
ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, МЕХАНІЗАЦІЇ ТА КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЇ ПРОЦЕСІВ ЛИТТЯ

<https://doi.org/10.15407/plit2023.04.044>

УДК 621.74.669.13.017

К.А. Сіренко*, мол. наук. співроб.; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com; ORCID 0000-0003-2613-8094

Д.О. Дереча**, канд. ф.-м. наук, старш. наук. співроб. зав. лабор.; e-mail: dderecha@gmail.com; ORCID 0000-0002-2442-3759

В.Л. Мазур*, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., гол. наук. співроб.; e-mail: prof.vlm@ukr.net; ORCID 0000-0001-8970-5389

* Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України (Київ, Україна)

** Інститут магнетизму НАН України та МОН України (Київ, Україна)

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ МОНТЕ-КАРЛО В РОЗРАХУНКАХ ШИХТИ Й РЕГУЛЮВАННІ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ В ПРОЦЕСІ ЙОГО ВИПЛАВЛЕННЯ

Застосування сучасних методик математичного моделювання технології ливарного виробництва і нинішніх комп'ютерних можливостей дозволяє вивести методологію визначення шихти й регулювання хімічного складу розплаву безпосередньо в процесі плавки металів на якісно новий науково-технічний рівень. Проаналізовано різні підходи до розрахунку шихти для виплавлення чавуну та сталі та методи коригування відсоткового вмісту хімічних елементів у складі розплаву сплавів безпосередньо при їх виплавленні. Розглянуто переваги й недоліки найпоширеніших методик розрахунку шихти. Надано оцінку способів оптимізації складу шихти для виплавлення в індукційних печах чавуну, призначеного для виготовлення ливарних виробів відповідального призначення. Наведено приклади вирішення задачі розрахунку та оптимізації шихти за умови, що за економічний критерій ефективності розрахованого складу шихти взято сумарну вартість компонентів шихти і мінімізовано цей критерій. При вирішенні вказаної задачі найчастіше використовують симплекс-метод лінійного програмування. Показано, що однією з головних проблем при вирішенні таких задач є невизначений хімічний склад шихтових матеріалів. Зазначене стосується передусім металобрухту та феросплавів. Відомі методи й комп'ютерні програми, розроблені для моделювання процедури вибору шихти та регулювання хімічного складу розплаву чавуну чи сталі, більшості випадків не враховують нестабільності хімічного складу шихтових матеріалів. Перспективним напрямом розвитку методології визначення шихти та коригування розплаву є використання підходів, що враховують імовірнісний характер розглядуваної задачі та нестабільність компонентів шихти. Обґрунтовано застосування методу Монте-Карло при розрахунках шихти й коригуванні складу розплаву з метою врахування ймовірнісних оцінок вихідних даних щодо діапазонів розкиду величин вмісту хімічних елементів у матеріалах, із яких формується шихта та інгредієнти, що коригують розплав. Представлено алгоритм і комп'ютерну програму для реалізації такої ідеології при вирішенні поставленої задачі.

Ключові слова: ливарне виробництво, чавун, сталь, шихта, хімічний склад, розрахунки, коригування, алгоритм, програма.

Однією з актуальних задач теорії й технології ливарного виробництва на нинішньому етапі його розвитку є вдосконалення методології розрахунку шихти та коригування хімічного складу чавуну безпосередньо в процесі його виплавлення. Вирішення цієї задачі дає можливість підвищити якість ливарної продукції, зменшити енергоспоживання на її виготовлення і собівартість у цілому. Розвиток комп'ютерних технологій та оснащення ливарних підприємств забезпечує можливість використання сучасних досягнень у цій сфері для переведення методології контролю й регулювання процесів виплавлення чавуну та виготовлення з нього литва на наступний, вищий науково-технічний рівень [1–15 та ін.]. Зазначене стосується математичних моделей розрахунку складу шихти й методик коригування хімічного складу розплавів чавуну, сталей, кольорових металів безпосередньо в процесі плавки. У технологічному плані нові можливості з'являються у зв'язку з розширенням використання для виробництва чавуну електричних індукційних печей взамін вагранок.

Роботи [1–16 та ін.], присвячені задачі розрахунку шихти для виплавлення чавуну, сталі та ін. сплавів, припускають багатоваріантні рішення. Найкраще рішення з можливих має відповідати попередньо вибраному критерію оптимальності, за який у більшості опублікованих праць приймають мінімальну вартість шихти, а задачу оптимізації її складу вирішують методами лінійного програмування.

Викладена в книзі А.В. Курдюмова і Е.Б. Тена [1] методика вирішення задачі оптимізації складу шихти із застосуванням методу лінійного програмування стала посібником для фахівців, які спеціалізуються на ливарному виробництві. Аналогічні та розвинені далі підходи й шляхи розв'язання цієї проблеми представлені також у роботах [2, 5–8, 10–24 та ін.].

Автори [1, с. 37–50; 5–7 та ін.] детально проаналізували переваги й недоліки методів: аналітичного, графічних і графоаналітичних, підбору, послідовного коригування шихти. Відзначено, що аналітичний метод розрахунку пропонує лише одне рішення з багатьох можливих і припустимих. Недолік графічного та графоаналітичного методів полягає також у складності визначення шихти при відносно великій кількості хімічних елементів, які мають бути у складі готового сплаву і компонентах шихти [9–10 та ін.]. У праці [1, с. 44–45] при розгляді недоліків графічного й графоаналітичного методів зазначено, що вони є відносно складними для реалізації при кількості більше двох-трьох елементів, що розраховуються. З огляду на це вказані методи мають обмежене застосування [9].

Аналітичний та інші методи розрахунку шихти зорієнтовані на забезпечення однозначних конкретних величин вмісту кожного контрольованого хімічного елемента в складі чавуну, сталі чи інших сплавів, які виплавляються. У книзі [5, с. 302] та статті [20] підкреслюється, що при «традиційному» методі розрахунку шихти для визначення кількості шихтових матеріалів зазвичай знаходять середні значення вмісту кожного хімічного елемента, що входять до складу кінцевого сплаву, складають систему лінійних рівнянь і потім її розв'язують за одним із відомих математичних алгоритмів. Але стандарти на ливарну продукцію передбачають і регламентують діапазони відсоткового вмісту елементів у готовому сплаві, зокрема в чавуні. У праці [25 та ін.] показано, що інтервали розкиду величин відсоткового вмісту хімічних елементів у складі чавуну різних партій-плавів є суттєвими і певною мірою залежить від складу шихти. Тому, як зазначено в [1, с. 38], тільки одне рішення з більшості можливих, що його видають аналітичний чи інші методи при визначенні складу шихти, є їхнім недоліком.

Прийнято вважати, що недоліком розрахунку шихти методом підбору є відсутність чітких принципів вибору базового складу шихти, який зазвичай приймають на підставі практичного досвіду ливарного підприємства. Проте він максимально наближений до виробничої практики і користується довірою персоналу ливарних підприємств завдяки простоті та надійності [5, 6, 9 та ін.]. Таким чином, підхід до вибору орієнтовного складу шихти на базі наявного виробничого досвіду при математичному моделюванні ливарних процесів є позитивним фактором.

Додатково відзначимо, що, на думку С.Г. Пелиха і М.П. Семесенка [7, с. 166], загальний недолік аналітичного, графічного і методу підбору складу шихти полягає в тому, що вони не передбачають оптимізації її складу з позиції мінімальних витрат.

У роботах [1, с. 43–50; 5–8, 10] та багатьох інших публікаціях метод оптимізації складу шихти розглянуто як задачу лінійного програмування. До того ж функцію, екстремум якої шукають, вважають цільовою, а систему лінійних і нелінійних рівнянь та нерівностей — обмеженнями. Автори [1] зауважують, що в розрахунках шихти можлива оптимізація різних показників технологічного процесу виплавлення сплавів. Наприклад, за критерій оптимальності можуть бути прийняті максимальна ймовірність досягнення заданих механічних властивостей чавуну або мінімальна вартість деталі, виготовленої з виливка [6, с. 26]. Однак найчастіше за цільову функцію приймають мінімум витрат на шихту. Цей критерій оптимізації передбачає пошук мінімуму функціоналу [2, с. 129; 5, с. 302]:

$$Z_{\min} = \sum_{j=1}^n x_j C_j,$$

де C_j — ціна j -го компонента шихти; x_j — вміст компонента в шихті. При обмеженнях щодо мінімального та максимального вмісту компонентів [10].

У роботі [13], наприклад, зазначено, що при виплавленні сталей різного сортаменту в ДСП-100 оптимальний варіант шихти вибирають за двома критеріями — вартість металошихти і легуючих добавок та швидке й економічне розплавлення завантаженої у піч шихти. У роботі [20] рекомендовано як цільову функцію використовувати вартість плавки, щоб отримати сплав найменшої вартості.

Симплексний метод лінійного програмування може забезпечувати вирішення задачі пошуку екстремуму цільової функції, представленої у вигляді вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності чавуну або іншого показника його якості [6, с. 26].

У статті [10] В.Ю. Селіверстова подано інформацію щодо розробленого програмного модуля, який реалізує розв'язання задачі лінійного програмування про підбір шихти з використанням симплекс-методу. За критерій оптимізації обрано економічний критерій вартості шихти, а саме мінімізація витрат на шихту.

Алгоритми, що дозволяють моделювати різні стадії процесу виплавлення корозійностійких сталей, представлені в роботі [15]. Розрахунок шихти виконують також методом лінійного програмування (симплекс-методом). При наявності шихтових матеріалів та їхній вартості розраховують шихту, яка при мінімальній вартості забезпечує заданий хімічний склад виплавленої сталі. Автори статті підкреслюють, що ймовірнісний характер плавки потребує розгляду можливих відхилень протікання процесу від прогнозованого. Перевага цієї роботи полягає в намаганні враховувати фізико-хімічні особливості виплавлення сталей зі складним набором хімічних елементів.

На особливу увагу заслуговують праці О.І. Пономаренко та С.Г. Пелиха з колегами [1, с. 11 та 2, с. 127–136], де чітко сформульовано основні етапи розрахунку оптимального складу шихти, що розглядається з позицій системного підходу з урахуванням не тільки особливостей математичної постановки та розв'язання даної задачі, а і з акцентом на технологічних нюансах виплавлення сплавів. Розрахунки оптимального складу шихти виконують модифікованим симплекс-методом лінійного програмування [1–2, 5–11]. У наукових працях [2–3] наголошено на доцільності використання при моделюванні ливарних технологічних систем імітаційно-ймовірнісних підходів та методик для більш повного відображення можливостей виробничих процесів і посилення їхньої ефективності.

Важливо також враховувати при виборі шихти діапазони заданого хімічного складу готового чавуну. У роботі [2, с. 132] за нижній рівень вмісту елементів прийнято середні значення дозволених інтервалів. В умовах, коли методика розрахунку шихти не передбачає визначення діапазонів відсоткового вмісту кожного хімічного елемента в складі чавуну, запропоноване рішення є ефективним.

Варто відзначити, що публікації [6–7] результатів досліджень стосовно використання ЕВМ і математичного моделювання технологічних процесів для підвищення ефективності ливарного виробництва були одними з перших у вітчизняній технічній літературі. Важливо підкреслити, що увага інженерно-технічних фахівців акцентована на необхідності застосування ймовірно-статистичних підходів у практиці ливарного виробництва та прогнозуванні параметрів оптимальної шихти. Основна складність у вирішенні цієї задачі зумовлена невизначеністю хімічного складу більшості компонентів шихти; особливо значні коливання вмісту хімічних елементів спостерігаються у металобрухті [6, с. 51]. Зокрема, вміст кремнію у шихтових матеріалах різних партій може різнитися у 2–3 рази. В останні роки проблема забезпечення ливарних підприємств якісним металобрухтом навіть загострилася [26]. Більш-менш стабільною величиною у складі шихти для виплавлення чавуну є вміст звороту власного виробництва ливарного заводу, оскільки кількість звороту на підприємстві залежить від способу лиття, сортаменту продукції, що її виготовляють, ливникової системи тощо. При масовому виплавленні чавуну однієї марки частка звороту власного виробництва у шихті складає приблизно (25...30) % у складі шихти [5, с. 355]. Також з позиції теорії випадкових процесів потрібно розглядати й величини угару елементів [7, с. 68–79].

Зазвичай комп'ютерні програми, призначені для розрахунку шихти, використовують і для коригування вмісту хімічних елементів у розплаві [15 та ін.]. Методологія визначення маси коригуючих добавок для внесення у розплав чавуну за даними результату експрес-аналізу відібраної проби, яка передбачає застосування ймовірного підходу й методу Монте-Карло, представлена в нашій роботі [27]. Необхідність прискорення впровадження на практиці розрахунку шихти за допомогою методик, які побудовані на підходах, що застосовують ймовірнісні моделі, актуалізується [28–29].

У роботі [3, 158–166] засвідчено, що оскільки вміст компонентів шихти, їх угар або пригар у процесі плавки чавуну чи інших сплавів є величинами випадковими, то для врахування ймовірного характеру їх розподілу необхідно використовувати ймовірнісні моделі та методи у вирішенні задачі вибору оптимального складу шихти. Методи лінійного програмування, які нині широко використовують у цій сфері, не враховують випадкового характеру величин, що розраховуються. Для усунення цього недоліку в дисертації [3] розроблено та зреалізовано спеціальний ітераційний алгоритм на основі моделі стохастичного програмування з ймовірнісними обмеженнями. За критерій оптимізації прийнято, як і в більшості робіт, мінімальну вартість шихти. Але як ймовірнісні обмеження — умови забезпечення вмісту хімічних елементів сплаву, що виплавляють, із заздалегідь заданими ймовірностями. На час опублікування це рішення являло собою принципово новий підхід до задачі вибору шихти для виплавлення різних сплавів. Актуальним залишається застосування ймовірнісних методів у вирішенні задач, пов'язаних із підвищенням точності розрахунків складу шихти завдяки врахуванню випадкового характеру її параметрів, також імітаційно-ймовірнісні підходи та моделі щодо вирішення інших задач ливарного виробництва [30].

Таким чином, аналіз технічної літератури приводить до висновку: відомі методи визначення складу шихти мають суттєвий недолік, який полягає в тому, що вони переважно орієнтуються на забезпечення однієї конкретної величини відсоткового вмісту хімічних елементів у складі сплаву. Найчастіше це середні величини вмісту елементів із діапазонів, регламентованих у стандарті на продукцію, яку виготовляють [5, с. 302]. У відомих методиках не враховують нестабільності хімічного складу компонентів шихти та нестабільності вмісту хімічних елементів у складі готового сплаву. У зв'язку з цим не виключені випадки, коли розраховані «в середньому» величини відсоткового вмісту елементів потрапляють у інтервали їхнього вмісту, визначені у стандартах чи технічних умовах на вироби, а діапазони розкиду цих величин виходять за межі інтервалів.

Отже, задача визначення маси компонентів шихти чи матеріалів, що вносяться до розплаву при коригуванні його хімічного складу, полягає у визначенні їх оптимальної комбінації, при тому що у виплавленому сплаві кожен елемент має перебувати в межах діапазону, регламентованому у стандарті, а вміст домішок не повинен перевищувати задані межі. До цих змінних треба віднести також показники (величини) угару чи пригару хімічних елементів у складі розплаву, які залежать як від типу матеріалу, так і технології плавки. Тобто вирішення потребує така задача: мінімізувати $f(x)$ за умови $x \in K$. По-іншому вона може бути сформульована так: знайти в множині K такий елемент x' , щоб для всіх x із K виконувалась умова $f(x') \leq f(x)$.

На основі підходу, запропонованого в роботах [27–29], ми розробили комп'ютерну програму, яка моделює процедуру коригування (регулювання) хімічного складу розплаву чавуну, що враховує нестабільність хімічного складу матеріалів, компонентів шихти, зокрема феросплавів, які використовуються для корекції розплаву. Програму написано мовою програмування C++ (компілятор фірми Borland [31]). Апробація роботи алгоритму проводилась мовою програмування Python [32].

Структурно програма складається з головного вікна (рис. 1), конфігураційних файлів програми та файлів, що включають параметри компонентів шихти. Головне вікно програми містить усі інструменти, необхідні для проведення розрахунків. Визначальними вхідними даними, що задаються вручну оператором для початку роботи програми, є: хімічний склад чавуну; вміст елементів у складі модифікатора матеріалу, який використовують для коригування складу розплаву в печі; початкова маса заправки печі; хімічний склад розплаву за результатами заміру у відібраній із розплаву пробі; точка прицілювання щодо відсоткового вмісту елемента, який коригується; кількість статистичних випробувань методом Монте-Карло при моделюванні процедури коригування хімічного складу розплаву; точність розрахунків.

Програма працює в інтерактивному режимі. Робота з програмою зводиться до виконання користувачем певних дій за розробленим алгоритмом (рис 2).

На початку роботи програми користувач вводить у вікно (рис. 1) дані, необхідні для розрахунків, а саме: хімічний склад чавуну згідно з вимогами ДСТУ; вміст елементів у складі модифікаторів; початкову масу заправки печі; прийняту кількість статистичних випробувань методом Монте-Карло; хімічний склад розплаву, визначений за результатами аналізу відібраної з розплаву проби металу, тощо (рис. 2, блок 1).

Внесення хімічного складу чавуну та модифікатора здійснюється за допомогою спеціально сформованих файлів, уміщених у базі даних, що мають модифіковану структуру csv [33]. Одним із таких, є файл під назвою «alloy.dat» який містить дані щодо хімічного складу сплаву, який виплавляється: початкову масу завантаження печі та задану точність розрахунків (наприклад, 0,01), яка буде визначати кількість ітерацій; скорочені та повні назви хімічних елементів у складі сплаву, %, їхні мінімальні та максимальні величини. Другим конфігураційним файлом є «modifier.dat», що містить значення діапазонів варіювання відсоткового вмісту елементів у модифікаторі та величини угару елемента в процесі плавки (у алгоритмі на рис. 2 це блок 1). За допомогою таких файлів створюються бази даних модифікаторів, металобрухту, феросплавів, що наявні на підприємстві. Зазначимо, що в програму закладено можливість використовувати діапазони вмісту хімічних елементів та величини їх угару.

Після внесення даних у вікно робочої програми та порівняння вмісту хімічних елементів у розплав за даними хімічного аналізу проби, відібраної з розплаву, і відповідними вимогами нормативних документів (стандартів, технічних умов) автоматично або оператором (рис. 2, блок 4) обираються елементи, які потребують коригування шляхом введення у розплав відповідних модифікаторів (рис. 2, блок 5). Кожному такому елементу присвоюється певний «коефіцієнт вагомості». Це детально описано в нашій роботі [27].

Маса добавки, яка вноситься в розплав для корекції його хімічного складу в першому приближенні, приймається, наприклад, за середніми значеннями діапазонів вмісту хімічних елементів, зазначених у нормативному документі (стандарті) на чавун, що виплавляється. Аналогічно приймаються в першому наближенні орієнтовні величини вмісту елементів у складі модифікатора та угару.

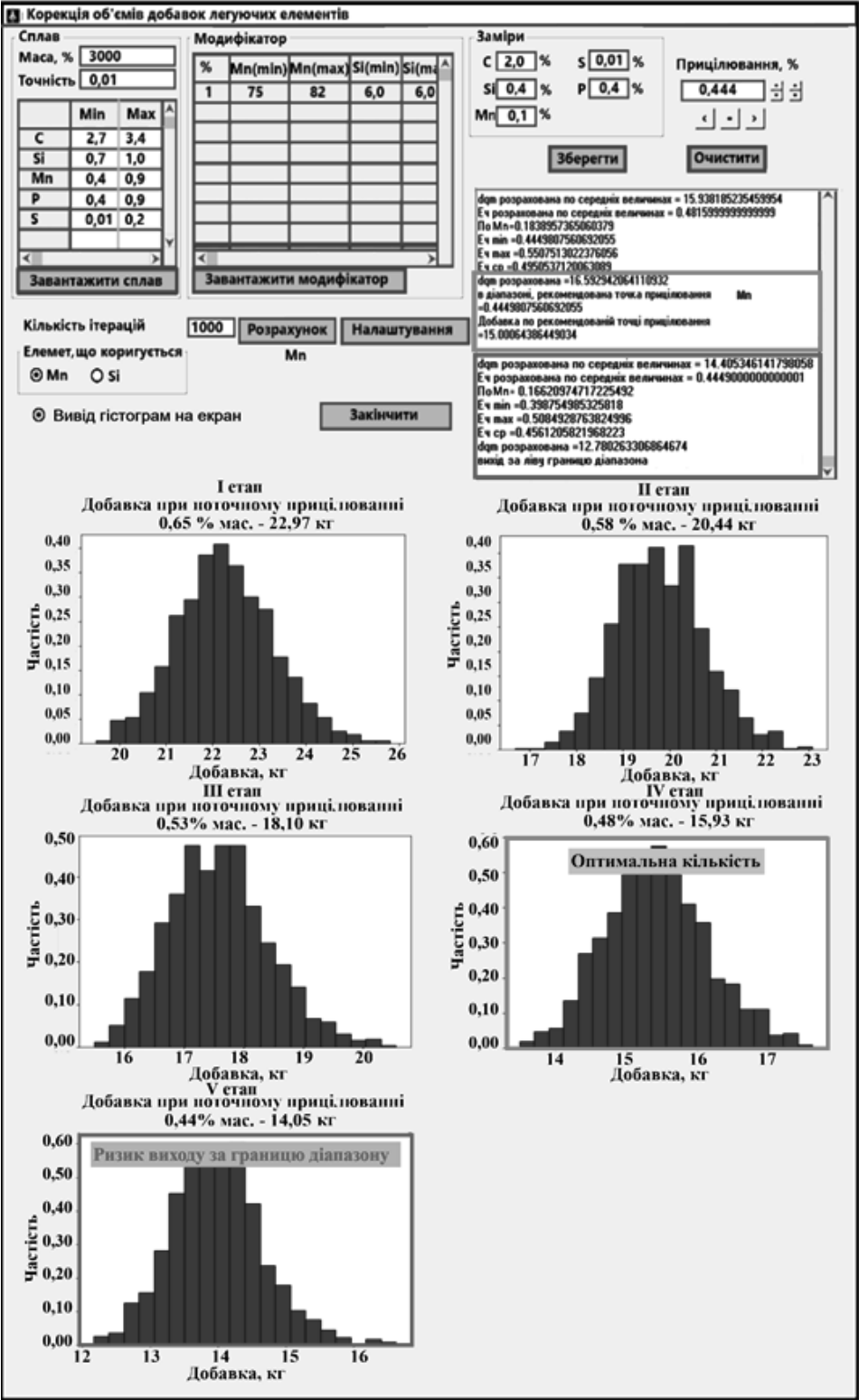


Рис. 1. Головне вікно програми для моделювання процедури коригування (регулювання) хімічного складу розплаву чавуну, яка передбачає врахування нестабільності хімічного складу компонентів шихти. Поетапна робота моделювання процедури розрахунку маси шихтового матеріалу (феромарганцю ФМн 78)

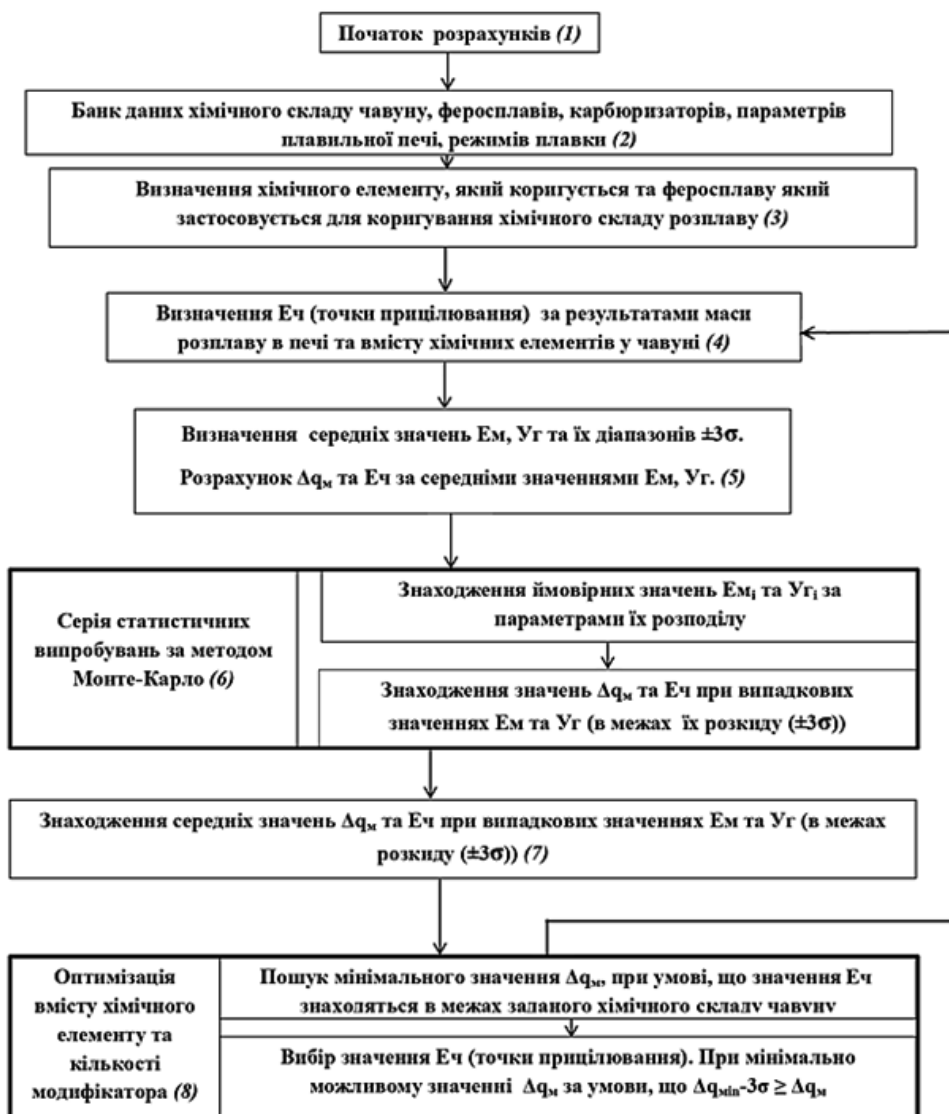


Рис. 2. Фрагмент алгоритму роботи програми

Розрахунок ведеться із застосуванням відомої формули (1) [27–29]. Величиною Δq_m , що моделюється, є маса коригуючої добавки:

$$\Delta q_m = \frac{100 \cdot q \cdot (E_{\text{ч}} - E_3)}{E_m (100 - U_{\text{г}})}, \quad (1)$$

де q — маса розплаву; $E_{\text{ч}}$ — необхідний вміст хімічного елемента в чавуні; E_3 — вміст хімічного елемента у розплаві за результатами хімічного аналізу; E_m — вміст елемента в матеріалі, який застосовується для коригування складу чавуну; $U_{\text{г}}$ — величина угару; ΔE — величина, на яку необхідно збільшити вміст елемента, $\Delta E = E_{\text{ч}} - E_3$.

Відповідно до «коефіцієнта вагомості» кожного хімічного елемента у складі сплаву, визначеного технологом, проводиться ранжування модифікаторів та згідно із поставленою задачею щодо мінімізації кількості застосованого модифікатора чи його вартості або оптимізації хімічного складу розплаву, задається «точка прицілювання» $E_{\text{ч}}$ (рис. 2, блок 4).

Зазвичай на першому етапі розрахунків маса коригуючої добавки визначається за умови прийняття значень всіх змінних на рівні середніх величин (рис. 2, блок 6). При цьому величина E_c – використовується як т. зв. «точка прицілювання». У процесі моделювання процедури коригування хімічного складу «точка прицілювання» E_c буде змінюватись і, відповідно, впливати на масу добавки на кожному Δq_m етапі розрахунків. Приймаючи значення E_m та U_g за випадкові величини (в межах заданих діапазонів), шляхом ітерацій із застосуванням методу Монте-Карло визначаються межі можливого розкиду величин Δq_m (рис. 2, блок 7).

Наступні етапи розрахунків проводять у вигляді послідовного коригування маси внесення у розплав відповідних шихтових матеріалів (модифікаторів) з обчисленням зміни вмісту елементів у складі розплаву. Тобто після кожного циклу розрахунків проводиться перевірка вмісту всіх елементів у складі розплаву на їх відповідність вимогам стандарту та виводяться на екран розподіли випадкових величин, що входять до рівняння (1). Зауважимо, що, починаючи з другого етапу розрахунків, після початкового «прицілювання» за середніми величинами, застосовується метод Монте-Карло для визначення величин угару, вмісту хімічних елементів у модифікаторах, які використовуються при коригуванні розплаву. Враховуючи отримані розподіли зазначених змінних, оператор може задати нову «точку прицілювання» відповідно до поставленої задачі або скористатись рекомендованою. Зміщуючи «точку прицілювання» залежно від результатів попередніх розрахунків та мети поставленої задачі (мінімізації кількості модифікатора, що використовується, або оптимізації хімічного складу розплаву) визначається маса Δq_m внесення його у розплав, при якій вміст усіх елементів у розплаві перебуває в діапазонах, згідно з прийнятою точністю розрахунків (рис. 2, блок 8). Розрахунок маси Δq_m добавки, яку необхідно ввести в розплав чавуну, ведеться доти, поки вміст елемента, який коригується, буде в межах, регламентованих стандартом на готову продукцію. Наприкінці розрахунків на екрані у робочому вікні програми може висвітлитися коментар: «Вихід за ліву або праву границю діапазону» (рис. 1). У цьому випадку необхідно повернутись до попереднього розрахунку. Визначена попередньо величина Δq_m і буде шуканим результатом.

Подальшим кроком роботи програми є перехід до процедури корекції наступного хімічного елемента у хімічному складі розплаву чавуну із застосуванням відповідного модифікатора і т. ін. Моделювання процедури коригування хімічного складу розплаву чавуну завершується, коли в результаті розрахунків діапазони вмісту всіх хімічних елементів у розплаві перебувають у межах, заданих стандартом.

Для апробації викладеного підходу щодо вирішення поставленої задачі та випробовування роботи програми було обрано такий контрольний приклад. Маса завантаження печі — 3000 кг; кількість варіантів статистичних випробувань із застосуванням методу Монте-Карло — 1000; діапазон величини угару елемента у процесі плавки (7...10) %. Масові долі елементів у готовому чавуні складають, % мас.: C — (2,7...3,2), Mn — (0,4...0,9); Si — (0,7...1,0); S — (0,02...0,2); P — (0,4...0,9). Модифікатори — феромарганець ФМн78 згідно з ДСТУ 3547-97. При коригуванні вмісту марганцю початкову точку прицілювання прийняли посередині діапазону Mn = 0,65 %. Результати заміру хімічного складу проби, відібраної з розплаву, %: C = 3,0; Mn = 0,1; Si = 0,4; P = 0,02; S = 0,01.

Типові гістограми розподілу величин Δq_m , E_c , E_m , U_g , що входять як змінні до зазначеного рівняння (1), отриманих у результаті коригування вмісту марганцю у складі розплаву чавуну, виводяться на робочий екран програми, наведений на рис. 1. Оператор може вибрати, який вид гістограм виводити на екран, а саме: розподіл маси добавки феромарганцю у першому прицілюванні (у нашому прикладі — вміст Mn = 0,65 % у готовому чавуні при першому прицілюванні); розподіл вмісту елемента (у нашому прикладі — марганцю в феромарганці ФМн78); розподіл величини угару в розплаві чавуну (на прикладі — Mn); розподіл вмісту марганцю в чавуні після коригування розплаву.

У таблиці наведено результати моделювання процедури коригування маси добавки феромарганцю у розплав чавуну за рекомендованими програмою «точками прицілювання».

Таблиця 1

Результати мінімізації маси добавки феромарганцю у розплаві чавуну за рекомендованими «точкам прицілювання» вмісту марганцю у готовому чавуні

	Перше «прицілювання» за середніми значеннями	Друге «прицілювання»	Третє «прицілювання»	Четверте «прицілювання» (оптимальне значення)	П'яте «прицілювання» (вихід за ліву границю)
	I	II	III	IV	V
«Точки прицілювання» вмісту Еч марганцю у чавуні, %	0,65	0,58	0,53	0,48	0,44
Потрібна величина маси добавки феромарганцю у розплаві, кг	22,97	20,44	18,10	15,93	14,40

Згідно з розрахунками, наведеними в таблиці, за запропонованим алгоритмом (за рекомендованими «точками прицілювання»), метод дозволяє значно зменшити масу добавки

модифікатора в розплаві порівняно з результатом розрахунків за середнім значенням Δq_m . У прикладі, що розглядається, з 22,97 до 15,93. Тобто на ~ 7 кг, на ~ 30 %. Крім того, вже на четвертій ітерації досягається мінімальне значення величини. Отже, викладена програма забезпечує розрахунок мінімально необхідної величини Δq_m .

Таким чином, викладені алгоритми і комп'ютерна програма дозволяють виконувати функцію оптимізації (мінімізації) вмісту елемента, який коригують, у розплаві чавуну (в розглянутому прикладі — марганцю) та витрати модифікатора (феромарганцю) безпосередньо в процесі плавки. У виробничих умовах ливарних цехів нерідко складається ситуація, коли надзвичайно вартісним чи дефіцитним є якийсь один модифікатор і нагальна необхідність полягає в економії, мінімізації саме його витрат. Тоді такому елементу у складі чавуну може надаватися вищий коефіцієнт вагомості [27–29]. Зазначене, безумовно, не виключає можливості застосування інших критеріїв оптимізації. Зокрема, прийняття у вигляді мінімуму витрат на шихту в цілому [2, 5, 10, 20 та ін.].

Головна особливість моделювання процедури розрахунку шихти полягає в тому, що Δq_m у формулі (1) слід розуміти як вміст у шихті заданого компоненту, наприклад, феромарганцю, феросиліцію тощо. Зазвичай попередній контроль хімічного складу компонентів шихти (металобрухту, відходів власного виробництва та ін.) на виробництві не проводять. Відповідно, величину E_z вмісту елемента, що коригують, внесеного у шихту з іншими компонентами, оцінюють орієнтовно, враховуючи їхній хімічний склад та вміст у шихті. Подальше моделювання процедури формування шихти відбувається за викладеним алгоритмом і комп'ютерною програмою з урахуванням певної специфіки [27–29, 34] та ін.

Застосовані методика і розроблена комп'ютерна програма виключають небезпеку виходу величин вмісту хімічних елементів у складі чавуну за межі діапазонів, регламентованих стандартом на готову продукцію.

Висновки

Представлений вище аналіз засвідчив, що для уникнення зазначених недоліків необхідно застосовувати комп'ютерне моделювання з використанням методик розрахунку шихти, які враховують в імовірнісному аспекті нестабільність хімічного складу шихти та діапазони вмісту хімічних елементів сплаву, що виплавляють.

Вагомою задачею у вирішенні комплексної проблеми покращення якості литва, економії сировини та енергії при виплавленні чавуну, сталі, сплавів чорних і кольорових металів є впровадження у систему контролю й управління технологічними процесами ливарного виробництва ефективних методик розрахунку оптимального складу шихти і коригування розплаву безпосередньо під час плавки.

Імовірнісний характер процесу виплавлення чавуну і виготовлення з нього литва потребує відповідного підходу до моделювання процедури розрахунку шихти та регулювання вмісту хімічних елементів у складі розплаву в печі. Розроблена й реалізована у вигляді базових алгоритму і комп'ютерної програми методологія розрахунку шихти й коригування відсоткового вмісту хімічних елементів у розплаві чавуну безпосередньо в процесі плавки, яка враховує у ймовірнісному аспекті, із застосуванням методу Монте-Карло нестабільність хімічного складу шихтових матеріалів. Перевага запропонованого підходу перед іншими методиками полягає у можливості на будь-якій стадії моделювання процедури визначення складу шихти оцінювати результат розрахунку не тільки шляхом контролю потрапляння середніх величин вмісту кожного з хімічних елементів у регламентовані стандартом чи технічними умовами на чавун діапазони, а й за відповідністю очікуваних полів розкиду ймовірних величин вмісту елементів діапазонам, передбачених цими нормативними документами. Викладену методику, що передбачає застосування методу Монте-Карло, доцільно застосовувати також як другий етап після, скажімо, розрахунку складу шихти методом підбору чи будь-яким іншим способом для посилення надійності остаточного результату.

Список літератури

- 1 Курдюмов Д.Я., Тэн Э.Б. Расчет оптимального состава шихты на ЭВМ. Москва: Металлургия. 1984. 73 с.
- 2 Пономаренко О.И. Оптимизация технологических решений в условиях реконструкции литейных цехов / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Харьков, ХГПУ. 1998. 508 с.
- 3 Пельх С.Г. Управление качеством отливок из железоуглеродистых сплавов на основе кибернетических моделей / Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Луганск. Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля. 2004. 375 с.
- 4 Ямшинський М.М. Жаростійкі та зносостійкі ливарні сплави на основі заліза для роботи в екстремальних умовах / Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Київ. ФТІМС НАН України, 2019. 510 с.
- 5 Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1984. 432 с.
- 6 Семесенко М.П., Пельх С.Г. ЭВМ в управлении литейными процессами. Донецк: Донбасс. 1975. 96 с.
- 7 Пельх С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. Киев: Вища школа. 1977. 192 с.
- 8 Ямшинський М.М., Грядовський І.О. Програмне забезпечення для розрахунку шихти для сталей V Міжнародна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». Київ. 28–29 травня 2013. С. 144–146.
- 9 Архангельский А.В., Писаренко Л.З., Аверкин С.И. Компьютерная программа расчета состава шихты. *Литейное производство*. 2000. № 12. С. 26–27.

- 10 Селівьорстов В.Ю. Програмний засіб розрахунку шихти з урахуванням економічного показника ефективності. *Наукові праці. Комп'ютерні технології*. Вип. 161. Т. 173. С. 154–157.
- 11 Друян И.А. Расчет шихты методом последовательного корректирования. *Литейное производство*. 1971. № 2. С. 42–43.
- 12 Шитиков В.С., Чеботарь Л.К., Мاستиновский Ю.В., Ларичкин В.Л. Применение ЭВМ для расчета оптимального состава шихт. *Литейное производство*. 1980. № 9. С. 11–12.
- 13 Андрианов Н.В., Афанасиади А.Г., Нумеранова И.Л., Демин А.В., Мандель Н.Л., Грибок Д.К., Тыщенко О.Н. Определение оптимального состава металлошихты для различного марочного сортамента сталей, выплавляемых в ДСП-100 № 3 РУП «Белорусский металлургический завод». *Литье и металлургия*. 2004 (3). С. 107–109.
- 14 Рафальский И.В., Довнар Г.В., Лущик П.Е. Решение задачи оптимизации состава шихты методами линейного программирования. *Литье и металлургия*. 2006 (2–1). С. 154–157.
- 15 Леонович Б.И., Натальченко В.В., Ощепков Б.В., Трофимов Е.А. Программный комплекс для моделирования процесса выплавки коррозионных марок стали. *Вестник ЮУрГУ*. 2010. № 13. С. 19–23.
- 16 Пелых С.Г. Расчет оптимального состава шихты. *Литейное производство*. 1983. № 6. С. 5–7.
- 17 Карпов П.М. Приближенный расчет металлических шихт графоаналитическим способом. *Литейное производство*. 1962. № 10. С. 39
- 18 Горбунов А.И. Расчет шихты для плавки металлов / А.И. Горбунов, В.П. Сабуров, А.А. Родин и др. Омск: ОПИ. 1975. 77 с.
- 19 Пономаренко О.И., Пелих В.Ф., Никифоров А.В. Методы расчета шихты для выплавки литейных сплавов. Системный подход. Киев: ИСИО Украины. 1993. 74 с.
- 20 Рибак В.М., Чернозем Д.С. Розрахунок шихти за допомогою пакету пошуку рішення середовища MS EXCEL. Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». Київ, НТУУ «КПІ». 2011. С. 308–321.
- 21 Кириченко В.М. Расчет оптимального состава шихтовых материалов методами линейного программирования. <http://masters.donntu.ru/2007/kita/kirichenko/library/b7.html>
- 22 Соколов Д.Д., Приходько О.В. Алгоритм і програма розрахунку та корекції складових шихти при отриманні високоміцного чавуну для виливниць. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. 2017. № 2 (41). С. 145–149.
- 23 Рубинштейн Э.Г., Зайцев М.В. Оптимизация состава шихты и свойств высокопрочного чугуна. *Литейное производство*. 1989. № 10. С. 14–15.
- 24 Малыхин И.А., Вдовин К.Н., Милюков С.В. Расчет на ЭВМ оптимального состава шихты. *Литейное производство*. 1980. № 10. С. 15–16.
- 25 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і властивостей промислових партій синтетичного чавуну. *Процеси лиття*. 2021. № 4 (146). С. 66–75. <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.066>
- 26 Мазур В.Л. Задачі ливарних підприємств у відновленні інфраструктури України / В.Л. Мазур, Є.С. Попов, С.І. Клименко, К.А. Сіренко. *Метал та лиття України*. 2023. Т. 31. № 1 (332). С. 64–69.
- 27 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва. *Метал та лиття України*. 2021. Т. 29. № 4 (327). С. 44–54.
- 28 Сіренко К.А. Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах. *Процеси лиття*. 2022. № 1 (147). С. 3–10.
- 29 Сіренко К.А. Розвиток методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах. *Метал та лиття України*. 2022. Т. 30. № 2 (329). С. 20–29.

- 30 Пономаренко О.И. Имитационно-вероятностные модели формовочных систем литейного цеха. Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. научн. трудов ХГПУ. Вып. 6. Ч.2. Харьков: Харьк. гос. политехн. ин-т. 1988. С. 516–519.
- 31 (url) <http://www.embarcadero.com/products/cbuilder/>
- 32 url) <https://www.python.org/>
- 33 (url) <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4180>
- 34 Сіренко К.А., Мазур В.Л. Переваги та недоліки методів розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну в ливарному виробництві. *Процеси лиття*. 2023. № 3 (153). С. 49–60.

Надійшла 25.10.2023

References

- 1 Kurdyumov, D.Ya., Tan, E.B., Calculation of optimal charge composition on the computer. M.: Metallurgy. 1984. 73 p. [in Russian].
- 2 Ponomarenko, O.I. Optimisation of technological solutions in the conditions of foundry shops reconstruction / Cand. Sci. D. Sci. Kharkiv, Kharkiv, KHPU. 1998. 508 p. [in Russian].
- 3 Pelykh, S.G. Quality management of iron-carbon alloy castings on the basis of cybernetic models / Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Lugansk. Volodymyr Dahl East Ukrainian National University. 2004. 375 p. [in Russian].
- 4 Yamshynskiy, M. M. Heat resistant and wear resistant iron based casting alloys for work under extreme conditions: The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Kyiv, 2019. Physico-technological Institute of Metals and Alloys of National Academy of Sciences of Ukraine. 510 p. [in Ukrainian].
- 5 Vozdvizhensky, V.M., Grachev V.A., Spassky V.V. Casting alloys and the technology of their melting in mechanical engineering. Moskva: Mashinostroenie. 1984. 432 p. [in Russian].
- 6 Semesenko, M.P., Pelykh, S.G. Computer in foundry processes control. Donetsk, «Donbass». 1975. 96 p. [in Russian].
- 7 Pelykh, S.G., Semesenko, M.P. Optimisation of foundry processes. Kiev: «Vishcha Shkola». 1977. 192 p. [in Russian].
- 8 Yamshynskiy, M.M., Gryadovskiy, I.O. Software for calculating the charge for steels / V International Conference «New Materials and Technologies in Mechanical Engineering». Kyiv. 28–29 May, 2013. P. 144–146 [in Russian].
- 9 Arkhangelskiy, A.V., Pisarenko, L.Z., Averkin, S.I. Computer programme for calculation of charge composition. *Foundry production*. 2000. No. 12. P. 26–27 [in Russian].
- 10 Selivorstov, V.Y. Software tool for calculating the charge with regard to the economic efficiency indicator. Scientific works. *Computer technologies*. Issue 161. Vol. 173. P. 154–157 [in Ukrainian].
- 11 Druyan, I.A. Calculation of charge by the method of sequential correction. *Foundry production*. 1971. No. 2. P. 42–43 [in Russian].
- 12 Shitikov, V.S. Computer application for calculation of the optimum charge composition / V.S. Shitikov, L.K. Chebotar, Yu.V. Mastinovskiy, V.L. Larichkin. Foundry Production. 1980. No. 9. P. 11–12 [in Russian].
- 13 Andrianov, N.V. Determination of the optimum composition of the charge metal for different grades of steels smelted in DSP-100 No. 3 of RUE «Belarusian Metallurgical Plant» / N.V. Andrianov, A.G. Afanasiadi, I.L. Numeranova, A.V. Demin, N.L. Mandel, D.K. Gribok, O.N. Tyshchenko. *Casting and Metallurgy*. 2004 (3). P.107–109 [in Russian].
- 14 Rafalski, I. V., Dovnar, G.V., Lushchik, P.E. Solving of the problem of the burden composition optimization by means of linear programming. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry Production and Metallurgy)*. 2006. No. 2. Vol. P. 154–157 [in Russian].

- 15 Leonovich, B.I. Software package for modelling the smelting process of corrosive steel grades / B.I. Leonovich, V.V. Natalchenko, B.V. Oshchepkov, E.A. Trofimov. *Bulletin of SUSU*. 2010. No. 13. P. 19–23 [in Russian].
- 16 Pelykh, S.G. Calculation of optimal charge composition. *Foundry production*. 1983. No. 6. P. 5–7 [in Russian].
- 17 Karpov, P.M. Approximate calculation of metal charges by graphoanalytical method. *Foundry production*. 1962. No. 10. P. 39 [in Russian].
- 18 Gorbunov, A.I. Calculation of charge for melting of metals / A.I. Gorbunov, V.P. Saburov, A.A. Rodin et al. Omsk: OPI. 1975. 77 p. [in Russian].
- 19 Ponomarenko, O.I., Pelikh, V.F., Nikiforov, A.V. Methods of charge calculation for foundry alloys smelting. System approach. Kyiv.: ISIO of Ukraine. 1993. 74 p. [in Russian].
- 20 Rybak, V.M., Chornozem, D.S. Calculation of the charge using the MS EXCEL solution search package. Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference «Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow». Kyiv, NTUU «KPI». 2011. P. 308–321 [in Ukrainian].
- 21 Kirichenko, V.M. Calculation of optimal composition of charge materials by methods of linear programming. <http://masters.donntu.ru/2007/kita/kirichenko/library/b7.html> [in Russian].
- 22 Sokolov, D.D., Prikhodko, O.V. Algorithm and programme for calculating and correcting the components of the charge when producing high-strength cast iron for foundries. *Bulletin of the Donbass State Machine-Building Academy*. 2017. No. 2 (41). P. 145–149 [in Russian].
- 23 Rubinstein, E.G., Zaitsev, M.V. Optimisation of charge composition and properties of high-strength cast iron. *Foundry*. 1989. No. 10. P. 14–15 [in Russian].
- 24 Malykhin, I.A., Vdovin, K.N., Milyukov, S.V. Computer calculation of the optimum charge composition. *Foundry production*. 1980. No. 10. P. 15–16 [in Russian].
- 25 Sirenko, K. A., Mazur, V. L. Assessment of stability of chemical composition and mechanical properties of industrial lots of synthetic iron. *Casting Processes*. 2021. No. 4 (146). P. 66–75 <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.066> [in Ukrainian].
- 26 Mazur, V.L. Tasks of foundries in the restoration of the infrastructure of Ukraine / V.L. Mazur, E.S. Popov, S.I. Klimenko, K.A. Sirenko. *Metal and Met. lit'e Ukr*. 2023. Vol. 31. № 1 (332). P. 64–69 [in Ukrainian].
- 27 Sirenko, K. A., Mazur, V. L. Ideology of adjustment of the chemical composition of synthetic cast iron in the manufacturing process of casting. *Met. lit'e Ukr*. 2021. Vol. 29. No. 4 (327). P. 44–54. <https://doi.org/10.15407/plit2021.04.066> [in Ukrainian].
- 28 Sirenko, K. A. Improvement of technology of adjustment of chemical composition of iron during melting in crucible induction furnaces. *Casting Processes*, 2022. No. 1 (147). P. 3–10. <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003> [in Ukrainian].
- 29 Sirenko, K. A. Development of the method of determining the composition of the charge for smelting cast iron in induction crucible furnaces. *Met. lit'e Ukr*. 2022. Vol. 30. No. 2 (329). P. 20–29. <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005> [in Ukrainian].
- 30 Ponomarenko, O.I. Simulation and probabilistic models of moulding systems of foundry. Information technologies: science, technique, technology, education, health: Collection of scientific works of KHPU. Vol. 6. Part. 2. Kharkov: Kharkiv State Polytechnic Institute. 1988. P. 516–519 [in Russian].
- 31 (url) <http://www.embarcadero.com/products/cbuilder/>
- 32 (url) <https://www.python.org/>
- 33 (url) <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc4180>
- 34 Sirenko, K.A., Mazur, V.L. Advantages and disadvantages of methods for calculating the charge for smelting synthetic iron in the foundry. *Casting Processes*, 2023. No. 3 (153). P. 49–60. <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.049> [in Ukrainian].

Received 25.10.2023

K.A. Sirenko*, Junior Researcher; e-mail: thermoexp.metal@gmail.com;
ORCID 0000-0003-2613-8094

V.L. Mazur*, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Chief Researcher; e-mail: prof.vlm@ukr.net; ORCID 0000-0001-8970-5389

D.O. Derecha**, PhD (Phys. & Math), Senior Research Scientist, Head of the Lab.²
e-mail: dderecha@gmail.com; ORCID 0000-0002-2442-3759

*Physico-Technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

** Institute of Magnetism NAS of Ukraine and MES of Ukraine (Kyiv, Ukraine)

APPLICATION OF THE MONTE CARLO METHOD IN CHARGE CALCULATIONS AND REGULATION OF THE CHEMICAL COMPOSITION OF PIG IRON IN THE PROCESS OF ITS SMELTING

The use of modern methods of mathematical modelling of foundry technology and current computer capabilities makes it possible to bring the methodology for determining the charge and adjusting the chemical composition of the melt directly in the process of metal melting to a qualitatively new scientific and technical level. The article analyses various approaches to calculating the charge for smelting iron and steel and methods for adjusting the percentage of chemical elements in the melt of these and other alloys directly during their smelting. The advantages and disadvantages of the most commonly used methods of charge calculation are considered. The article evaluates the methods of optimising the composition of the charge for smelting cast iron in induction furnaces, intended for the manufacture of critical foundry products. Examples of solving the problem of calculation and optimisation of the charge are given, provided that the total cost of the charge components is used as an economic criterion for the efficiency of the calculated charge composition and this criterion is minimised. In solving this problem, the simplex linear programming method is most often used. It is shown that one of the main problems in solving the problem under consideration is the uncertain chemical composition of charge materials. This applies primarily to scrap metal and ferroalloys. The known methods and computer programs developed for modelling the procedure of charge selection and controlling the chemical composition of iron or steel melt mostly do not take into account the instability of the chemical composition of charge materials. A promising direction for the development of the methodology for determining the charge and adjusting the melt is the use of approaches that take into account the probabilistic nature of the problem under consideration and the instability of the charge components in the probabilistic aspect. The application of the Monte Carlo method in charge calculations and melt composition adjustment is substantiated in order to take into account probabilistic estimates of the initial data on the ranges of the scatter of chemical elements in the materials from which the charge and melt adjustment ingredients are formed. An algorithm and a computer program for implementing such an ideology in solving the task are presented.

Keywords: foundry, iron, steel, charge, chemical composition, calculations, adjustments, algorithm, programme.