

УДК 669.162.262: 681.3.083.133

**Д. М. Тогобицька**, д.т.н., проф., ORCID 0000-0001-6413-4823**А. І. Белькова**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-8519-9351**І. Г. Муравйова**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5926-7787**Н. Г. Іванча**, с.н.с., ORCID 0000-0002-5366-9328**Д. О. Степаненко**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-5913-2284**О. С. Нестеров**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-0183-0327**Ю. М. Ліхачов**, н.с., ORCID 0000-0003-3168-7813*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

### **РОЗРОБКА ТА ВИПРОБУВАННЯ АЛГОРИТМІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ ДОМЕННОЇ ШИХТИ У КОНКРЕТНИХ УМОВАХ РОБОТИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ**

**Анотація.** Метою роботи є розробка та тестування для конкретних умов роботи доменної печі алгоритмічних засобів Експертної системи вибору оптимального складу багатокомпонентної шихти, що забезпечує необхідні техніко-економічні показники плавки в змінних сировинних та енергетичних умовах. Розглянуто особливості алгоритмічних засобів системи вибору оптимального складу доменної шихти, які розроблені з використанням методів фізико-хімічного та математичного моделювання процесів розподілу та плавлення залізородних матеріалів у різних зонах печі для вироблення науково обгрунтованих рекомендацій щодо коригування складу шихти з урахуванням наявних сировинних та енергетичних ресурсів. У системі реалізовано комплекс фізико-хімічних моделей та критеріїв для опису процесів розподілу залізородних матеріалів за радіусом доменної печі, їх фазових перетворень у високотемпературних зонах та спрямованого формування розплавів, що регламентуються системою обгрунтованих технологічних обмежень. Інформаційною основою для створення прогнозних моделей розрахунку фізико-хімічних властивостей металургійних розплавів є інформація, накопичена в базах даних "Залізородні матеріали", "Шлак" і "Метал-шлак" створеної в Інституті чорної металургії інтегрованої Бази Знань "Металургія". Рішення оптимізаційної задачі здійснюється на основі експертної оцінки прогнозування показників плавки та розрахунку оптимального складу шихти з використанням методів векторної оптимізації шляхом знаходження компромісу між прийнятими критеріями оптимальності та технологічними обмеженнями. Виконано тестування Експертної системи та розроблено рекомендації щодо компонентного складу доменної шихти для конкретних умов роботи доменної печі.

**Ключові слова:** доменна шихта, залізородні матеріали, властивості розплавів, технологічні обмеження, експертна система, критерії оптимальності, оптимізація складу шихти.

**Посилання для цитування:** Розробка та випробування алгоритмічного забезпечення експертної системи вибору оптимального складу багатокомпонентної доменної шихти у конкретних умовах роботи доменних печей / Д. М. Тогобицька,

А. І. Белькова, І. Г. Муравйова, Н. Г. Іванча, Д. О. Степаненко, О. С. Нестеров, Ю. М. Ліхачов. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 67-81. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-67-81.

**Вступ.** Завершальним етапом створення експертної системи вибору оптимального складу багатокомпонентної доменної шихти (ЕС) стала розробка її алгоритмічного забезпечення відповідно до запропонованої концептуальної функціонально-алгоритмічної структури системи [1]. У розробленій ЕС реалізовано комплекс математичних та фізико-хімічних моделей, що описують та пов'язують процеси розподілу та поведінки шихтових матеріалів у різних зонах печі з техніко-економічними показниками плавки. Відмінною особливістю ЕС від відомих аналогів є врахування фізико-хімічних властивостей розплавів, що утворюються в різних зонах робочого простору доменної печі, та технологічних обмежень, що забезпечують раціональний перебіг агрегатних перетворень залізородних матеріалів у печі та спрямоване формування розплавів необхідного складу та властивостей.

**Метою дослідження** є тестування для конкретних умов роботи доменної печі алгоритмічних засобів експертної системи вибору оптимального складу багатокомпонентної шихти з використанням методів фізико-хімічного та математичного моделювання.

**Основні результати досліджень.** У загальному вигляді функціональна структура загального алгоритму ЕС відображає синтез та взаємодію трьох базових моделей (моделі розподілу шихти, фізико-хімічної моделі шихти та моделі «система метал-шлак») [1], спільне використання яких дозволяє:

- вирішити пряме завдання прогнозування складу та властивостей первинних розплавів у різних зонах печі та кінцевих продуктів плавки залежно від шихтових та технологічних умов доменної плавки [2, 3];

- здійснити оцінку технологічної ситуації за контрольованими показниками плавки з урахуванням сформованої системи технологічних обмежень;

- вирішити обернену задачу визначення оптимального складу шихти, що забезпечує досягнення заданої функції мети та задовольняє сформованій системі «статичних» та «динамічних» обмежень з використанням методів векторної оптимізації.

Алгоритм розв'язання оптимізаційної задачі включає такі основні етапи (рис. 1):

1. *Формування вхідної інформації з використанням баз даних*, що включають: компонентний склад завантажувальної шихти (залізовмісні та вуглецевмісні матеріали); витрати та хімічний склад компонентів шихти (агломерату, окатишів, добавок, коксу, золи коксу та пиловугільного палива); технологічні параметри плавки (дутьовий режим, колошниковий газ тощо); конструктивні характеристики печі.



Рисунок 1 - Структурна схема алгоритмічних засобів експертної системи вибору оптимального складу багатокомпонентної доменної шихти.

2. *Формування системи обмежень* на вхідні показники завантажувальної шихти (витрати, хімічний склад) та комплексу технологічних обмежень, що формуються з використанням нормативно-довідкової інформації та вимог до залізорудної сировини, показників процесу та якості продуктів плавки [1].

3. *Розрахунок показників розподілу компонентів шихти за перетином доменної печі*: кількості компонентів та хімічного складу суміші матеріалів у 10 зонах колошника [4].

4. *Розрахунок показників інтегральної шихти*: хімічного складу та інтегральних параметрів – хімічного еквівалента складу шлакоутворюючої складової шихти  $\Delta e$  та показника стехіометрії  $\rho$  [5].

5. *Розрахунок високотемпературних властивостей залізорудних матеріалів*: температур розм'якшення та розплавлення для порцій суміші залізорудних матеріалів у 10 зонах колошника та для завантажувальної подачі [4].

6. *Розрахунок показників первинного шлакового розплаву для порцій суміші залізорудних матеріалів у 10 зонах колошника та для подачі, що завантажуються*: вмісту FeO (%) у первинному розплаві, хімічного складу та інтегральних показників – параметрів  $\Delta e$  та  $\rho$ ; розрахунок властивостей первинного шлаку – температур початку фільтрації та максимальної фільтрації через коксову насадку, температури початку плавлення, в'язкості та поверхневого натягу при температурі 1300 °C; розрахунок температурних інтервалів, що характеризують пластичну зону [4].

7. *Прогнозування хімічного складу чавуну та кінцевого шлаку, комплексу властивостей шлаку*: розрахунок інтегральних показників доменної шихти та температурно-дугтьового режиму та на їх основі прогноз коефіцієнтів розподілу елементів шихти (сірки, кремнію, марганцю, титану, заліза); розрахунок показників хімічного складу та ваги чавуну та кінцевого шлаку на основі коефіцієнтів розподілу елементів; розрахунок технологічних властивостей шлаку – сіркопоглинаючої здатності, в'язкості при температурі на випуску чавуну за моделлю гомогенного розплаву і з урахуванням гетерогенних включень, поверхневого натягу при температурі 1500 °C; ентальпії, температур кристалізації; температури гетерогенізації та ступеню досягнення системи «метал-шлак» рівноваги по сірці [2, 3].

8. *Діагностика (оцінка) технологічної ситуації* за контрольованими показниками процесу з урахуванням заданих технологічних обмежень.

9. *Вибір цільової функції, завдання фізико-хімічних критеріїв оптимізації та генерація критерію оптимальності задачі*.

10. *Розрахунок оптимального складу шихти* за заданої системи обмежень з використанням методів векторної оптимізації.

11. *Експертний аналіз результатів розв'язання задачі оптимізації*.

12. *Розробка рекомендацій щодо вибору складу шихти*.

Завданням оптимізації в технологічній постановці є визначення оптимального складу шихти за заданими її компонентами (витратою та хімічним складом), який забезпечить досягнення необхідних техніко-економічних показників доменної плавки при заданій системі обмежень.

В якості цільових функцій, найчастіше, задаються такі показники: забезпечення максимальної продуктивності доменної печі, мінімізація витрати коксу або (і) собівартості чавуну. В якості обмежень накладаються умови на вхідні (витрати та хімічний склад компонентів шихти) та вихідні показники, а також на показники, що описують процеси доменної плавки (технологічні обмеження).

Сформульована задача належить до класу задач багатокритеріальної умовної нелінійної оптимізації. Особливістю даної задачі є неявне завдання функції мети, оскільки вихідні параметри розраховуються за допомогою методики прогнозування складу та властивостей кінцевих продуктів плавки в залежності від інтегральних показників шихти та технології [2, 3]. Найбільш прийнятним підходом для вирішення задачі багатокритеріальної (векторної) оптимізації в нашому випадку є використання методу багатогранника, що деформується, з урахуванням умови успішності вибору кроку або напрямку. Для оптимізації складу доменної шихти на основі модифікованих симплекс методів (Бокса, Нелдера – Міда) [6] розроблено алгоритм з урахуванням заданих пріоритетів цільових функцій (критеріїв оптимізації) та взаємозв'язку вхідних параметрів для знаходження оптимальних значень у заданій області обмежень [7].

Розроблений алгоритм включає процедуру поетапної оптимізації за вищим пріоритетом, аналіз взаємозв'язку вхідних показників та градієнта впливу на задані функції, внаслідок чого знаходиться прийнятне (за Парето) оптимальне компромісне рішення в заданій області обмежень, включаючи врахування технологічних обмежень щодо використання різних компонентів у складі шихти, докладно описаних у роботі [1].

Алгоритмічні засоби розробленої ЕС дозволяють технологу до формування складу подачі виконати розрахунки за прогнозом складу та властивостей продуктів доменної плавки і вирішувати завдання визначення раціонального складу завантажувальної шихти в умовах поставок і хімічного складу сировини і палива.

Модельний комплекс та алгоритмічні засоби експертної системи були протестовані на прикладі вирішення задачі вибору оптимального складу багатокомпонентної шихти для сучасних умов роботи доменної печі (ДП), що працює з використанням пиловугільного палива (119 кг/т чавуну) та природного газу (55 м<sup>3</sup>/т чавуну). Вхідними параметрами завантажувальної шихти досліджуваної ДП є компоненти подачі (агломерат, окатиші, залізна руда, металодобавка офлюсована сталеплавильна МОС-2, марганцевий концентрат, брикети БЖС-М).

За показниками завантажувальної подачі та параметрами технологічного режиму здійснюється розрахунок коефіцієнтів розподілу елементів шихти між продуктами плавки з використанням інтегральних показників шихти та технології та прогнозуються показники

хімічного складу чавуну, первинного та кінцевого шлаку, включаючи їх властивості [2, 3].

Тестування ЕС здійснено на прикладі вирішення наступних завдань:

1. Визначення раціонального співвідношення агломерату та окатишів у складі доменної шихти.

Зазвичай за наявності декількох видів заліззовмісної сировини в подачі кількість кожного виду сировини встановлюється начальником цеху, виходячи з наявності кожного матеріалу, що надходить до доменного цеху і технологічного режиму роботи доменної печі відповідно до заданого хімічного складу чавуну, що виплавляється.

Завдання оптимізації складу шихти з використанням агломерату та окатишів передбачає два варіанти її вирішення:

- визначення раціонального співвідношення витрат агломерату та окатишів у шихті з позиції забезпечення газопроникності шихти та поліпшення газового потоку за рахунок урахування особливостей їх плавлення та відновлення, що істотно впливають на склад та властивості проміжних та кінцевих продуктів плавки;

- у випадках дефіциту або обмеженого виробництва агломерату необхідно при заданій його витраті визначити допустиму витрату окатишів у подачі з позиції недопущення їх негативного впливу на футерівку шахти та повітряні фурми при позитивному їх впливі на збільшення продуктивності печі.

У такій постановці завдання оптимізації вхідними параметрами є витрати агломератів і окатишів, цільовою функцією - максимум продуктивності печі (вага чавуну) при виконанні технологічних обмежень на вагу подачі, високотемпературні властивості шихти та первинних шлакових розплавів, показники кінцевих розплавів (вміст FeO в первинному шлаку, в'язкість первинного та кінцевого шлаку). Зокрема, для економічного ведення плавки та забезпечення нормального газодинамічного режиму необхідно переміщення пластичної зони на високотемпературні горизонти за рахунок високих температур розм'якшення та плавлення залізородних матеріалів, що забезпечується підвищенням основності, вмісту магnezії в залізородних матеріалах та зменшенням ступеню відновлення.

2. Визначення раціональної витрати добавок у шихту, зокрема, металодобавки офлюсованої сталеплавильної МОС-2, що завантажуються з метою утилізації відходів металургійного виробництва та поліпшення властивостей шихти. Критерій оптимізації при цьому – стабілізація основності шихти і, як наслідок, кінцевого шлаку.

3. Визначення раціональної витрати марганцевого концентрату, що ефективно використовується як промивний матеріал для видалення з горна неплавких мас на основі коксового сміття, графіту, вапна і т.д., з метою зниження коливання теплового стану горна та забезпечення

необхідних властивостей шлаку (в'язкості, температур плавлення, ентальпії), що сприяє збільшенню виробництва чавуну та зниженню витрати коксу.

Особливістю шлакового режиму доменної плавки нині є зниження основності шлаку  $\text{CaO/SiO}_2$  до рівня 1-1,1 од. як дієвого прийому, що компенсує негативний вплив пиловугільного палива на технологію та покращує рухливість шлакових розплавів у коксовій насадці, що містять незгорілі частинки ПВП. При цьому перехід на кислі шлаки може дати значний ефект, якщо забезпечити в них підвищений вміст магnezії (до 8-9 %), що підвищує плинність та десульфуруючу здатність кінцевих шлаків. У зв'язку з цим, одним з актуальних завдань оптимізації складу шихти є раціональне визначення вмісту  $\text{MgO}$  в шихті, зокрема, в агломераті, з позиції забезпечення необхідних властивостей кінцевого шлаку – плавності, в'язкості та поверхневого натягу, сіркопоглинаючої здатності, що забезпечують виплавку чавуну за вмістом сірки.

На рисунку 2 представлений варіант вирішення задачі оптимізації складу шихти для досліджуваної доменної печі. В якості критеріїв оптимізації обрано максимум виробництва чавуну та обмеження на вміст сірки в чавуні, яке для обраних умов доменної плавки має знаходитися в межах 0,03-0,035 %. При цьому були накладені обмеження на основність кінцевого шлаку  $\text{CaO/SiO}_2$  та вміст кремнію в чавуні  $[\text{Si}]$ . Відповідно до ТУ на показники продуктів плавки значення основності шлаку має дорівнювати 1,1 од., а вміст кремнію перебувати на рівні 0,5 %.

В якості ресурсів оптимізації обрано наступні компоненти шихти: вага окатишів у подачі (для збільшення виробництва чавуну), вага МОС-2 (для забезпечення стабілізації основності шихти/шлаку), вага марганцевого концентрату (для забезпечення промивних властивостей шлаку та виведення лугів) та вміст  $\text{MgO}$  в агломераті (для поліпшення рідкорухливості шлаку та його десульфуруючої здатності). На вибрані показники накладено обмеження у вигляді діапазону допустимих значень.

В результаті роботи алгоритму оптимізації знайдено рішення, яке задовольняє цільову функцію в заданій системі обмежень на вхідні показники (вага та хімічний склад компонентів шихти) зазначених ресурсів оптимізації (рис. 2). У таблиці представлені основні параметри задачі вибору оптимального складу шихти для умов роботи доменної печі та їх значення до та після виконання процедури оптимізації. Зокрема, за рахунок збільшення у подачі витрат окатишів з 7,35 до 7,67 т, добавки МОС-2 з 0,34 до 0,94 т, марганцевого концентрату з 0,14 до 0,2 т, а також підвищення вмісту  $\text{MgO}$  в агломераті з 1,49 до 2 % може бути збільшено виробництво чавуну з 13,31 до 14 т, при цьому виконані ТУ за хімічним складом чавуну та шлаку: вміст у чавуні кремнію  $[\text{Si}]=0,51$  % (зменшилося

на 0,04 %), сірки  $[S]=0,035$  % (зменшилося на 0,005 %), марганцю  $[Mn]=0,35$ % (підвищилося на 0,083 %) та значення основності шлаку складо  $CaO/SiO_2=1,1$  од. (майже не змінилося від початкового варіанту завантаження) (рис. 3).

Витрата визначеного в результаті роботи алгоритму оптимізації раціонального значення марганцевого концентрату в подачі разом з виконаними на ДП дослідженнями показали, що технологічні параметри доменної плавки в дослідному періоді не погіршилися. Промивання горна ДП марганцевмісними матеріалами призводить до зменшення лужного навантаження на кокс при постійному надходженні лужних компонентів із шихтою за рахунок властивостей оксидів марганцю. Монооксид марганцю у нижній зоні печі відновлюється з газифікацією вуглецю, що сприяє оновленню коксової насадки та стабілізації нагріву продуктів плавки. При цьому покращилася рухливість і сіркопоглинаюча здатність кінцевих шлаків, про що свідчать збільшення коефіцієнта розподілу сірки, ступеню досягнення рівноваги по сірці і сіркопоглинаючої здатності, раціональне значення в'язкості гомогенного шлаку при температурі 1450 °С (що відповідає температурі шлаків на випуску) 0,3 Па·с та з урахуванням гетерогенних включень на рівні 0,5-0,6 Па·с. Ентальпія шлаків при цьому підвищилася з 1834 до 1858 кДж/кг внаслідок зміни його хімічного складу за рахунок збільшення вмісту магnezії, поверхневий натяг зменшився, внаслідок чого ефективніше пройшли процеси десульфурзації і в цей період зафіксовано зниження вмісту сірки в чавуні.

При пошуку рішення виконувалася перевірка обмежень на вхідні і вихідні показники та й на проміжні розрахункові характеристики процесів плавлення і відновлення. Значення високотемпературних властивостей шихти, розрахованих за скоригованими значеннями витрат матеріалів, свідчать про деяке їх поліпшення.

Зокрема температура розм'якшення залізорудної складової шихти незначно підвищилася за рахунок збільшення її основності та вмісту  $MgO$  при одночасному зниженні температури розплавлення, зменшенні температурного інтервалу плавлення (таблиця), що зумовлює переміщення пластичної зони на нижчі горизонти доменної печі [8]. Додатковим підтвердженням цього є збільшення значень температурних властивостей первинних розплавів, зокрема їх температур початку плавлення, початку фільтрації та максимальної фільтрації на коксовій насадці (табл. 1, рис. 4). Зміст у первинному шлаку  $FeO_{\text{пнн}}$  після оптимізації знизився з 23 до 21 %, вміст  $FeO_{\text{пнн}}$  первинного шлаку, що утворюється в пристінковій зоні доменної печі, також знизився на 1,5 %. В'язкість первинного розплаву при температурі 1300 °С не перевищує 8 пуаз, що також сприяє утворенню сталого гарнісажу в нижній зоні печі (табл. 1, рис. 4).



Вага max

Прогноз

Критерії оптимізації

Розрахунок

Навигування

Вхідні дані завантажувальної шихти

Матеріал	Нижня межа	Верхня межа	Витрата/хім.склад
<input type="checkbox"/> Агломерат	13	20	16.8
<input checked="" type="checkbox"/> Окатиші	6	8.5	7.35
<input type="checkbox"/> Руда	0.12	0.18	0.15
<input checked="" type="checkbox"/> МОС-2	0.27	1.2	0.34
<input checked="" type="checkbox"/> Mn	0.11	0.2	0.14
<input type="checkbox"/> Брикети	0	0	0
<input type="checkbox"/> Зола Пуг	0.14	0.21	0.17
<input type="checkbox"/> SiO <sub>2</sub> (A)	8.28	12.42	10.353
<input type="checkbox"/> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (A)	0.72	1.08	0.9
<input type="checkbox"/> CaO(A)	12.96	19.44	16.2
<input checked="" type="checkbox"/> MgO(A)	1.192	2	1.49
<input type="checkbox"/> МІСОС	0.0608	0.0642	0.076

Показатели процесса

Високотемпературні властивості	
Температури	
початку розм'якш. Т <sub>роз</sub>	1028
розплавлення Т <sub>розл</sub>	1327
ΔT <sub>1</sub> = Т <sub>розл</sub> -Т <sub>роз</sub>	300
початку фільтр. Т <sub>ф</sub>	1363
максимал. фільтр. Т <sub>мф</sub>	1497
ΔT <sub>2</sub> = Т <sub>мф</sub> -Т <sub>ф</sub>	134
FeO <sub>пл.</sub> у прист. зоні	19.26
LSI	0,94719
LMn	0,29982
LS	0,95475
LFe	0,00198
TotalFe	53,03
TotalFe <sub>2...</sub>	66,517
Рудне навант.	4,156
De	-2,563
Ro	0,7142

Прогноз

Критерії оптимізації

Функція	Ліва межа	Права межа	Початкове значення	Пріоритет
<input type="checkbox"/> De	-2,563		-2,537	
<input type="checkbox"/> Ro	0,714		0,709	
<input type="checkbox"/> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO	1,178		1,178	
<input checked="" type="checkbox"/> CaO/SiO <sub>2</sub>	1,1		1,088	1
<input type="checkbox"/> (CaO+MgO)...	1,216		1,216	
<input checked="" type="checkbox"/> S	0,035		0,0392	2
<input checked="" type="checkbox"/> Si	0,5		0,5465	6
<input checked="" type="checkbox"/> Вага чавуну	14		13,316	0

Показники продуктів плавки

Показник	Значення
FeO <sub>пл</sub>	21,33
Вязь-ль 1300 С (MgO)	0,557
LS	6,35
LS	43
Cs	17,44
Вязь-ль гетер.	0,53
Пов'язат 1500 С	394,02
Вязь-ль 1500 С	0,215
Ентальпія 1500 С	1930

Результати оптимізації

Матеріал	Значення
Окатиші	7,67
МОС-2	0,94
Mn	0,2
MgO(A)	2
Вага чавуну, т	14,03
Si	0,51
S	0,035
CaO+MgO	1,23
CaO/SiO <sub>2</sub>	1,103
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO	0,98

Рисунок 2 - Варіант розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації багатокomпонентного складу доменної шихти для конкретних умов роботи доменної печі.

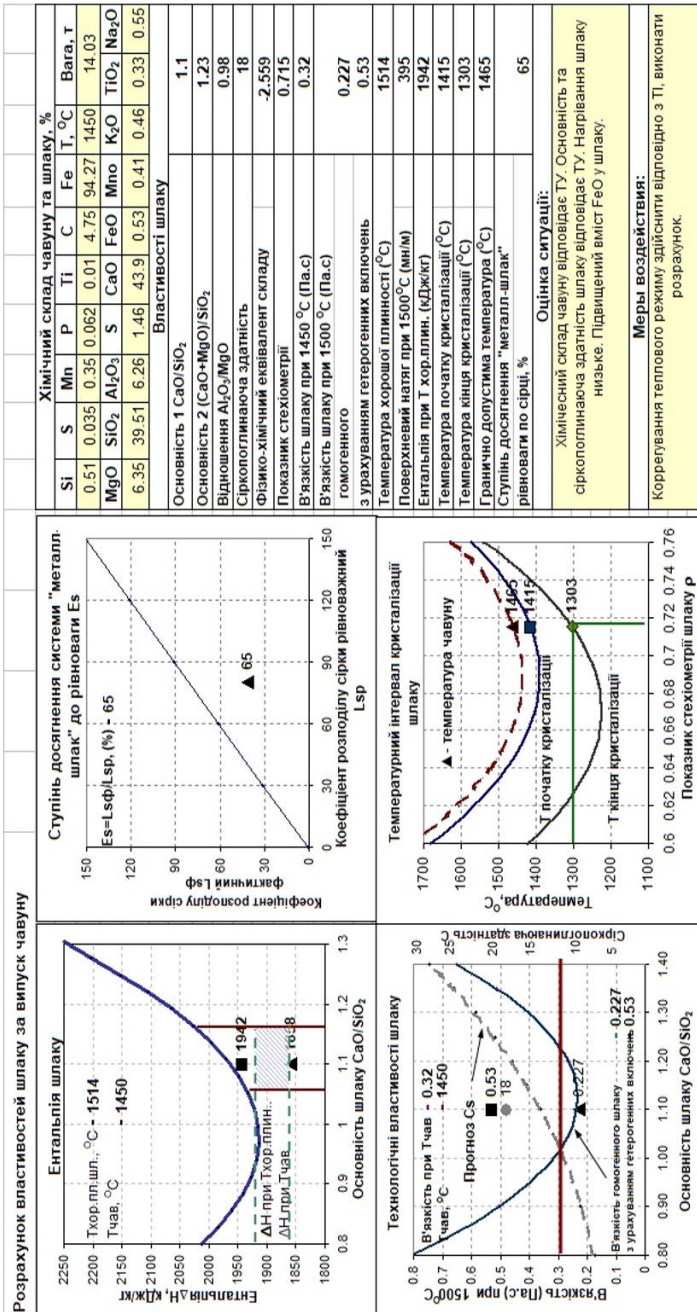


Рисунок 3 - Оцінка технологічної ситуації щодо комплексу властивостей кінцевих шлаків після процедури оптимізації складу багатоконпонентної доменної шихти для конкретних умов доменної плавки.

Таблиця 1 – Значення основних параметрів задачі вибору оптимального складу шихти до та після виконання процедури оптимізації для конкретних умов роботи доменної печі.

Показники шихти	До	Після	Продукти плавки	До	Після
Вага у подачі, т	оптимізації		Чавун	оптимізації	
Агломерат	16,80	16,80	Вихід з подачі (виробництво), т	13,31	14,03
Окатиші	7,35	7,67	Вміст Si, %	0,55	0,51
МОС - 2	0,342	0,940	Mn, %	0,267	0,35
Руда	0,131	0,131	S, %	0,039	0,035
Марганцевий концентрат	0,135	0,200	Кінцевий шлак		
Вміст в агломераті MgO, %	1,49	2,00	Основність CaO/SiO <sub>2</sub>	1,09	1,11
Частка окатишів, %	30,43	31,34	(CaO+MgO)/SiO <sub>2</sub>	1,21	1,23
Вміст Fe <sub>заг</sub> , %	53,44	53,03	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO	1,29	0,98
Основність CaO/SiO <sub>2</sub>	1,16	1,18	Вміст (MgO) у шлаку, %	5,05	6,35
Відношення Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /MgO	0,62	0,49	Хімічний еквівалент складу Δe	-	-
Показники процесу			Показник стехіометрії ρ	0,71	0,715
Т початку розм'якшення шихти T <sub>пр800</sub> , °C	1024	1028	Коефіцієнт розподілу сірки L <sub>sf</sub>	39	43
Т розплавлення T <sub>розп800</sub> , °C	1329	1327	Ступінь досягнення рівноваги по сірці, %	57	65
ΔT <sub>1</sub> = T <sub>розп800</sub> - T <sub>пр800</sub> , °C	305	300	Сіркопоглинаюча здатність	15	18
Вміст в первинному шлаку FeO <sub>пш</sub> , %	22,96	21,33	В'язкість шлаку при 1450 °C, Па·с	0,32	0,32
В пристінковій зоні ДП FeO <sub>пш</sub> , %	20,65	19,26	В'язкість з урахуванням гетерогенних включень, Па·с	0,59	0,53
В'язкість первинного шлаку при 1300 °C, Па·с	0,52	0,56	Поверхневий натяг при 1500 °C, мН/м	398	395
Температура початку плавлення перв. шлаку, °C	1169	1187	Ентальпія при 1450 °C, кДж/кг	1834	1858
Температура початку фільтрації T <sub>пф</sub> , °C	1356	1363	Температура солідус, °C	1287	1303
Температура максимальної фільтрації T <sub>мф</sub> , °C	1494	1497	Температура ліквідус, °C	1406	1415
ΔT <sub>2</sub> = T <sub>мф</sub> - T <sub>пф</sub> , °C	138	134			

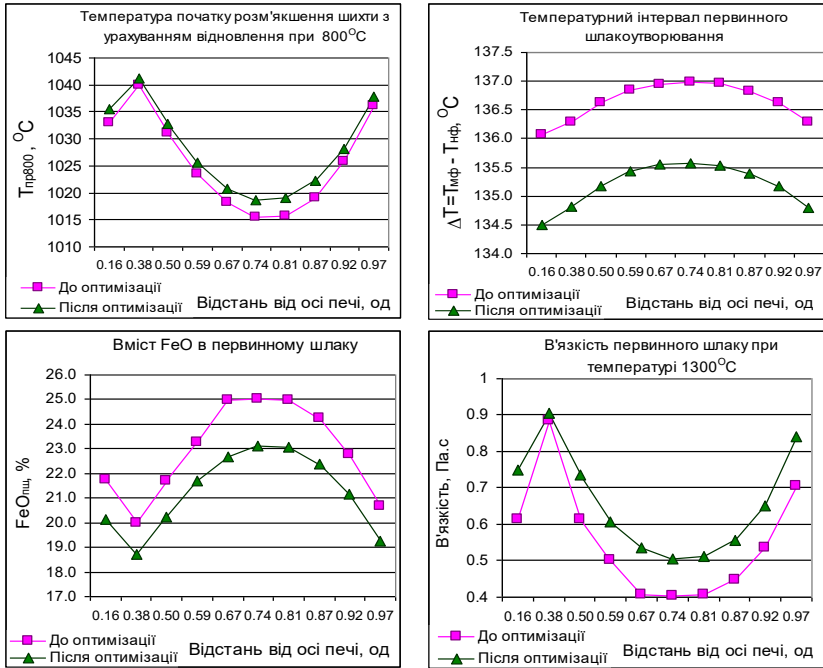


Рисунок 4 – Високотемпературні властивості доменної шихти та первинного шлаку, розраховані по характеристикам завантажувальної подачі до та після коригування її складу в результаті вирішення задачі оптимізації складу шихти для конкретних умов роботи доменної печі.

Таким чином, показники властивостей первинних і кінцевих розплавів, що утворюються з оптимально сформованої шихти, задовольняють усім технологічним обмеженням, що забезпечують нормальне перебіг процесів відновлення та плавлення, необхідний тепловий стан печі, раціональні газодинамічний та шлаковий режими.

### Висновки

Наведено головні складові алгоритмічних засобів експертної системи вибору оптимального складу багатокomпонентної шихти, що забезпечує необхідні показники плавки за рахунок спрямованого формування розплавів в умовах розширення компонентного складу шихти та зміни її металургійних властивостей. Теоретичну основу розробленої системи становлять методики опису закономірностей фізико-хімічних перетворень залізовмісних матеріалів з урахуванням розподілу компонентів у дискретних зонах доменної печі та моделювання процесів утворення і

взаємодії металевої і шлакової фаз з використанням інтегральних параметрів на рівні міжатомної взаємодії компонентів в розплавах.

Особливостями розробленого алгоритму є контроль та аналіз прогнозних властивостей не тільки кінцевих продуктів плавки, а й властивостей проміжних розплавів з обов'язковою перевіркою відповідності їх технологічним обмеженням, які генеруються на основі вимог до фізико-хімічних процесів у печі та властивостей залізородної сировини і формованих з них розплавів. Введення в алгоритм вирішення оптимізаційної задачі системи науково обґрунтованих технологічних обмежень зумовлює практичну реальність та ефективність вироблених рекомендацій щодо коригування складу завантажувальної подачі.

Результати тестування ЕС з використанням даних роботи (технологічних параметрів) конкретної доменної печі показали, що розроблені алгоритмічні засоби експертної системи вибору оптимального складу багатоконпонентної шихти, що включають широкий комплекс фізико-хімічних і математичних моделей, критеріїв і методів, дозволяють прогнозувати і оцінювати до завантаження шихти в піч показники формування розплавів із різних залізородних матеріалів та на їх основі формувати науково обґрунтовані рекомендації щодо компонентного складу шихти з урахуванням наявних сировинних та енергетичних ресурсів.

#### **Перелік посилань**

1. Murav'eva I. G., Togobitskaya D. N., Ivancha N. G., Bel'kova A. I., Nesterov A. S. Concept development of an expert system for selecting the optimal composition of a multicomponent blast furnace charge and functional and algorithmic structure. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. No 1. P. 33-38.
2. Murav'eva I. G., Togobitskaya D. N., Bel'kova A. I., Ivancha N. G., Nesterov A. S. Prediction of Composition and Properties of Final Smelting Products Based on Integral Indices of the Blast Furnace Burden and Temperature Blasting Mode. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. No 8. P. 531-537.
3. Выбор состава доменной шихты, обеспечивающего направленное формирование жидких продуктов доменной плавки. / Д.Н. Тогобицкая, А. И. Белькова, Д. А. Степаненко и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 3. С. 11-18.
4. Murav'eva I. G., Togobitskaya D. N., Bel'kova A. I., Ivancha N. G., Nesterov A. S. Predictive-analytical evaluation of high temperature properties of iron-ore materials with respect to their distribution in the blast furnace zones. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. No 3. P. 195-200.
5. Приходько Э. В., Тогобицкая Д. Н., Хамхотько А. Ф., Степаненко Д. А. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем. Днепропетровск : Пороги, 2013. 339 с.
6. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. М. : Радио и связь, 1988. 128 с.
7. Тогобицкая Д. Н., Белькова А. И., Лихачев Ю. М., Ходотова Н. Е.

Многокритеріальна оптимізація доменної шихты. Матеріали III Всеукраїнської НТК «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем. Дніпро, 2017. С. 161-164.

8. Об эффективности использования в доменной плавке различных железорудных материалов. / Г. А. Воловик, Н. А. Гладков, В. Х. Кацман и др. *Сталь*. 1982. № 11. С. 7-10.

### References

1. Murav'eva I. G., Togobitskaya D. N., Ivancha N. G., Bel'kova A. I., Nesterov A. S. Concept development of an expert system for selecting the optimal composition of a multicomponent blast furnace charge and functional and algorithmic structure. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. No 1. P. 33-38.
2. Murav'eva I. G., Togobitskaya D. N., Bel'kova A. I., Ivancha N. G., Nesterov A. S. Prediction of Composition and Properties of Final Smelting Products Based on Integral Indices of the Blast Furnace Burden and Temperature Blasting Mode. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. No 8. P. 531-537.
3. Vybora sostava domennoy shikhty, obespechivayushchego napravlennoye formirovaniye zhidkogo produkta domennoy plavki / D. N. Togobitskaya, A. I. Bel'kova, D. A. Stepanenko et al // *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*. 2016. No 3. P. 11-18.
4. Murav'eva I. G., Togobitskaya D. N., Bel'kova A. I., Ivancha N. G., Nesterov A. S. Predictive-analytical evaluation of high temperature properties of iron-ore materials with respect to their distribution in the blast furnace zones. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51. No 3. P. 195-200.
5. Prikhod'ko E. V., Togobitskaya D. N., Khamkhot'ko A. F., Stepanenko D. A. Prognozirovaniye fiziko-khimicheskikh svoystv oksidnykh sistem. Dnepropetrovsk: Porogi, 2013. 339 p.
6. Bandy B. Sposoby optimizatsii. Vvodnyy kurs. Moskva: Radio i svyaz, 1988. 128 p.
7. Togobitskaya D. N., Bel'kova A. I., Likhachev Yu. M., Khodotova N. E. Mnogokriterial'naya optimizatsiya domennoy shikhty. *Materialy III Vseukrainskoy NTK "Komp'yuternoye modelirovaniye i optimizatsiya slozhnykh sistem"*. Dnepr, 2017. P. 161-164.
8. Ob effektivnosti ispol'zovaniya v domennoy plavke razlichnykh zhelezorudnykh materialov / G. A. Volovik, N. A. Gladkov, V. Kh. Katsman et al // *Stal'*. 1982. No 11. P. 7-10.

**D. M. Togobitskaya**, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0001-6413-4823

**A. I. Belkova**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-8519-9351

**I. H. Muravyova**, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5926-7787

**M. H. Ivancha**, Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5366-9328

**D. O. Stepanenko**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-5913-2284

**O. S. Nesterov**, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-0183-0327

**Y. M. Likhachov**, Researcher, ORCID 0000-0003-3168-7813

*Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

## DEVELOPMENT AND TESTING OF ALGORITHMIC SUPPORT OF THE EXPERT SYSTEM FOR SELECTING THE OPTIMAL COMPOSITION OF MULTICOMPONENT BLAST FURNACE CHARGE IN SPECIFIC CONDITIONS OF BLAST FURNACE OPERATION

**Summary.** The aim of the work is to develop and test for specific conditions of the blast furnace algorithmic means of the Expert system for selecting the optimal composition of the multicomponent charge, which provides the necessary technical and economic indicators of melting in variable raw material and energy conditions. The features of algorithmic means of the system for selecting the optimal composition of blast furnace charge, which are developed using methods of physicochemical and mathematical modeling of the processes of distribution and melting of iron ore materials in different zones of the furnace for the development of scientifically based recommendations for adjusting the composition of the charge, taking into account the available raw materials and energy resources. The system implements a set of physicochemical models and criteria for describing the processes of distribution of iron ore materials along the blast furnace radius, their phase transformations in high-temperature zones and directed formation of melts, which are regulated by a system of reasonable technological constraints. The information basis for the creation of predictive models for calculating the physical and chemical properties of metallurgical melts is the information accumulated in the databases "Iron ore materials", "Slag" and "Metal-slag" created in the Institute of Ferrous Metallurgy of the integrated Knowledge Base "Metallurgy". The solution of the optimization problem is carried out on the basis of expert evaluation of the forecasting of melting indicators and calculation of the optimal composition of the charge using vector optimization methods by finding a compromise between the accepted optimality criteria and technological constraints. The Expert system has been tested and recommendations on the component composition of blast charge for specific blast furnace operating conditions have been developed.

**Key words:** blast furnace charge, iron ore materials, properties of melts, technological constraints, expert system, optimality criteria, optimization of charge composition.

**For citation:** Rozrobka ta vyprovuvannya alhorytmichnoho zabezpechennia ekspertnoi systemy vyboru optymalnoho skladu bahatokomponentnoi domennoi shykhty u konkretnykh umovakh roboty domennykh pechei [Development and testing of algorithmic support of the expert system for selecting the optimal composition of multicomponent blast furnace charge in specific conditions of blast furnace operation] / D. M. Togobitskaya, A. I. Belkova, I. H. Muravyova, M. H. Ivancha, D. O. Stepanenko, O. S. Nesterov, Y. M. Likhachov // *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 67-81. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-67-81.

*Стаття надійшла до редакції збірника 24.10.2022 р.  
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*