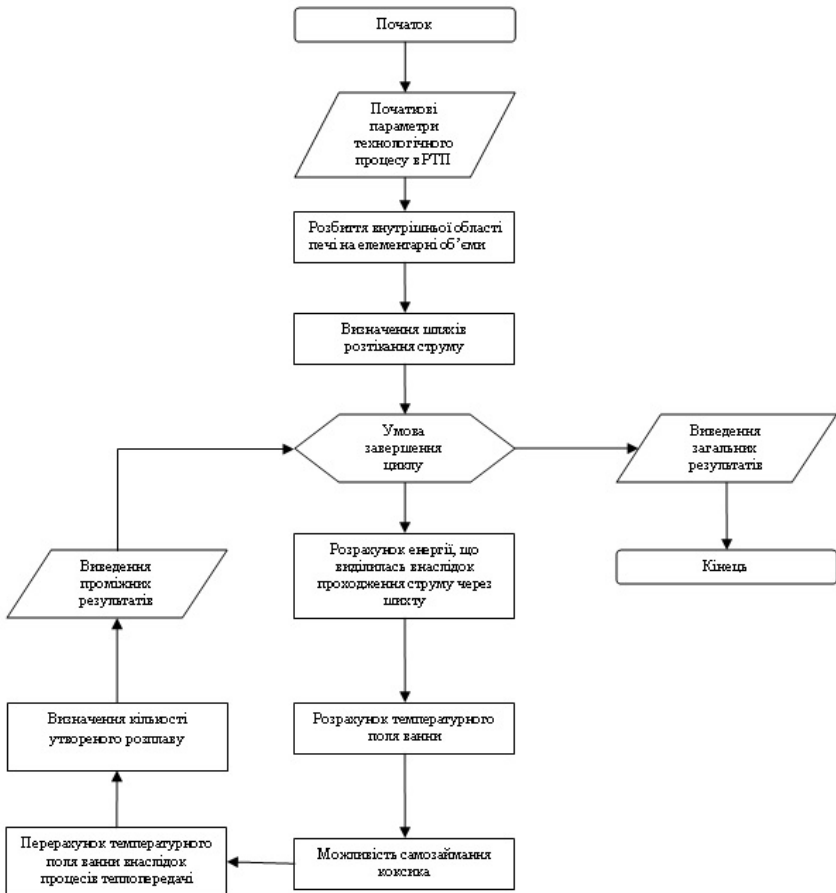
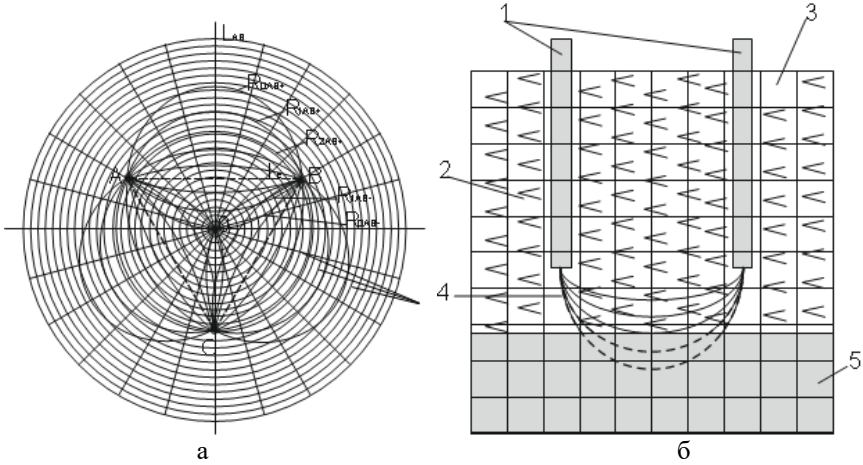


Рис. 1. Узагальнений алгоритм роботи руднотермічної печі в динаміці.

Запропоновано ванну руднотермічної печі, де відбувається процес плавки, представити у вигляді розбитого на елементарні об'єми циліндра із секторів зі сторонами ΔR , Δz та кутом $\Delta\varphi$ циліндра, де R – за радіусом, z – за глибиною, φ – за кутом, H_c – глибина заповнення ванни шихтою. Подальші розрахункові точки розташовані в геометричних центрах кожного з цих елементарних об'ємів.

На основі літературних джерел зроблене припущення, що шляхи протікання струму в ванні печі представлені виглядають як множині дуги, що

проходять через центри електродів в напрямку до країв та центру ванни з відповідними радіусами, а також в піделектродному просторі. Вони мають вигляд, що представлений на рисунку 2.



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

Рис. 2. Шляхи протікання струму в горизонтальній площині (а) і в піделектродному просторі (б).

В результаті такого припущення кількість енергії, що виділилась в i -тому елементарному об'ємі за рахунок проходження електричного струму за проміжок часу Δt може бути визначена як:

$$Q_{e(R,\varphi,z)} = I_i^2 \cdot R_{R,\varphi,z} \cdot \Delta t, \quad (1)$$

де I_i – сила струму шляху, що проходить через i -й об'єм, А; $R_{R,\varphi,z}$ – значення електричного опору i -го об'єму, Ом; Δt – проміжок часу, с.

Температурне поле ванни будується на основі розрахунків значень температури кожного елементарного об'єму, яку можна визначити за формулою:

$$t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau} = t_{R,\varphi,z}^{\Delta\tau} + \frac{Q_{e(R,\varphi,z)}}{c_m(R,\varphi,z) \rho_{R,\varphi,z} \Delta V_{R,\varphi,z}} \quad (2)$$

де c_m – масова питома теплоємність розрахункового елементарного об'єму, Дж/(кг·К); ρ – його питома густина, кг/м³; $t_{R,\varphi,z}^{\tau}$, $t_{R,\varphi,z}^{\tau+\Delta\tau}$ – розрахункові

температури в центрі елементарного об'єму на початку і в кінці в проміжку часу τ ; K ; R , φ , z – координати центру, об'єму, що розглядається.

Процес теплопередачі між елементарними об'ємами враховується за допомогою рівняння теплового балансу. Для розглянутого елементарного об'єму, який визначається як:

$$\Delta J_{R,\varphi,z} = \sum_{j=1}^6 Q_j, \quad (3)$$

де Q_j – кількість теплоти, що входить чи виходить з елементарного об'єму у напрямку прилеглих до нього об'ємів за проміжок часу $\Delta\tau$; $\Delta J_{R,\varphi,z}$ – зміна тепломісткості останнього. Індекс j – номер прилеглої до i -го елементарного об'єму.

Так згідно гіпотезі Фур'є, кількість теплоти, що входить чи виходить з елементарного об'єму зі сторони j -ї грані можна представити у вигляді:

$$Q_j = \pm \lambda_i \text{grad}_i T_i S_i \Delta\tau, \quad (4)$$

де λ_i – еквівалентний коефіцієнт теплопровідності в i -му напрямку, Вт/(м·К); $\text{grad}_i T_i$ – градієнт температури в i -му напрямку, (К/м); S_i – площа i -ї грані, м²; $\Delta\tau$ – проміжок часу, с.

Отже, синтезована таким чином математична модель, що базується на залежностях з теоретичних основ електротехніки – для знаходження кількості енергії, яка виділилась в ванні печі внаслідок проходження електричного струму та теплотехніки при розрахунках температурного поля та розподілу енергії внаслідок процесів теплопередачі, дозволяє враховувати взаємодію електричних та теплових процесів, що відбуваються в ванні печі в динаміці.

У третьому розділі розглянута практична реалізація запропонованого алгоритму роботи руднотермічної печі в динаміці, розрахункова частина якої виконана з використанням програмного забезпечення *Python*, а візуалізація отриманих результатів через експорт даних за допомогою бібліотеки *SolidPython* в *OpenSCAD*.

При налаштуванні моделі на конкретну руднотермічну піч з'ясувалось, що її геометричні та електричні параметри попередньо відомі й можуть одноразово вводитися у програму на початку розрахунків. Однак потрібно знати ще й фізичні параметри шихти до яких відносяться наступні величини: - питомий електричний опір; - теплоємність; - теплопровідність; - питома густина. Числові значення кожного з останніх визначаються співвідношеннями компонентів шихти i , окрім густини, мають великий діапазон коливання в залежності від температури. Для налаштування моделі за вказаними параметрами проведено аналіз наукових праць, які присвячені

цьому питанню, що дало можливість встановити реальні межі їх коливання, представлені на рисунках 3-5.

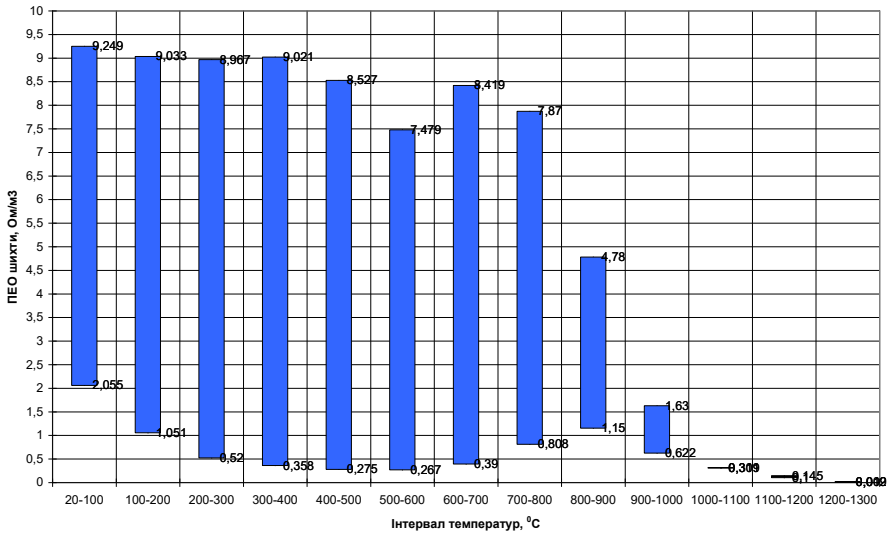


Рис. 3. Діапазон значень питомого електричного опору шихти для різного її відсоткового складу в інтервалі температур.

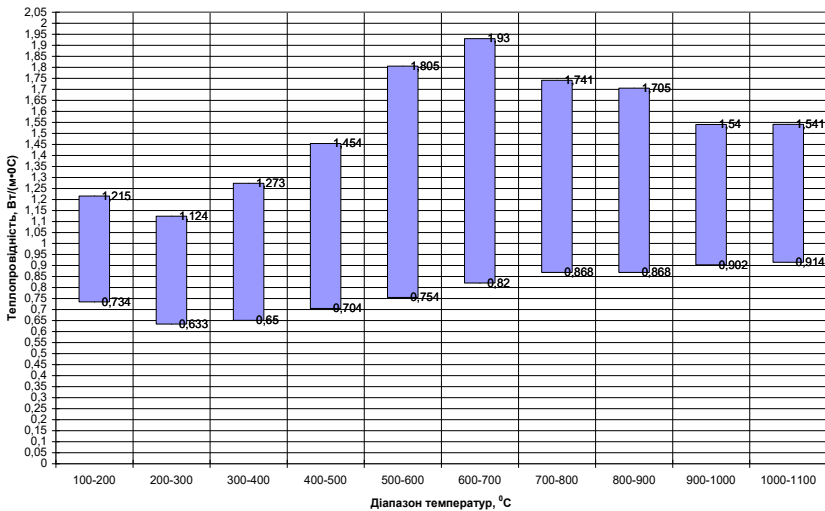


Рис. 4. Діапазони значень теплопровідності шихти за різних температур.

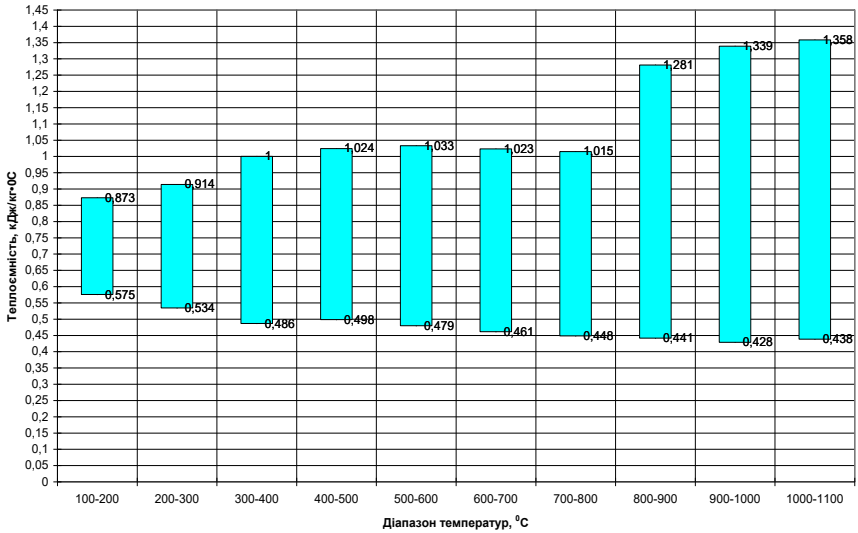


Рис. 5. Діапазон значень теплоємності шихти за різних температур.

Виявлено, що ці діапазони коливань дуже великі і неоднозначні й залежать від багатьох факторів. Однак наведеної інформації достатньо для проведення більш точних технологічних розрахунків щодо зазначених властивостей при різних температурах та складових шихти, з яких виплавляють певні марки феросплавів.

Для спрощення процесу налаштування моделі і отримання мінімальної похибки прогнозу запропоновано реалізувати оптимізаційну задачу щодо зазначеної похибки при різних варіаціях шойно згаданих параметрів в визначених для них інтервалах. На рисунку 6 представлена загальна блок-схема реалізації такого обчислювального експерименту.

За представленим алгоритмом перед використанням моделі проводяться обчислювальні експерименти для визначення параметрів її налаштування. Для цього на початку вибирається кількість інтервалів для розбиття наведених вище діапазонів коливання значень цих параметрів та створюються відповідні масиви даних. Далі обирається перша комбінація і проводяться всі необхідні розрахунки на запропонованій математичній моделі руднотермічної печі, результати останніх порівнюються із реальними значеннями, отриманих на об'єкті та вираховується похибка прогнозу. Потім береться інша комбінація значень параметрів і проводяться ті ж самі розрахунки.

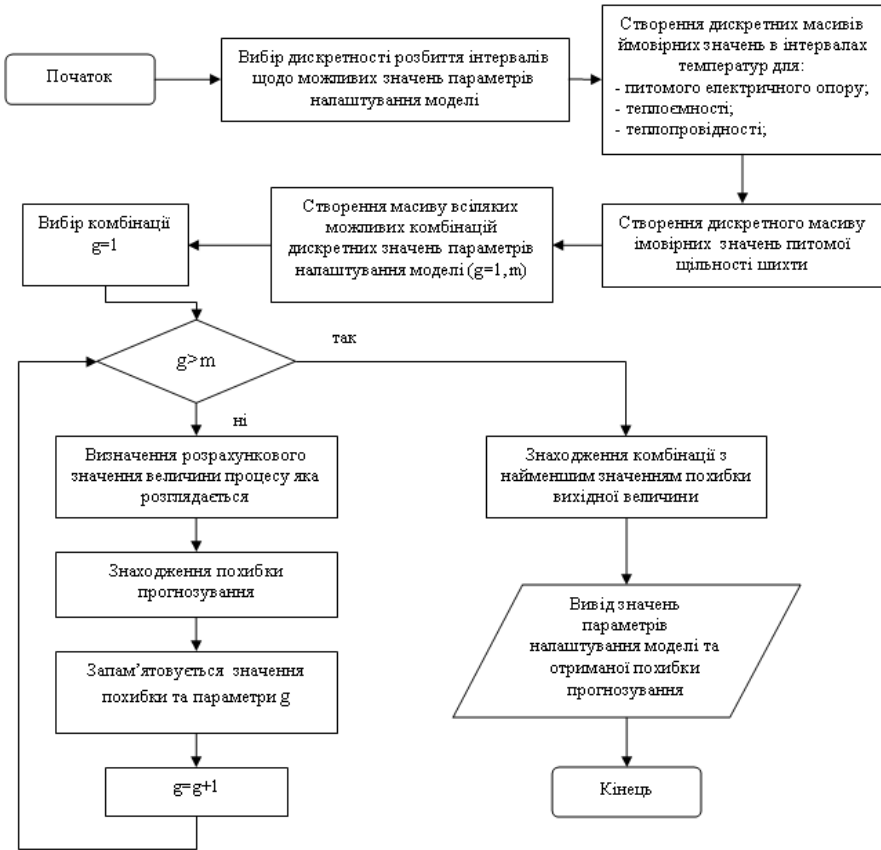


Рис. 6. Блок-схема алгоритму щодо встановлення значень параметрів налаштування моделі

В подальшому аналогічним чином робиться перебір усіх можливих комбінацій значень параметрів налаштування. Після закінчення циклу такого перебору виводяться значення усіх параметрів налаштування моделі при яких була отримана мінімальна похибка прогнозу. Якщо остання прийнятна з точки зору наступних розрахункових досліджень, то вважається, що необхідна комбінація знайдена, а сама модель адекватна процесу.

Тож на діючій печі РКЗ-2,5 ТОВ «Запорозьспецсплав» на основі даних тридцяти плавок була реалізована така оптимізаційна задача налаштування моделі. Її результати представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 Отримані в результаті розв'язання оптимізаційної задачі значення 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									

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, про що складений відповідний акт.

Четвертий розділ дисертації присвячений проведенню на запропонованій моделі розрахункових досліджень процесу отримання феросплавів задля підвищення його енергоефективності. В результаті виявлено, що за існуючою технологією ведення плавки та показником її завершення – нормований обсяг спожитої електричної енергії, можлива з авантаженої шихти кількість силікомарганцю утворюється раніше досягнення цього показника для всіх досліджуваних видів шихт. На рисунку 7 показана динаміка споживання електроенергії та кількості утвореного розплаву для одного із них.

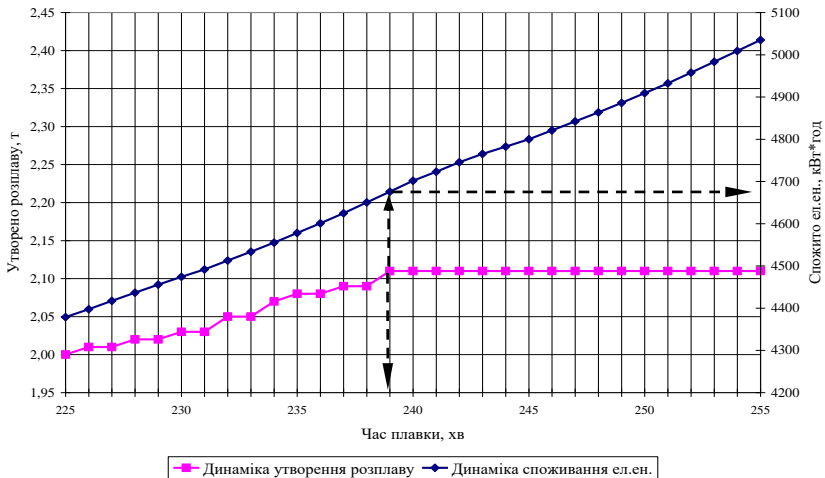


Рис. 7. Динаміка утворення розплаву та споживання електричної енергії

Отже має місце необґрунтований перегрів розплаву, що в свою чергу призводить до марної витрати електричної енергії. Визначення необхідної тривалості плавки на основі проведених розрахункових досліджень з урахуванням використаного компонентно-кількісного складу шихти дозволяє зменшувати обсяг спожитої пичцю електроенергії у порівнянні з базовим варіантом.

Також проведені дослідження щодо впливу зміни діаметру розпаду електродів на ефективність споживання електричної енергії пичцю. В них враховані такі фактори як: компонентно-кількісний склад шихти; максимально допустиме значення температури розплаву в зоні футерування; реальна геометрія діючої РТП. Результати показали, що виходячи з допустимої робочої температури футерування печі, максимальна межа зміни діаметру розпаду електродів для всіх можливих видів шихт для печі РКЗ-2,5 складала 1,4м. При цьому спостерігається інтенсифікація процесу одержання феросплаву за рахунок більш рівномірного прогріву температурних зон печі, що проілюстровано на рисунках 8 та 9. Як видно з наведених на цих рисунках графіків тривалість плавки можна скоротити на 30 хвилин, що в свою чергу призведе до зменшення витрат електричної енергії.

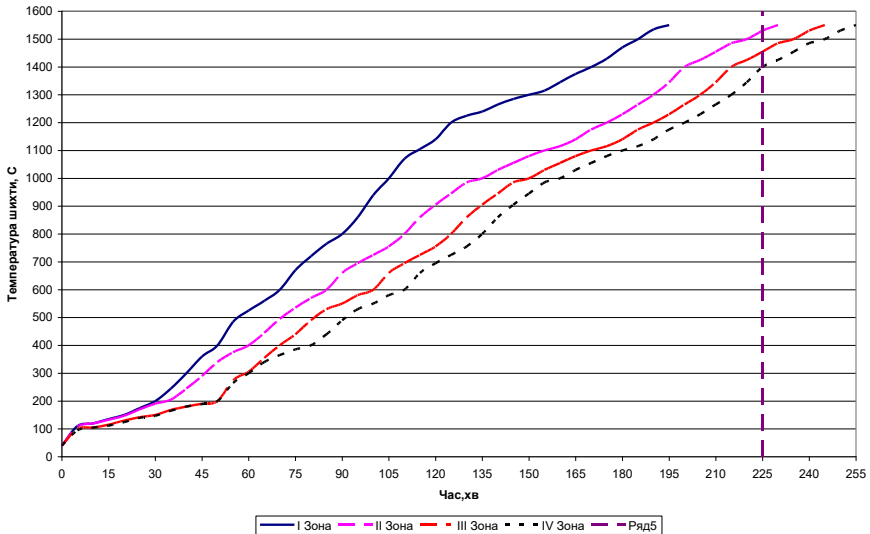


Рис. 8. Динаміка нагріву шихти за чотирма різними зонами ванни печі при діаметрі розпаду електродів в 1,1м

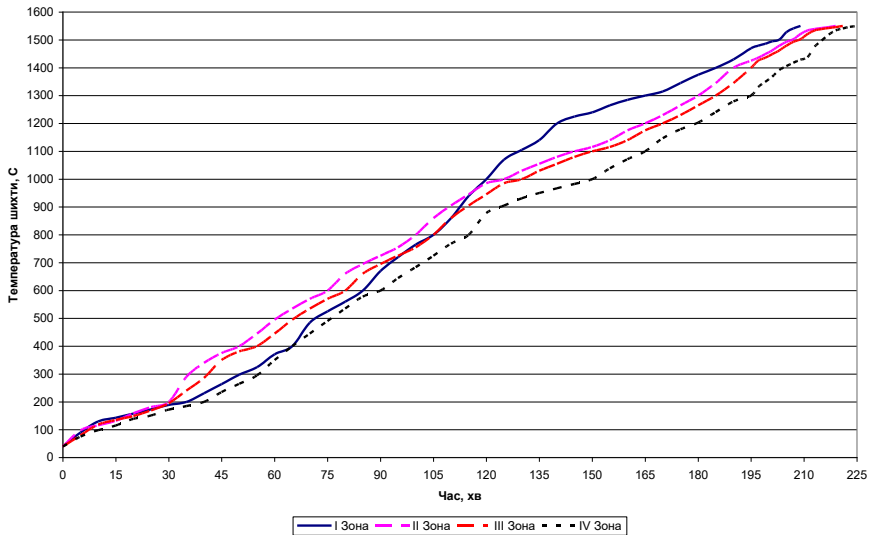


Рис. 9. Динаміка нагріву шихти за чотирма різними зонами ванни печі при діаметрі розпаду електродів в 1,4м.

У п'ятому розділі надані рекомендації щодо конструктивних й організаційних заходів, впровадження яких дозволить підвищити енергоефективність руднотермічних печей. Серед яких можна виділити наступні:

1. Закінчувати процес виплавки феросплаву, не за нормативним обсягом спожитої електроенергії, а при досягненні його кількості, яка відповідає складу і обсягу завантаженої шихти. Попередньо проведені на моделі розрахунки дозволяють визначити тривалість такої плавки.

2. Розводити електроди для кожного компонентно-кількісного складу шихти чи серії подібних плавок. При цьому діаметр розпаду електродів визначати за найменшим, у цьому випадку, обсягом спожитої електричної енергії. При зміні складу шихти або ж при виплавленні іншого виду феросплаву необхідно проводити нові розрахунки й знову налаштовувати піч для енергоефективної її експлуатації. Якщо конструкція печі не дозволяє постійно змінювати розпад електродів рекомендовано використовувати склад шихти, який дає найменшу за результатами розрахунків питому витрату електроенергії на 1т розплаву.

Проведений розрахунок економічного ефекту від впровадження заходів щодо підвищення ефективності споживання пичцю електроенергії. Наведені результати показують, що в залежності від кількісного та компонентного

складу шихти тривалість плавки можна зменшити, знизивши тим самим обсяги споживання електроенергії від 2,6% до 5,9%.

Якщо конструкція РТП дозволяє розводити електроди у горизонтальній площині, і виставити діаметр їх розпаду у відповідності до результатів розрахунків, то це призведе до скорочення тривалості плавки на 9,4-16,5% й дозволить зменшити обсягів споживання електричної енергії майже на 20%.

Економічний ефект від впровадження запропонованих організаційних та технічних заходів щодо раціонального ведення процесу виплавки феросплавів може скласти 1071–9256 тис.грн на рік в залежності від кількості реалізованих заходів енергозбереження.

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 основана 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 не виправдана 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 у відповідності 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 «Запоріжспецсплав», які взяті ним до впровадження, може скласти 1071–9256 тис.грн на рік в залежності від кількості реалізованих заходів енергозбереження.

Основні наукові положення та результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

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 ХХІІІ науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА. Енергетика, електроніка та інформаційні технології. Том ІІІ / 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. ІТММ'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. ІТММ'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. ІТММ'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

В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачу належить: [1] – планування та проведення експериментів; [3] – проаналізовані основні проблеми при моделюванні роботи руднотермічної печі та запропонований новий підхід у цьому питанні; [4] – зроблене припущення щодо можливих траєкторій протікання струму; [5] – розроблений алгоритм визначення температурного поля ванни печі; [7] – розроблена методика визначення розподілу введеної електричної енергії; [8] – запропонований підхід у визначенні можливих шляхів розтікання струму у ванні печі; [9] – запропоновані розрахункові формули для визначення кількості утвореного розплаву та шлаку; [10] – розроблений алгоритм визначення кількості утвореного розплаву та шлаку; [11] – розроблений узагальнений алгоритм роботи руднотермічної печі в динаміці; [12] – запропонований підхід до визначення параметрів шихти; [14] – визначені діапазони коливання значень різних параметрів шихти; [15] – запропонований підхід для визначення обсягів споживання електричної енергії руднотермічною піччю; [16] – запропоновано використовувати систему полярних координат при розбитті внутрішньої області печі на елементарні об'єми; [17] – проведені дослідження на моделі.

Анотація

Міщенко 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 невинуватий 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 пичю 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 «Запорозьспецсплав» 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 піч, 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.