

Національна академія наук України
Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона

БОГУШЕВСЬКИЙ Володимир Святославович

УДК 669.184.244.66.001.57-52

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ
КОНВЕРТЕРНОЮ ПЛАВКОЮ

05.13.07 - автоматизація технологічних процесів

автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ - 1997

681.5

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00751805 (Q)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Державному науково-виробничому підприємстві "АСУ ТЕРМО" Науково-виробничої корпорації "Київський інститут автоматики"

Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, академік НАН України Тимофєєв Борис Борисович, Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, головний науковий спеціаліст,

Доктор технічних наук, член-кореспондент НАН України Перелома Віталій Олександрович, Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України, головний науковий співробітник

Доктор технічних наук, професор Шумілов Кирило Андрійович, Державне наукове-виробниче підприємство "АЛГОРИТМ" Науково-виробничої корпорації "Київський інститут автоматики", директор

Провідна установа: Національний технічний університет України "КПІ", кафедра автоматизації теплоенергетичних процесів ТЕФ

Захист відбудеться "10" грудня 1997 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 50.02.01 при Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України за адресою: Київ, вул. Боженка, 11

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці при Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України

Автореферат розісланий "28" листопада 1997 р

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
кандидат техн. наук

Бернадський В.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. У 60-80-х роках у зв'язку з введенням до дії нових та модернізації діючих конвертерів, які обладнані системами автоматизації з різними давачами контролю технологічних параметрів, постійно удосконалювались як теорія конвертерного процесу, так і технологія, устаткування, АСУ, засоби досліджень та вимірювань. Але відомі теоретичні моделі мало придатні для практичного використання, тому що реальний процес проходить в умовах, які далекі від рівноваги. Це призводить до великих відхилень при управлінні. Відомі моделі для практичного використання створювались за відсутності системного підходу до розробки моделі та технічних засобів для її функціонування, включаючи засоби одержання точної та надійної інформації про хід процесу, та використовувались, в основному, для теоретичних досліджень на експериментальних агрегатах та плавках.

Широке розповсюдження у практиці розробки математичних моделей та створенні АСУ конвертерним процесом одержали методи математичної статистики, що засновані на теоретичних розрахунках та непрямих засобах контролю основних параметрів процесу з наступним коректуванням у процесі експлуатації моделей, настройкою та поетапним налагодженням АСУ при освоєнні технологічного процесу. Але спрощені критерії управління, що охоплюють окремі періоди та окремі режимні параметри конвертерної плавки, недостатня технічна база не дозволили до цього часу створити математичну модель, яка адекватно відображає процес та забезпечує можливість перейти до системи замкнутого управління.

У зв'язку з цим постає необхідність вирішення проблеми створення математичної моделі, що забезпечує можливість управління конвертерним процесом з необхідною точністю, розробки нових науково обґрунтованих і практично реалізуємих методів вимірювання окремих параметрів процесу, використання яких підвищує якість управління, та створення на цій базі АСУ для вітчизняних і закордонних металургійних підприємств.

Зважаючи на складність та швидкоплинність процесів, що проходять у конвертерній ванні, для вирішення поставленої проблеми треба уточнити критерій управління в напрямку його оптимізації, створити модель, що охоплює усі періоди плавки, теоретично обґрунтувати та розробити засоби одержання достовірної та надійної інформації про хід процесу й на цій основі створити АСУ плавкою.

Мета та задачі досліджень. Метою дисертації є комплексне використання детермінованих, імовірних та евристичних засобів, у тому числі теорії та методів розпізнавання образів і автоматичної класифікації для поліпшення якості керування киснево-конвертерним процесом, розробка відповідних алгоритмів, засобів контролю параметрів процесу та створення на цій основі системи контролю та управління з автоматичним вибором структури математичної моделі й настройкою її параметрів для безперервного функціонування у режимі статичного, динамічного та замкнутого управління.

У відповідності з цією метою розв'язувались такі задачі:

- проведення порівняльного аналізу математичних моделей конвертерного процесу виплавки сталі у режимі статичного, динамічного та замкнутого управління;

- визначення на основі теоретичного аналізу та експериментальних досліджень факторів, які впливають на критерій оптимального управління;

- наукове обґрунтування, дослідження, розробка та впровадження у конвертерне виробництво математичної моделі, засобів контролю параметрів і одержання достовірної інформації про хід процесу, алгоритму контролю та управління;

- розробка та впровадження автоматизованої системи управління плавкою.

Методи досліджень. При побудові математичної моделі конвертерної плавки використовувались основні положення теорії металургійних процесів та практики конвертерного виробництва, основи математичного і фізичного моделювання, теорії автоматичного керування та розпізнавання образів. Алгоритм контролю та управління розроблено з використанням теорії імовірності та математичної статистики. Для ідентифікації моделі застосовувались результати попередніх плавок позитивної вибірки, стандартні методи випробувань та контролю якості сталі, поєднання безпосередніх вимірювань режимних параметрів конвертерної плавки з контролем тісно пов'язаних з ними непрямих показників. Обробка експериментальних даних виконувалась на персональних ЕОМ.

Наукова новизна роботи полягає у створенні нового напрямку у вирішенні актуальної проблеми - розробки математичних моделей та системи управління складним металургійним об'єктом - кисневим конвертером:

- запропоновано та досліджено новий підхід до проблеми побудови математичної моделі технологічного процесу, що заснований на сукупному застосуванні детермінованих, імовірних та евристичних методів, у тому числі теорії та засобів розпізнавання образів і автоматичної класифікації, з наступною ідентифікацією моделі у процесі експлуатації на плавках позитивного досвіду, що включає автоматичний вибір структури і настройку параметрів для безперервного функціонування у режимі статичного, динамічного та замкнутого управління;

- удосконалено метод автоматичної класифікації з застосуванням позитивного досвіду, з урахуванням внутрішньокласових відхилень параметрів від їх значень у плавці позитивного досвіду;

- запропоновано і досліджено новий підхід до побудови цільової функції критерію оптимального управління з мінімізацією собівартості сталі, що полягає у поділі параметрів на три групи - витрачених на плавку матеріалів, початкових та кінцевих умов плавки, а також керуючих параметрів, які не зв'язані явно з собівартістю сталі, з наступною ідентифікацією функції у кожній групі окремо;

- удосконалено і досліджено модель явищ переносу у ванні конвертера, що дозволило теоретично обґрунтувати зв'язок амплітудно-частотних характеристик вихідних параметрів з режимними параметрами процесу та поліпшити їх роль;

- отримали подальший розвиток засоби контролю основних режимних параметрів процесу - швидкості зневуглючення, температури, рівня ванни та режиму шлакоутворення - шляхом включення у відповідні моделі параметрів роботи

водоохолоджуючого устаткування, електрофізичних властивостей продуктів плавки, характеристик граничних шарів футеровки, параметрів газу, що відходить;

- удосконалена методологія контролю і управління режимними параметрами конвертерної плавки з використанням результатів прогнозу основних технологічних параметрів за розробленими математичними моделями;

- удосконалена методологія визначення техніко-економічних показників (ТЕП) АСУ конвертерним процесом.

Новизна перелічених розроблених і випробуваних на практиці засобів, технологічних та технічних рішень підтверджена патентами й авторськими свідоцтвами.

На захист виноситься:

- принцип побудови математичної моделі технологічного процесу, що заснований на сукупності детермінованих, імовірних та евристичних методів, у тому числі теорії та засобів розпізнавання образів і автоматичної класифікації, з наступною ідентифікацією моделі у процесі експлуатації на плавках позитивного досвіду, що включає автоматичний вибір структури і настройку параметрів для безперервного функціонування у режимі статичного, динамічного та замкнутого управління;

- метод автоматичної класифікації з застосуванням позитивного досвіду, з урахуванням внутрішньокласових відхилень параметрів від їх значень у плавці позитивного досвіду;

- математичну та фізичну модель явищ переносу у ванні конвертера;

- модель управління технологічним процесом плавки у конвертері, що побудована на базі детермінованих, імовірних та евристичних методів і використовує засоби автоматичної класифікації та позитивний досвід попереднього керування;

- методологію контролю та управління режимними параметрами конвертерної плавки з використанням результатів прогнозу основних технологічних параметрів за розробленими математичними моделями;

- метод побудови цільової функції критерію оптимального управління з мінімізацією собівартості сталі, що полягає у поділенні параметрів на три групи - витрачених на плавку матеріалів, початкових та кінцевих умов плавки, а також керуючих параметрів, що не зв'язані явно з собівартістю сталі, з наступною ідентифікацією функції у кожній групі окремо;

- результати досліджень використання моделі, алгоритмів, засобів контролю та керування режимними параметрами й АСУ конвертерною плавкою.

Практична значущість роботи. Доцільність проведених досліджень, розробок та впроваджень полягає в усуненні характерних недоліків попередньої практики створення математичних моделей та систем управління конвертерною плавкою. Одержані такі результати:

- створена модель управління технологічним процесом плавки у конвертері, що побудована на базі детермінованих, імовірних та евристичних методів і використовує засоби автоматичної класифікації та позитивний досвід попереднього керування;

- доведена можливість істотного збільшення точності управління за рахунок введення у модель зворотного зв'язку за непрямыми параметрами процесу;
- збільшена точність та розширені можливості швидкого та надійного визначення режимних параметрів процесу;
- одержані числові значення цільової функції оптимального управління з мінімізацією собівартості сталі;
- розроблені та випробувані у виробничих умовах алгоритми контролю та аналізу параметрів технологічного процесу;
- розроблена АСУ конвертерною плавкою, що реалізує статичне, динамічне та замкнуте управління конвертерною плавкою.

Реалізація та впровадження результатів. Моделі, алгоритми контролю та управління, що одержані у процесі проведення досліджень, реалізовані в АСУ конвертерною плавкою, яка впроваджена в експлуатацію на Єнакіївському металургійному заводі (ЄМЗ), металургійних комбінатах Криворізькому (КМК), "Азов-сталь" та ім. Ілліча. Засоби контролю режимних параметрів конвертерної плавки реалізовані в дослідних зразках, що випробувані та впроваджені у складі АСУ.

Впроваджені результати роботи дозволили здійснити надійний контроль та управління конвертерною плавкою. Промислова експлуатація АСУ дозволила істотно покращити якість управління та ТЕП процесу: зменшити тривалість продукції на 1,5 хв., скоротити вигар заліза на 0,5 % та брак до 1 %; підвищити стійкість футеровки конвертерів, зменшити витрату вогнетривів на 3 %; підвищити кількість контрольованих плавок на 10 %; збільшити долю плавок, що злиті без корекції, на 18 %.

Апробація роботи. Матеріали дисертаційної роботи доповідались пошукувачем на Всесоюзних науково-технічних конференціях та семінарах: "Використання ЕОМ в металургії" (м. Москва, 1973 р.); "Досвід експлуатації систем та засобів автоматизації в сталеплавильному виробництві та перспективи впровадження АСУ" (м. Київ, 1974 р., 1980 р.); V та VI конференціях "Теорія та практика киснево-конвертерних процесів" (м. Дніпропетровськ, 1977 р., 1981 р.); IV конференції "Досвід створення АСУ в чорній металургії" (м. Дніпропетровськ, 1978 р.); "Проблеми розробки та впровадження математичного, програмного та інформаційного забезпечення АСУ технологічними процесами" (м. Чернівці, 1982 р.); "Досвід експлуатації систем і засобів автоматизації" (м. Київ, 1983 р., 1989 р.); "Сучасні процеси зневугледцювання та дегазації легованих сталей та сплавів" (м. Дніпропетровськ, 1987 р.); "Проблеми автоматизації металургії України" (Київ, 1995 р.); IV конференції з автоматичного управління (м. Черкаси, 1997 р.).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи надруковані в 3 монографіях, 78 статтях у наукових журналах і збірниках наукових праць, 8 патентах та 31 авторському свідоцтві на винаходи. Перелік основних наукових праць наведено в авторефераті.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, семи розділів, заключення (загальних висновків), списку використаних джерел з 188 найменувань та 7 додатків. Обсяг роботи становить 346 сторінок, з яких основного тексту 295 сторінок, 16 таблиць, 67 малюнків.

Особистий внесок пошукувача полягає у розробці та дослідженні нового підходу до проблеми створення математичної моделі технологічного процесу, розробці на цій основі критерію, математичних моделей контролю та управління конвертерною плавкою, нових засобів контролю основних параметрів плавки та системи управління, а також участі у впровадженні в експлуатацію АСУ.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, викладені наукова новизна та практична цінність одержаних результатів.

У розділі 1 наведена характеристика киснево-конвертерної плавки як технологічного об'єкта керування. Проведено огляд існуючих моделей контролю та управління конвертерною плавкою, наведена їх класифікація. Розроблені принципи алгоритмічного забезпечення АСУ, що об'єднують задачі статичних, динамічних та замкнених моделей. Дається постановка задачі проведення у рамках роботи досліджень, що забезпечують точний та своєчасний контроль складу шихтових матеріалів, урахування неконтрольованих збурюючих впливів, відтворення моделей проходження конкретних плавок, створення засобів та пристроїв їх контролю і АСУ конвертерною плавкою.

У розділі 2 наведені характеристики об'єктів досліджень, умови проведення експериментів, технічні характеристики засобів контролю, що використовувались у дослідженнях, методика проведення досліджень та обробки результатів.

Розділ 3 присвячено розробці критерію управління конвертерною плавкою. Проведено декомпозицію приблизного критерію роботи конвертерного цеху. Множину керуючих впливів розділено на впливи, що визначаються до початку і під час продувки, в періоди коректування плавки та її розкислення. Доведено, що декомпозиція задачі істотно не впливає на погіршення загального критерію.

При статичному управлінні плавкою керуючі впливи - маса, т, брухту (m_L), чавуну (m_C), вапна (m_H), вапняку (m_{HK}), плавикового шпату ($m_{Ш}$), кількість кисню на плавку (V, m^3), середньоінтегральна за продувку відстань торця фурменого кінцевика до рівня спокійного металу (\bar{H} , калібрів) можна представити сумою імовірностей (P) додувки, охолодження після першої повалки та проведення коректуючих операцій з перепризначенням плавки на іншу марку:

$$I(m_L, m_C, m_H, m_{HK}, m_{Ш}, V, \bar{H}) = \alpha_1 P [(t_1 \leq t_M < t_3), (C_M > C_3), (S_M \leq S_1)] + \\ + \alpha_2 P [(t_2 \leq t_M < t_1), (C_M \leq C_3), (S_1 \leq S_M < S_2)] + \alpha_3 P [(C_M < C_2), (t_1 \leq t_M \leq t_3), \\ (S_M \leq S_1)] + \alpha_4 P [(t_M \leq t_2), (C_M \leq C_3), (S \leq S_2)] + \alpha_5 P [(t_M > t_3), (C_M > C_3), \\ (S_1 \leq S_M < S_2)] + \alpha_6 P [(t_M > t_3), (C_M \leq C_2), (S_M > S_2)], \quad (1)$$

де $\alpha_1 \dots \alpha_6$ - вагові коефіцієнти;

t_1, t_3 - відповідно нижня та верхня допустимі межі температури металу для зливу з конвертера, $^{\circ}\text{C}$;

C_1, C_3 - відповідно нижня та верхня допустимі межі за вуглецем у металі, %;

S_1 - верхня допустима межа за кількістю сірки в металі, %;

t_2, C_2, S_2 - межі відповідно температури, кількості вуглецю та сірки після першої повалки, що потребують проведення коректуючих операцій з перепризначенням плавки на іншу марку сталі.

Критерій (1) наводимо рівнянням

$$I(m_{Л}, m_{Ч}, m_{Н}, m_{ИК}, m_{Ш}, V, \bar{H}) = \alpha_7 M(C_M - C^*)^2 + \alpha_8 M(t_M - t^*)^2 + \alpha_9 M(S_M - S^*)^2, \quad (2)$$

де $\alpha_7 \dots \alpha_9$ - коефіцієнти, які залежать від масштабів змінних, що входять до критерію, а також від співвідношення частот додувок на вуглець, температуру та сірку відповідно;

M - знак математичного очікування;

C^*, t^*, S^* - "точки прицілу" за вуглецем, температурою та сіркою в металі, що визначаються методом експертних оцінок в залежності від технологічної ситуації на початку продувки (наявність замовлення, готовність сталерозливного ковша, розливної площадки, установки непічної обробки та ін.).

Априорі можна припустити, що частота корекцій за окремими компонентами не є незмінною, а залежить від початкових умов плавки. Так, якщо поставлене завдання отримати високовуглецеву марку сталі з першої повалки, то масштаб коефіцієнта α_7 збільшується за інших рівних умов, аналогічно збільшаться масштаби коефіцієнтів α_8 при незбалансованості плавки за теплоотою та α_9 при великій кількості сірки у чавуні. Проведені дослідження дозволили знайти вплив початкових умов плавки на частоту корекцій по окремих компонентах та зв'язане з цим значення згаданих коефіцієнтів.

При визначенні масштабу змінних правої частини рівняння (2) нормалізація за вуглецем та температурою проведена для різниці меж відхилень останніх в окремих марках. Кількість сірки в марці має тільки верхню межу. Тому нормалізацію для неї провели, аналізуючи додувки, які для збільшення температури та зменшення кількості сірки в металі проводять, збільшуючи відстань торця фурменого кінцевика до рівня спокійного металу або зменшуючи інтенсивність продувки.

При наявності проміжних вимірювань температури та складу ванни проводять повторний розрахунок управління плавкою. Аналогічно проводять розрахунок додувки. Керуючі впливи обираються шляхом мінімізації критерію

$$I(V, \bar{H}, m_{ИК}) = \sum_{i=1}^n \gamma_i M(L_{i\tau} - L_{i*})^2, \quad (3)$$

де γ_i - ваговий коефіцієнт, що визначає важливість досягнення i -ї характеристики сталі у мить повалки конвертера;

$L_{i\tau}$ - i -й компонент вектора стану конвертерної плавки під час повалки;

L_{i*} - i -а "точка прицілу", яка визначається для кожної марки сталі методом експертних оцінок.

Розраховані значення керуючих впливів забезпечують найвірогідніше попадання у допустиму зону за хіміскладом і температурою до моменту закінчення процесу, що дає максимальний відсоток плавок, які проводять без корекції.

Розрахунок розкислювачів проводиться за аналогічною формулою. Керуючим впливом є маса окремих компонентів розкислювачів, а вектор стану визначається хіміскладом сталі після розкислення. Початковий стан залежить від хіміскладу металу на повалці.

В реальному процесі неможливо безпосередньо вимірювати вихідні координати - вимірюють деякі величини, що є функціями координат. Крім того, ці величини контролюють з помилкою, тому вони є деякими імовірними змінними. Це призводить до того, що ми ніколи не будемо знати точних значень фазових координат і управління повинні шукати не як функції останніх, а як функції їх статистичних оцінок.

Кількість вигорілого вуглецю за період часу від (τ) до $(\tau + 1)$ (змінні у фігурних дужках формули (4)) є сумою двох значень швидкості знеуглецювання, що виміряна $\xi(\tau + 1)$ та прогнозована $R_{VC}(\tau)$, які взяті з деякими ваговими коефіцієнтами. Аналогічний результат отримуємо і для температурного рівняння (для тієї частини швидкості зміни температури, що зв'язана з процесом знеуглецювання).

$$m_C(\tau + 1) = m_C(\tau) - \{R_{VC}(\tau)[1 - K_{CV}(\tau)] + K_{CV}(\tau)\xi(\tau + 1)\}, \quad (4)$$

де m_C - оцінка концентрації вуглецю, %;

$K_{CV}(\tau)$ - коефіцієнт підсилення в рівнянні знеуглецювання, що залежить від дисперсії помилки оцінки концентрації вуглецю та характеру залежності.

Вагові коефіцієнти обох значень змінюються в залежності від співвідношення між дисперсією шуму в самому об'єкті, в каналі вимірювання та поточною дисперсією оцінки $m_C(\tau)$. Аналіз формули (4) показує, що при точному значенні початкової концентрації вуглецю та при точному вимірюванні швидкості знеуглецювання достатньо на кожному кроці з попереднього значення $m_C(\tau)$ відняти вимірювану кількість вигорілого вуглецю, тобто алгоритм ураховує тільки апостеріорну інформацію - вимірюване значення швидкості знеуглецювання, а при наявності поганих динамічних вимірювань - апіорну. При точному значенні початкової концентрації вуглецю та за відсутності перешкод в об'єкті (за повної адекватності моделі об'єкта) вимірювана швидкість знеуглецювання стає марною, тому що у цьому випадку достатньо апіорної інформації.

Оцінка є алгебраїчною сумою двох значень: перше з них - субоптимальний прогноз змінних (кількість вуглецю), а друге - поправка, яка з деяким коефіцієнтом K_{CV} обчислює різницю між власним вимірюванням та субоптимальним його прогнозом. Таким чином, спочатку обчислюється прогноз змінних за реальним рівнянням на даному кроці та з урахуванням всієї попередньої інформації, що міститься в $m_C(\tau)$, потім цей прогноз коректується за динамічними вимірюваннями на кожному кроці. Величина поправки обчислюється по-різному в залежності

від того, що є основною причиною помилки - шум у об'єкті чи невизначеність оцінки на попередньому кроці. Коли внесок у помилку обох складових приблизно однаковий, треба зовсім утримуватися від внесення поправки.

Маючи інформацію про вектор стану конвертерної плавки в кожну мить під час продувки, можна управляти об'єктом. Припустимо, що програма траєкторія системи задана. При відхиленні від програми можна обчислити керуючі впливи та повернутися на задану траєкторію або побудувати нове програмне управління, яке приведе систему до необхідного кінцевого результату. Перший засіб - корекція за заданою програмою, другий - корекція за кінцевим станом.

Траєкторії основних параметрів конвертерної ванни (зневуглецювання, нагрів, окисленість та ін.) ніби "занурені в середу", крізь яку вони можуть впливати одна на одну. Так, наприклад, при зміні за яких-небудь причин траєкторії зневуглецювання змінюються траєкторії нагріву та окисленості. Нав'язування об'єкту в таких умовах заздалегідь заданих програмних траєкторій та спроба підтримати їх методом регулювання за відхиленням приводить до неоптимальних результатів. І навпаки, використання особливостей внутрішнього саморуху системи (власних функцій об'єкта), вибір резонансних управлінь дозволяє добитися кінцевих результатів з малими витратами на управління. З цієї точки зору більш сприятливим є другий засіб.

Але треба зважити на те, що фізико-хімічні процеси конвертерної ванни значною мірою визначаються процесом шлакоутворення. Вимоги до режиму шлакоутворення можна звести до таких: найскоріша наводка рідкорухливого шлаку на початку продувки, підтримування оптимального характеру зміни окисленості та основності шлаку з максимально можливим його рівнем на протязі усієї операції. Тому управління процесом шлакоутворення доцільно здійснювати відповідно до першого засобу.

Як узагальнений критерій ефективності функціонування об'єкта з АСУТП розглянута питома собівартість продукції необхідної якості за заданою виробничою програмою. Оптимізована цільова функція $C_1(x_i)$ включає розраховані на одиницю маси годної сталі складові її собівартості від витрат на матеріали, енергоресурси, футеровку конвертера та працю, які виражені лінійною функцією від параметрів (x_i) - початкових умов та керуючих впливів:

$$I = (\alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i) / (\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i); \quad (5)$$

$x_i \in m_L, m_C, m_{IK}, m_{IJ}, m_{SJ}, V, Si_C, Mn_C, S_C, t_4, t_3, C_3, N, \tau_L, H, v, \tau_{IK}, \tau_{IJ}, \tau_{SJ}, \tau_{PP}, C_C, Mn_C, Si_C, S_C, P_C, m_{FeMn}, m_{FeSi}, m_{SiMn}$,

де I - функціонал питомої собівартості сталі, грн./т;

α_0 - вільний член, що включає загальнозаводські (умовно-незмінні) витрати, які залежать від керуючих впливів, грн.;

$\alpha_i, \beta_0, \beta_i$ - коефіцієнти;

n - кількість параметрів;

Si_c, Mn_c, S_c - вагова частина відповідних елементів у чавуні, %;

t_c - температура чавуну, $^{\circ}C$;

$\tau_{PP}, \tau_P, \tau_{IKj}, \tau_{Ij}, \tau_{Шj}$ - тривалість продувки, простою і часу від початку продувки до введення добавок вапняку, вапна та плавикового шпату, хв.;

v - інтенсивність дуття, $m^3/хв.$;

C_c, Si_c, Mn_c - точки прицілу за масовими частками вуглецю, кремнію та марганцю в сталі, %;

S_c, P_c - допустимі значення масових часток сірки та фосфору в сталі, що визначаються її маркою, %;

N - число плавок за футеровкою;

$m_{FeMn}, m_{FeSi}, m_{SiMn}$ - маса на плавку відповідно феромарганцю, феросиліцію і силікомарганцю, т.

Завдання програмування полягає в знаходженні значень керуючих впливів, що приводять $I = C_y(x_i) \rightarrow \min$ при обмеженнях та граничних умовах, які забезпечують загрузку завданої маси металошихти у конвертер $m_M = f(m_L + m_c)$;

збільшену переробку брухту $0 \leq \sum_{j=1}^l m_{IKj} \leq 0,5$; необхідну масу шлаку $m_{Ij} \geq m_I$;

економію плавикового шпату $\sum_{j=1}^q m_{Шj} \leq 1,5$; окислення необхідної кількості вугле-

цю, кремнію та марганцю $V_{\phi} \geq V$; підтримання висоти фурми над рівнем спокійного металу в межах, що визначені технологічною інструкцією, $H_{MIN} \leq H \leq H_{МАКС}$; проектну продуктивність конвертера $v_{MIN} \leq v \leq v_{МАКС}$; засвоєння ванною сипучих матеріалів $\tau_{IK} \geq 0,5\tau_{PP}$ і $\tau_{II} \leq 0,5\tau_{PP}$; масу марганцю та кремнію в сталі $m_{MnM} + m_{MnP} = m_{MnC}$ і $m_{SiP} = m_{SiC}$. Тут l, p, q - кількість добавок відповідно вапняку, вапна та плавикового шпату; V_{ϕ} - фактичний об'єм кисню на плавку, m^3 ; τ_{IK}, τ_{II} - тривалість часу від початку продувки до введення останніх добавок вапняку та вапна у конвертер, хв.; m_{MnP}, m_{SiP} - з урахуванням вигару маса відповідно марганцю та кремнію у розкислювачах, т; m_{MnC}, m_{SiC} - маса відповідно марганцю та кремнію в сталі, т.

Для вирішення задачі оптимального управління необхідно одержати математичний вираз цільової функції в явному вигляді. Параметри x_i розділяємо на три групи. В першу включаємо керуючі впливи, що являють витрачені на плавку матеріали $m_L, m_c, m_{IK}, m_I, m_{Ш}, m_{FeMn}, m_{FeSi}, m_{SiMn}$ і V . Значення коефіцієнтів при них α_i є ціною матеріалів. У другу групу включаємо початкові та кінцеві умови плавки $Si_c, Mn_c, S_c, t_c, t_3, C_c, N, \tau_P, C_c, Mn_c, Si_c, S_c$ і P_c . Значення коефіцієнтів при них є вплив цих параметрів на питому собівартість металу. В третю групу включаємо керуючі параметри, $H, v, \tau_{IKj}, \tau_{Ij}, \tau_{Шj}$ і τ_{PP} з відповідним ваговим впливом α_i на питому собівартість сталі.

Підсумкові залежності для конвертера ємкістю 130 тонн параметрів третьої групи мають вигляд

$$C_{\Gamma}(\bar{H}) = 2,04 - 0,091 \bar{H} + 0,237 \exp[-0,39(\bar{H} - 1)] - 0,459 \exp[-0,44(\bar{H} - 1)]; \quad (6)$$

$$C_{\Gamma}(v_y) = 7,81 - 1,8v_y + 2,06 \exp[-2,66(v_y - 2,5)] + 1,62 \exp[-1,97(v_y - 2,5)] + 1,07 \exp[-0,69(v_y - 2,5)]; \quad (7)$$

$$C_{\Gamma}(\tau_{II}/\tau_{PP}) = -0,834 + 9,42 \tau_{II}/\tau_{PP} - 10,8(\tau_{II}/\tau_{PP})^2; \quad (8)$$

$$C_{\Gamma}(\tau_{IK}/\tau_{PP}) = 2,78(\tau_{IK}/\tau_{PP} - 0,5); \quad (9)$$

$$C_{\Gamma}(\tau_{III}/\tau_{PP}) = 2,16 - 2,4 \tau_{III}/\tau_{PP}; \quad (10)$$

де v_y - питома витрата дугтя, $\text{м}^3/(\text{т} \cdot \text{хв.})$.

Оптимальні значення керуючих параметрів знаходили засобом найшвидкішого спуску за допомогою ПЕОМ. На плавках, в яких виконані рекомендації по зміні керуючих впливів, одержані у порівнянні з плавками валового виробництва такі результати: збільшені переробка брукхту на 4 %, стійкість футеровки - на 2%, знижені наднормативні прості агрегату та тривалість продувки відповідно на 7,8 і 5,2 %, забезпечено економію плавикового шпату на 6 %, збільшено вихід годного на 0,5%. У підсумку питома собівартість сталі знизилась у середньому на 0,74 %.

Розділ 4 присвячено розробці моделі явищ переносу в ванні конвертера. Сталеплавильна ванна як багатозв'язаний об'єкт є трьохфазна, багатокомпонентна система, в якій проходять аерогідродинамічні, масо-, теплообмінні, хімічні та інші необоротні процеси, що визначають кінетику рафінування.

При продувці у режимі зануреного струменя, що приводить до інтенсивного барботажа ванни, в кожний момент формується квазігомогенна метало-шлако-газова емульсія об'ємним спучуванням пузирями CO у розплаві. При цьому в ванні, як у робочому тілі ідеального змішувача, можна зневажити перепадом масовмісту компонентів і температури в об'ємі та розглядати процеси переносу для випадку фізично "тонкого" (нульмірного) об'єкта, що дозволяє виключити з його математичного опису геометричні координати.

У період активного зневуглецювання ванни маса емульсії квазінезмінна, тому що її зменшення внаслідок вигорання домішок має тенденцію до компенсації збільшенням маси завдяки брукхту, що проплавляється, і шлаку, що утворюється. Так як невуглецеві домішки чавуну окислюються при великому надлишку кисню, ці хімічні реакції можна віднести до реакцій першого порядку (лінійні), для яких швидкість пропорційна добутку масових часток елементів, що реагують.

Таким чином, маємо квазігомогенний, просторово ізотропний об'єкт з зосередженими параметрами, в якому протікають хімічні реакції першого порядку та функціонує імпульсний режим з інтенсивним впливом газових плизирів. Беручи це до уваги, одержуємо звичайне диференціальне рівняння першого порядку з постійними коефіцієнтами

$$(\Omega/H) \cdot d\psi/dt + \psi = \psi_{ycm}, \quad (11)$$

яке розв'язується як кінетичне рівняння інерційної ланки першого порядку:

$$\psi = \psi_{ycm} [1 - \exp(-\tau/\tau_*)], \quad (12)$$

де Ω - смісний опір робочого тіла з урахуванням початкових умов, фазових і хімічних перетворень, хв./м;

H - відносний коефіцієнт обміну;

$\Psi, \Psi_{уст}$ - потенціал переносу та його значення, що установилося;

$d\Psi/dt$ - швидкість зміни збурюючого впливу;

$\tau_* = \Omega/H$ - незмінна часу перехідного процесу, хв., повна тривалість якого

$\tau_{уст} \approx 3 \tau_*$, хв.

Через невизначеність протікання термохімічних реакцій у ванні за участю вуглецю і заліза для їх математичного опису ця модель неефективна. Ці задачі вирішені за допомогою моделі зневуглецювання, що урахує термодинамічний стан газу, що відходить, та статистичної моделі контролю вигорання заліза, що отримана на основі великої вибірки експериментального матеріалу.

При переміщенні ідеальної рідини у посудині єдиною силою є сила ваги. Відомо, що усяка система, що знаходиться в силовому потенційному полі, схильна до вільних коливань. Можливі частоти коливань рідини залежать від форми посудини.

Як резонатор Гельмгольца конвертер обумовлює вільні коливання ванни, модулюючи в ній теоретично безконечно великий спектр частот (n). У режимі вільних коливань ванна поводить себе як лінійний осцилятор. Кожному значенню n відповідає своя форма поздовжніх коливань рідини: при $n = 1$ за діаметром посудини укладається одна півхвиля, при $n = 2$ - дві півхвилі і т.д. Хвилі непарних індексів зміщують центр ваги рідини від вертикалі. При цьому рух, що залежить від цих хвиль, впливає на стінку посудини. Хвилі ж парних індексів симетричні відносно осі циліндра, не переміщують центр ваги рідини в горизонтальному напрямку, завдяки чому вони не впливають на стінку. Власні непарні коливання рідини приводять до утворення відповідних хвиль, які впливають на стінку посудини. Коливальний характер процесів у ванні залежить також від нестационарного характеру витікання окислювача.

Експериментально частота коливань параметрів ванни визначалася за частотою коливань фурми у період продувки з зануреною течією. Контактуючи безпосередньо з ванною, фурма сприймає вплив від динамічних навантажень пульсуючих потоків, що обумовлюють її реакцію як коливання відносно точки закріплення. Ця експериментальна амплітудно-частотна характеристика фурми практично відповідає першій головній гармоніці вимушених коливань ванни, тому що майже вся енергія пульсаційного руху останньої міститься на частоті, що відповідає основному тону.

При розгляді явищ переносу отримано лінеаризовані рішення монотонних і осцилюючих полів киснево-вмісту та температури ванни, виведені співвідношення по кінетиці перехідних процесів, проведена ідентифікація показників кінетики за експериментальними даними. Дана оцінка коливального вкладу параметрів у процес рафінування.

Ідентифікація показників кінетики процесу за експериментальними даними підтвердила постульовані гіпотези теоретичних викладень. Комплексний підхід

дозволив одержати теоретичні результати, які використані в АСУТП для контролю й управління плавкою, що істотно покращало якість управління та ТЕП процесу.

В розділі 5 проведено дослідження технологічних закономірностей для контролю й управління плавкою, включаючи контроль початкових і граничних умов, комплексних і режимних параметрів плавки.

Складовою частиною статичної моделі управління конвертерною плавкою є розрахунок шихти. Металева частина шихти визначається до отримання інформації про хімічний склад чавуну (перед виливом його у ківш і взяття проби на аналіз), тому необхідно прогнозувати склад останнього. Алгоритм прогнозування хімічного складу чавуну має балансову (склад та кількість чавуну, що заливається та виливається з міксера, з зворотним зв'язком за масою і хіміскладом в міксері при кожному виливі) і статистичну частину (враховує, що перемішування чавуну в міксері є дифузійним процесом, який залежить від температури розплаву, його в'язкості та тривалості витримки нової порції в міксері).

Контроль маси чавуну в міксері здійснювали за кутом повороту міксера в мить появи течії металу з корекцією на зношення футеровки, що визначається за струмом навантаження приводу міксера, та на в'язкостні властивості чавуну, які контролюють за характером виливу. Випробування показали, що відносна помилка цього методу дорівнює 4 %.

Початкове визначення температури розплаву в конвертері залежить від тривалості простою конвертера і чавуновізного ковша. Розроблена модель теплових втрат для агрегатів різної ємкості, яка враховує зношення їх футеровки.

Визначено зв'язок неконтрольованих збурюючих впливів (попадання піску та окалини з бруктом, міксерного шлаку з чавуном, вологи при течі фурми й охолоджувача конвертерних газів (ОКГ)) на кінцеві параметри продувки, які досягають за вуглецем 0,05 % та температурою 15 °С від кожної складової. Отримані результати використані в алгоритмах статичного і динамічного управління з зворотним зв'язком за фактичними результатами раніш проведених плавок шляхом адаптації вільних членів системи рівнянь з урахуванням причин, що призвели до коливань вихідних параметрів. Ця процедура дозволяє збільшити точність контролю й управління вихідними параметрами продувки. Кількість плавок, що випущені з першої повалки, збільшилась на 7 %.

Граничні умови плавки ("точки прицілу") знайдені в залежності від роботи АСУ, портфеля замовлення і стану устаткування.

Для забезпечення порівняльних умов продувки та досягнення високої точності розрахунку кінцевих параметрів плавки необхідно утримувати дуттьовий режим шляхом стабілізації комплексного параметра - глибини реакційної зони, що виражена через ефективну витрату кисню. Математична модель визначення ефективної витрати кисню за інформацією про тепловий потік на кесон (за розходом і різницею температури охолоджуючої води) як зворотного зв'язку, який має вигляд підінтегрального коректуючого фактора, що виражає ефект догорання конвертерного газу за ходом продувки, має вигляд

$$V_3 = \int_{(\tau)} \{0,482 \sqrt{p} / [A + 0,667H - 23,7/(18 + 6,06N/N_*) - 0,008m] + 1,09 \sqrt[4]{Q_k}\} d\tau, \quad (13)$$

де V_3 - ефективний об'єм кисню, що іде на реакцію зневуглицювання ванни (при нормальних умовах), m^3 ;

τ - тривалість продувки, хв.;

p - тиск кисню після регулюючого клапану, Па;

A - коефіцієнт, який залежить від довжини фурми та діаметра сопла фурменого кінцевика, рівний для 130-тонного конвертера 3,56, м;

Q_k - тепловий потік на кесон, кВт.

Випробування моделі на ЄМЗ показало, що статичний розрахунок ефективного об'єму кисню дозволив збільшити точність визначення масової частки вуглецю на $\pm 0,012\%$ на плавках, які проведені без порушення технології.

На ефективний об'єм кисню впливає режим введення шлакоутворюючих добавок плавикового шпату. Виявлено нелінійність, яка при несприятливому збігу обставин може привести до помилок у визначенні масової долі вуглецю до 0,2 %. Тому лінійну модель процесу зневуглицювання необхідно доповнити нелінійними співвідношеннями.

Серед непрямих вимірювань характеру ходу продувки досліджені параметри газу, що відходить, теплової роботи водоохолоджуючого устаткування, вібраційних характеристик об'єкта. В загальному випадку ці параметри є функцією зміни хімічного складу ванни та шлаку, температури металу. Так, теплові потоки на фурму (q_ϕ) та кесон (q_k), тиск газу, що відходить, в перехідному газоході (p) визначаються як

$$q_\phi = \alpha_0 + \alpha_1 v_C + \alpha_2 t; \quad (14)$$

$$q_k = v_C (\alpha_3 + \alpha_4 v_C + \alpha_5 t); \quad (15)$$

$$p = \alpha_6 (t_r + 273) v_C / [m_4 v_C (\alpha_7 - \alpha_8 \gamma_{CO}) + \alpha_9 \delta p], \quad (16)$$

де $\alpha_0, \dots, \alpha_9$ - коефіцієнти;

v_C - швидкість зневуглицювання, %/хв.;

γ_{CO} - масова частка вуглецю ванни, що окислюється до CO у порожнині конвертера за рахунок кисню дуття, що чисельно збігається із значенням об'ємної частки;

δp - розрідження у нижній порожнині кесона, Па.

Можливі два підходи до визначення вихідних параметрів: побудова багатоканальної системи розпізнавання технологічних ситуацій або складання системи рівнянь контролю ходу продувки з використанням кількох параметрів.

При використанні принципу двоохвильового розпізнавання на нижньому рівні здійснюється розпізнавання ситуації окремо по кожній вимірюваній змінній, а остаточне рішення формується на другому етапі з урахуванням загальної кількості непрямих параметрів, що обробляються, та інформативності кожного з них.

Збільшення надійності розпізнавання досягається за рахунок структурної надмірності багатоканальних систем контролю і незалежності вибірки індивідуальних рішень за всіма інформаційними каналами.

Перший підхід використано для визначення моменту переходу до періоду зневуглецювання при низьких масових частках, коли остаточна частка вуглецю пропорційна швидкості його окислення. Як параметри використовували точки кривої зміни швидкості зневуглецювання, що визначається за складом і тиском газу, який відходить, поверхневою щільністю теплового потоку на фурму та кесон. Як ситуації прийняли наявність переходу до періоду зневуглецювання нижче критичних масових часток. Цей підхід дозволив збільшити точність контролю масової частки вуглецю в метали в межах його кількості 0,20...0,45 % на 0,015 %.

Реалізація другого підходу здійснена при визначенні динамічних параметрів плавки. Система рівнянь включає чотири рівняння, що складені на основі балансу кисню і теплових балансів ванни конвертера, газів на виході з горловини конвертера і для частини перехідного газоходу ОКГ. Розв'язуючи її, знаходимо швидкість зміни температури ванни, швидкості зневуглецювання металу і вигорання заліза та коефіцієнт, що характеризує ступінь допалювання CO до CO₂. Експериментальна перевірка динамічної моделі показала задовільне відображення системою процесів, які проходять у ванні конвертера.

Безперервне визначення вихідних параметрів плавки дозволяє організувати оптимальне управління останньою. Зміна керуючих параметрів може привести до зовсім різної зміни вихідних параметрів процесу, наприклад залежність вмісту (FeO) в шлаці від параметрів дуттьового режиму (інтенсивності продувки і відстані торця фурменого кінцевика до рівня спокійного металу) має екстремальний характер.

Фізико-хімічну основу виробництва сталі в конвертері складають процеси окислення домішок чавуну, в першу чергу вуглецю. Але контроль зневуглецювання за моделлю без зворотного зв'язку приводить до помилок у випадку порушень в технологічному процесі, що викликає зміну ступеня окислення вуглецю внаслідок перерозподілу кисню між вуглецем та іншими домішками чавуну.

Досліджена можливість контролю швидкості зневуглецювання ванни конвертера за інформацією про амплітудно-частотну характеристику газів, що відходять. Модель контролю має вигляд

$$v_c = 0,169 \cdot 10^{-6} (V_{kc} + V_r) \Delta p_1 f_1 - 0,536 k \delta p, \quad (17)$$

де V_{kc} , V_r - об'єми відповідно кесона та підйомного газоходу, м³;

Δp_1 - амплітуда коливань тиску газу в верхній частині підйомного газоходу, Па;

f_1 - частота коливань тиску газу в верхній частині підйомного газоходу, Гц;

k - коефіцієнт пропорційності, що визначає кількість повітря, яке підсмоктується при нормальних умовах в залежності від розрідження у нижній порожнині кесона, Па.

Для зменшення впливу перешкод і одержання максимального сигналу виміри проводять на частоті, що відповідає резонансній вільного об'єму конвертера.

Досліджена також можливість контролю швидкості зневуглицювання за інформацією про температуру газу в перехідному газоході, що вимірюється пірометром селективного поглинання в ближній інфрачервоній зоні випромінювання, теплову роботу газового тракту ОКГ, перепад тиску газу в перехідному газоході, зміну маси конвертера в процесі продувки. Застосування відповідних моделей зменшило помилку визначення швидкості зневуглицювання.

Складені алгоритми визначення масової частки вуглецю у ванні конвертера, що засновані на співвідношеннях балансових, за характером зміни швидкості зневуглицювання або інших вихідних параметрів, а також комбінації обох ознак (останні мають найменшу помилку). Комбінована модель визначення масової частки вуглецю у ванні 130-тонного конвертера по ходу продувки для ЄМЗ має вигляд

$$C = \alpha_1 [\xi - (1/m_c) \int_{(r)} (0,00356 - 0,00155m_{\text{л}} + 0,00261m_{\text{НК}} + 0,00193m_{\text{Н}} + 0,0186m_{\text{Ш}} + 0,00443\alpha_{\text{v}}v + 0,00164\alpha_{\text{v}}p - 0,000127t_{\text{Г}})dt] + \alpha_2 [-0,25 + 0,539\rho_{\text{к}}v_{\text{макс}}/p_{\text{макс}}v_{\text{к}} + 0,012H_{\text{к}}/H_{\text{макс}} + 0,01(1/p_{\text{макс}})dp/dt + 0,131 t_{\text{Г,к}}/t_{\text{Г,макс}}], \quad (18)$$

де α_1 , α_2 , α_v , α_{v_c} - коефіцієнти впливу на вміст вуглецю співвідношень балансового та за швидкістю зневуглицювання і на швидкість зневуглицювання балансу за киснем та за вуглецем;

ξ - коефіцієнт, що визначається неконтрольованими повільно змінюваними параметрами з урахуванням досвіду попередніх плавок, %;

$t_{\text{Г}}$ - температура газу в перехідному газоході, $^{\circ}\text{C}$.

Тут індекси "к" і "макс" відповідають значенню параметра в кінці продувки та у мить досягнення максимуму тиску.

При умові виконання рекомендацій по шихтовці і виключенню плавки, що проведені з порушенням технології продувки, стандартне відхилення параметра склало 0,024 %.

Важливим параметром конвертерної плавки є температурний режим продувки. Для безперервного контролю температури розроблено пірометричний пристрій, що складається з радіаційного пірометра, який зв'язаний крізь отвір у футеровці конвертера на поверхню металу. Для запобігання заметалювання візирної труби її продувають сумішшю окислювального (повітря) та нейтрального (аргон) газу.

Досліджена також можливість безперервного контролю температури ванни конвертера за інформацією про швидкість поширення ультразвуку в металевому розплаві. Джерело та приймач ультразвукових коливань встановлювали в отворах футеровки конвертера на горизонті, який піддається мінімальному зношенню (для 130-тонних конвертерів - 5-й, 6-й ряд цеглин від днища). Як джерело і приймач випромінювання використали п'єзомагнітний складений вібратор з насадкою

з дібориду цирконію, частота випромінювання 49 кГц, потужність 100 В · А в імпульсі.

Промислові випробування методу показали, що помилка контролю температури ванни у порівнянні з вимірами зондом не перевищувала 26 °С.

Запропоновані методи безперервного контролю температури ванни конвертера дуже трудомісткі, і тому їх доцільно використовувати тільки при дослідженнях процесу для відпрацювання нової технології.

Результати досліджень параметрів шихти, дуттьового режиму і газу, що відходить, використані для складання рівняння розрахунку поточної температури ванни за ходом продувки:

$$t = \Delta t + 0,78t_f - 11,5G_{ИК.нр} + \sum_{i=1}^6 F_i, \quad (19)$$

де Δt - поправка за досвідом попередніх плавок, °С;

$G_{ИК.нр}$ - приведена маса вапняку на плавку, т;

$F_1 \dots F_6$ - відповідно функції, що визначаються процесом теплової обробки брухту в конвертерній ванні, відстанню від фурменого кінцевика до рівня спокійного металу, розходом та об'ємом кисневого дуття, вихідними динамічними параметрами газу, що відходить, тепловтратами на нагрів конвертера, °С (значення функцій наведено в дисертації).

Модель розрахунку поточної температури ванни за ходом продувки введена в експлуатацію на КМК і комбінаті ім.Ліліча. Вона показала добру збіжність з експериментальними даними і забезпечила точність одержання розплаву заданої температури не нижче 1 %.

Фізико-хімічні процеси, що відбуваються в конвертерній ванні, в значній мірі визначаються процесом шлакоутворення. Динаміка формування реакційноздатного гомогенного шлаку залежить від його рідкорухливості, що регулюється параметрами дуттьового режиму і шихтовкою плавки. Неоптимальний вибір цих параметрів призводить до утворення густих гетерогенних шлаків з великими значеннями вмісту кремнезему і в'язкості.

Основним недоліком відомих методів контролю шлакоутворення є те, що для прогнозування складу шлаку використовуються початкові умови (хімічний склад, температура і маса шихтових матеріалів) та керуючі параметри процесу (інтенсивність продувки, відстань сопла фурми до рівня спокійного металу та ін.).

Досліджені вихідні параметри процесу, що можуть бути використані для контролю режиму шлакоутворення як зворотний зв'язок (параметри теплової роботи водоохолоджуючого устаткування і газу, що відходить, шлакове нашарування на фурму і внутрішню порожнину конвертера, електроопір прикордонних шарів футеровки).

Дослідження, що проведені на 130-т конвертерах, дозволили отримати залежність між прирощенням відношення проміжку часу реакції відповідно електроопору (τ_1) і температури прикордонних шарів (τ_2) на різкий температурний

вплив у агрегаті у порівнянні з початковим значенням, яке визначено при заливці чавуну, і станом шлаку:

$$(\text{FeO}) = 29,5 - 308[0,252 - \Delta(\tau_1/\tau_2)]^2. \quad (20)$$

Залежність (20) використана в алгоритмі управління режимом шлакоутворення. Промислові випробування алгоритму проводились на ЄМЗ і комбінаті “Азов-сталь” і дали такі результати: кількість контрольованих плавок збільшилась на 12 %, кількість плавок, що супроводжувались слабкими та сильними викидами, зменшилась відповідно на 10 і 5 %, маса шлакоутворюючих матеріалів зменшилась на 15 %, а витрати вогнетривів на 3 %.

Для контролю рівня ванни конвертера розроблена модель, яка зв’язує цей параметр з вібрацією фурми і виштовхуючою силою. Використання моделі збільшило кількість плавок, що попали в задані межі, на 5 %.

В розділі 6 наведено розробку математичної моделі управління технологічним процесом плавки. Основою математичного опису технології киснево-конвертерної плавки є розрахунок шихти (“статичне управління плавкою”). Маючи вибірку траєкторій управління успішно проведених плавок ($\vec{U}_1[\tau], \dots, \vec{U}_n[\tau]$), можна виділити в реальній траєкторії управління $\vec{U}_i[\tau]$ дві складові: програмну частину $\vec{U}_{i, \text{пр}}[\tau]$ і додаткове управління $\Delta \vec{U}_i[\tau]$, що зв’язане як з неточним визначенням початкового стану плавки, так і з дією перешкод. Таким чином, стратегія управління не може бути зведена тільки до детермінованої, а містить детерміновану частину по вибору програми і стохастичну для додаткових керуючих впливів.

При проведенні плавок, спостерігаючи за діями різних перешкод на якість металу і оцінюючи по непрямим спостереженнях відхилення ходу плавки від нормального, дистрибуторщик дослідним шляхом знаходить додаткове управління $\Delta \vec{U}[\tau]$, яке найефективніше діє в кожному окремому випадку. Цей досвід дистрибуторщика зафіксовано за допомогою матриці імовірностей вибору додаткового управління $\Delta \vec{U}_i[\tau]$ при наявності визначеного впливу $\Delta \vec{Z}[\tau]$.

Алгоритм роботи системи визначає виконання таких етапів:

1. На першому етапі здійснюється фільтрація плавок з недостовірною інформацією. Критеріями достовірності даних при цьому є межі зміни параметрів.
2. На другому етапі на основі бази даних, що не містить недостовірної інформації, здійснюється вибір масиву плавок позитивного досвіду за такими критеріями “близькості”, як шихтовка плавки і необхідні вихідні параметри металу на повалці.

Масив плавок, що одержано, використовується при реалізації статичної та динамічної моделі прогнозу. Для уточнення моделі прогнозу плавок, які відносяться за критерієм “близькості” до одного класу, враховували прирощування параметрів моделі у порівнянні з середніми значеннями в класі.

Модель включає рівняння розрахунку шихти, що складені у приращеннях параметрів з використанням досвіду кращик дистрибуторщиків. Для забезпечення однакових умов протікання продувки також визначають заданий дуттьовий режим. Для виключення впливу параметрів, що повільно змінюються (розгар і заростання горловини, зношення фурменого кінцевика та ін.), в рівняння введені поправочні коефіцієнти по об'єму дуття на плавку, масі вапняку, вапна і шпату, які дорівнюють за абсолютною величиною помилці розрахунку відповідних компонентів на попередній плавці та протилежні за знаком.

Багатокомпонентне порційне дозування сипучих матеріалів проводиться в залежності від температурних умов процесу. Температурний режим на початку продувки визначається кількістю теплоти, що акумульована футеровкою конвертера і витрачається на розплавлення брукху за інформацією про число плавок по футеровці і насипну щільність брукху. Після виміру температури ванни і визначення масової частки вуглецю зондом (в цехах, де встановлено вимірвальний зонд) при необхідності розраховується добавка вапняку, що коректує плавку.

Випробування моделі проводилось на 160-тонних конвертерах ЄМЗ. При виконанні рекомендацій по шихтовці та відсутності порушень в технології плавки система показала такі результати: для сталей з масовою часткою вуглецю нижче 0,12 % середньоквадратичне відхилення склало 0,042 %, причому у 85 % проведених плавок помилка не перевищувала $\pm 0,05$ %. Кількість плавок з відхиленням за температурою ± 15 °С склала 72 %. Контролем охоплювалось близько 90 % плавок, рекомендації виконувались на 85 % плавок. Кількість плавок, що не вимагали коректуючих додувок, збільшилась з 43,6 до 66 %.

В ході продувки як керуючі впливи розраховувались інтенсивність продувки, відстань кінцевика фурми до рівня спокійного металу, добавки шлакоутворюючих та охолоджуючих матеріалів як за масою, так і за моментом введення їх у конвертер. Вихідні параметри, по яких ведеться управління продувкою, - шлак заданої рідкорухливості та маси. Найбільш тісно зв'язаними з цими параметрами виявилися сигнали акустичної характеристики продувки і кількості теплоти, що винесена з водою, яка охолоджує фурму.

Алгоритм управління продувкою в динамічному режимі з елементами замкнутого управління складено з урахуванням позитивного досвіду по каналах інтенсивності продувки, положення фурми і дозування сипучих матеріалів.

Управління інтенсивністю продувки зводиться до визначення її фіксованих значень по ходу продувки. Виходячи з умов нормального шлакоутворення і виключення переокислювання ванни при переході до періоду інтенсивного зневуглюцювання визначається максимально можлива інтенсивність продувки (v_H , м³/хв.) у перший період за інформацією про фізичну і хімічну теплоту чавуну, а також кількість теплоти, що відбирається на плавлення брукху:

$$v_H = v_H^0 + 115 \lg t_f / t_c^0 + 216 \lg Si_f / Si_c^0 + \gamma_1 - \gamma_1^0, \quad (21)$$

де γ_1 - коефіцієнт, що визначається насипною щільністю брухту і дорівнює нулю для важкого брухту, - 25 для середньої щільності та - 50 для легковагового брухту, м³/хв.; γ_2^0 - індекс параметра у плавці позитивного досвіду.

Подальше управління інтенсивністю продувки здійснюється за швидкістю зневуглецювання, що визначається одним на приведених у розділі 5 методом. Інтенсивність продувки у період швидкого зневуглецювання змінюють, виходячи з умов пропускної спроможності газовідвідного тракту, яку контролюють по температурному лінійному розширенню екранних труб газоходу ОКГ (ΔL , мм):

$$v = v^0 + 982 (v_c^0 - v_c) + 39,4(\Delta L^0 - \Delta L). \quad (22)$$

Алгоритм управління положенням фурми складено для випадку проведення плавки з залишенням частини кінцевого шлаку попередньої плавки. Цей шлак характеризується високим вмістом компонентів, що сприяють прискоренню наведення шлаку на початку продувки. При цьому забезпечується високий ступінь засвоєння вапна і, отже, десульфуратції, збільшення виходу годного і стійкості футеровки конвертера, зменшення кількості шлакоутворюючих.

У першому періоді продувки відстань кінцевика фурми над рівнем спокійної ванни (H_H , калібр) визначається в залежності від маси залишеного шлаку ($m_{ШЛ}$), насипної щільності брухту і інтенсивності продувки:

$$H_H = H_H^0 - 0,85(m_{ШЛ} \cdot m_{ШЛ}^0) + \gamma_2 - \gamma_2^0 + 0,89(\sqrt{v_H} - \sqrt{v_H^0}) + \Delta H', \quad (23)$$

де γ_2 - коефіцієнт, що визначається насипною щільністю брухту і дорівнює 3 у випадку легковагового брухту, 0 - при середній щільності брухту і - 0,75 для важковагового брухту, калібр;

$\Delta H'$ - поправка в положення фурми, калібр.

Тривалість першого періоду визначається за об'ємом продутого кисню, який порівнюється з заданим значенням.

Хід шлакоутворення контролюється по сигналах про акустичну характеристику продувки (рівень метало-шлако-газової емульсії) і нашарування шлаку на фурмі (його консистенція). Свідченням наведення шлаку є наявність сигналів

$$(A_j - A_{j-1}) < 0; \quad (24)$$

$$\Delta \tau_H - \Delta \tau < 30, \quad (25)$$

де A - сигнал акустичної характеристики продувки, %;

$\Delta \tau_H$, $\Delta \tau$ - початкове і поточне значення проміжків часу між різкими змінами температурного режиму в робочому просторі конвертера і відповідними змінами температурного перепаду охолоджуючої води на фурмі, с.

У другому періоді відстань кінцевика фурми відносно рівня спокійної ванни установлюють рівною значенню у плавці позитивного досвіду $H = H^0$. У випадку відхилення режиму шлакоутворення від плавки позитивного досвіду коректується положення фурми:

$$\Delta H = -3,8 + 0,36(A - A^0) - 0,022[\Delta\tau_H - \Delta\tau] - (\Delta\tau_H - \Delta\tau)^0. \quad (26)$$

При дуже рідкому шлаку разом із зменшенням положення фурми вводиться добавка вапна питомої маси $m_{y,H} = 0,0025 + 0,165m_{y,ШЛ}$ і збільшується інтенсивність продувки $v = 1,15v^0$, при дуже густому - разом із збільшенням положення фурми вводиться добавка плавикового шпату $m_{y,Ш} = 0,0025 - 0,072m_{y,ШЛ}$.

Кінцеве значення положення кінцевика фурми відносно рівня спокійної ванни установлюють на рівні плавки позитивного досвіду.

Розраховану масу залишеного в конвертері шлаку визначаємо за формулою

$$m_{ШЛ}^p = 0,0523 \left(\int_{\tau_{111}}^{\tau_{пр}} A d\tau - \int_{\tau_{111}}^{\tau_{пр}} A^0 d\tau \right) + m_{ШЛ}^0, \quad (27)$$

де τ_{111} - початок останнього (третього) періоду продувки поточної плавки, хв.

Синхронізація процесів окислення вуглецю та нагріву ванни досягається так. Відомо, що для сприятливого ходу процесу рафінування температура металу підтримується в межах від 40 до 100 °С над лінією ліквідусу по діаграмі стану Fe-C. Такий перегрів металу створює найбільш ефективні умови для хімічних реакцій і, крім того, забезпечує нормальний стан футеровки конвертера.

У ході продувки безперервно визначають відхилення температури ванни від нормальної. Остання розраховується як сума температури ліквідусу й оптимального перегріву. У свою чергу, температура ліквідусу однозначно визначається масовою часткою вуглецю у ванні конвертера.

Модель впроваджена у конвертерному цеху ЄМЗ.

В результаті досліджень і досвіду промислової експлуатації АСУ установлено, що використання моделі управління конвертерною плавкою дозволяє зменшити тривалість плавки на 1,5 хв., вигар заліза на 0,5 % і брак на 1 %, збільшити стійкість футеровки конвертера і зменшити кількість вогнетривів на 3 %, збільшити кількість контрольованих плавок на 10 % і зменшити кількість феросплавів на 1 %.

Доводка розраховується в два етапи. На першому по плавці позитивного досвіду розраховуються якісні характеристики керуючих впливів, такі, як положення фурми (додувка з піднятою фурмою або з фурмою в нормальному положенні), введення охолоджувачей, необхідність проведення додувки. На другому етапі розраховуються кількісні характеристики такі, як об'єм кисню (ΔV_o , м³) і кількість охолоджувачей ($\Delta m_{ИК\delta}$):

$$\Delta m_{ИК\delta} = \Delta m_{ИК\delta}^0 - 0,045(\Delta t^0 - \Delta t) - 4,5(\Delta C^0 - \Delta C); \quad (28)$$

$$\Delta V_{\delta} = \Delta V_{\delta}^0 - [f(C_M^0) - f(C_M)] - 100(\Delta m_{\text{ИК.}\delta} - \Delta m_{\text{ИК.}\delta}^0); \quad (29)$$

$$\Delta H_{\delta} = \Delta H_{\delta}^0 - 0,066(\Delta m_{\text{ИК.}\delta} - \Delta m_{\text{ИК.}\delta}^0); \quad (30)$$

$$\Delta \tau_{\delta} = \Delta \tau_{\delta}^0 - 0,5(\Delta m_{\text{ИК.}\delta} - \Delta m_{\text{ИК.}\delta}^0); \quad (31)$$

$$\Delta V_{H,\delta} = \Delta V_{H,\delta}^0 + 318 (\Delta \tau - \Delta \tau_{\delta}^0), \quad (32)$$

де Δt - потрібна зміна температури при додувці, $^{\circ}\text{C}$;

ΔC - потрібна зміна частки вуглецю при додувці, %;

ΔH_{δ} - прирошування відстані від кінцевика фурми до рівня спокійного металу при додувці, які еквівалентні по охолодженню добавці вапняку, м;

$\Delta \tau_{\delta}$ - тривалість коректуючого нагріву при додувці, хв.;

$\Delta V_{H,\delta}$ - об'єм кисню на нагрів при додувці, м^3 .

При наявності проміжних вимірів частки вуглецю та температури ванни, наприклад, зондовим засобом можна провести коректуючий розрахунок продувки. Плавку коректують після повного розплавлення брухту, тобто на заключному етапі продувки, тому що з цього моменту інформація про температуру розплаву і масову частку вуглецю характеризує усю ванку. Коректування проводиться за рівняннями (28)...(32).

Модель розкислення містить розрахунок грубої та точної дози розкислювачів і безперервне коректування коефіцієнта засвоєння елемента розкислювача за плавками позитивного досвіду. Модель реалізована в АСУТП конвертерної плавки на ЄМЗ і комбінаті ім. Ілліча. Її використання дозволило забезпечити економію феросплавів в середньому на 25 кг на плавку, що при частці витрат на розкислювачі в собівартості виплавки сталі до 1,5 % складає вагому суму.

Наведені моделі оперативного та періодичного коректування рівнянь.

В розділі 7 наведені результати розробки та впровадження автоматизованої системи управління конвертерної плавкою.

На основі широкого використання уніфікації і типізації проектних рішень розроблена багаторівнева ієрархічна система управління киснево-конвертерним виробництвом сталі, що реалізує функції АСУТП і АСУП, які поєднані по цільовому критерію і процедурах обробки інформації.

Система управління спроектована за децентралізованим принципом і відрізняється від аналогів засобами, моделями та пристроями контролю і управління параметрами, тісним зв'язком розрахунку шихтових матеріалів з управлінням дуттьовим і температурним режимом, а також режимом шлакоутворення, що передбачає зв'язане регулювання в замкнутому режимі керуючих впливів по розходу кисню, положенню фурми та ритму подачі сипучих.

Система управління технологією киснево-конвертерної плавки в статичному режимі здійснює зв'язане регулювання дуттьового, температурного і шлакового режимів на основі інформації про початкові, поточні та кінцеві параметри процесу. Перша система статичного управління була розроблена нами в 1964 році для конвертерного цеху КМК з конвертерами ємкістю 50 тонн. Система являла собою аналоговий пристрій (АП) "Кислород", що розміщувався на кожному конвертері і

виконувався на феродинамічній апаратурі. Інформація про початкові й задані кінцеві параметри продувки вводилась в пристрій вручну, інформація про положення фурми, інтенсивність дуття та його тиск - автоматично. АП реалізовував балансово-статистичний алгоритм, який являв собою систему рівнянь, що описують матеріальний і тепловий баланси плавки з урахуванням статистичних залежностей. Система рівнянь доповнена рівняннями кількості сталі, а також ефективності продувки і сумарної ефективної кількості кисню.

До початку продувки оператор вводив за допомогою відповідних задавачів, що розміщені на передній панелі пристрою, хімічний склад і температуру чавуну, масу чавуну і брухту, значення вмісту вуглецю та температури сталі, основності кінцевого шлаку і ефективності продувки. Остання задавалась за досвідом попередніх плавок. Інформація про кількість плавок за футеровкою і тривалість процесу конвертера визначалась пристроєм автоматично.

АП розраховував потрібну кількість руди, вапна і кисню на плавку; видавав рекомендації на момент введення другої добавки; прогнозував момент закінчення продувки на заданому значенні частки вуглецю в сталі, її температури і основності кінцевого шлаку. По ходу продувки по інформації про тиск кисню перед фурмою та її положення відносно конвертера автоматично визначали ефективні витрати кисню і фіксували на вимірювальному приладі. За показниками приладу оператор за допомогою задавача розходу кисню керував дуттьовим режимом, підтримуючи поточний розхід кисню при визначеному положенні фурми у межах, при яких коефіцієнт ефективних витрат кисню дорівнював тому, що прийнятий при розрахунку шихти.

Промислові випробування системи показали, що кількість плавок з помилкою у визначенні вмісту вуглецю, яка не перевищувала 0,05 % [C], складала 72,1 %, з помилкою у визначенні температури, що не перевищувала 15 °С, складала 74,3 %, що злиті з першої повалки, складала 56,8 %. Відхилення по основності не перевищувало $\pm 0,18$. Час напрацювання на відмову склав понад 5000 годин.

У 1968 році аналогічна система впроваджена на 100-т конвертерах ЄМЗ.

Фактором, що істотно знижував якість управління, була відсутність вірогідної інформації по багатьох вхідних параметрах, зокрема по масі брухту. При обробці результатів експлуатації АП визначено, що понад 19 % плавок мали від'ємний тепловий баланс, тобто при шихтовці плавки в конвертер вноситься недостатня кількість тепла. Це мало місце в тому випадку, коли шихтовка вміщувала надлишок брухту при низьких значеннях частки кремнію в чавуні та його температури.

Плавки з надлишком брухту погіршували ТЕП роботи конвертера і знижували точність управління за допомогою автоматизованої системи. Дослідження показали, що основна кількість випадків невиконання рекомендацій системи приходить на плавки з надлишком брухту в шихті.

При заміні АП на цифрову обчислювальну машину (ЦОМ) УМ-1 реалізовані більш складні алгоритми розрахунку шихти. Для розрахунку кисню, руди, вапна і плавикового шпату використана система рівнянь, що складені на основі балансових співвідношень за киснем, теплом і шлакоутворюючими з уточненням шляхом

регресійного аналізу. Для виключення збурюючих впливів, що повільно змінюються, рівняння складені в приростах параметрів по відношенню до попередньої плавки. Крім того, для управління плавками, що не збалансовані за теплом, розраховується тривалість нагріву ванни шляхом зміни параметрів дуттьового режиму, а для зменшення кількості таких плавок проводиться розрахунок кількості брухту для завантаження у совки.

Крім інформації, що вводилась в АП, в ЦОМ автоматично вводилась інформація про масу брухту і чавуну, його температуру і температуру сталі, масу сипучих матеріалів і розкислювачів, температуру і тиск газів, що відходять. Інформація про хімічний склад чавуну і сталі вводилась з пультів ручного вводу (ПРВ), що розміщені у квантометричній та експрес-лабораторіях.

УМ-1 працювала в режимі "порадника" оператора. При виконанні рекомендацій по шихтовці і відсутності порушень в технології плавки система показала такі результати: для сталей з вмістом вуглецю нижче 0,12 % середня абсолютна помилка склала $\pm 0,042$ %, причому на 85 % плавок помилка не перевищувала $\pm 0,05$ %; для сталей з вмістом вуглецю до 0,30 % абсолютна помилка $\pm 0,05$ % була у 80 % плавок. Кількість плавок з відхиленням по температурі ± 15 °C склала 72 %. Контролем охоплювалось близько 90 % плавок, рекомендації виконувались на 85 % контрольованих плавок. Без застосування системи кількість плавок, що вимагали коректування по вуглецю, склала 43,6 %, а загальна кількість плавок, які вимагали додувки для коректування плавки, - 66 %.

Подальше удосконалення статичної системи йшло в напрямку доповнення її алгоритмом та технічними засобами для розрахунку розкислювачів, заміни технічної бази ЕОМ (послідовно замінювалась на М-6000, СМ-2М, СМ1810). Зараз проводиться відпрацювання системи збору і обробки інформації на управляючому обчислювальному комплексі (УОК) на основі ПЕОМ IBM PC/AT.

Перша система з елементами динаміки розроблена для безперервного контролю вмісту вуглецю в ванні конвертера. В основі системи містився балансово-статистичний метод контролю, при якому вміст вуглецю визначали по балансу кисню з урахуванням досвіду попередніх плавок і з поправкою, що об'єднує в статистичному рівнянні контрольовані вхідні і вихідні параметри плавки, що істотно впливають на швидкість зневуглицювання в конвертерній ванні. Система реалізована на АП "Углерод" на 50 - і 130 - тонних конвертерах КМК відповідно в 1964 і 1966 роках і на 100-тонному конвертері металургійного комбінату ім. Ілліча в 1964 році. Системи успішно експлуатувались на протязі 5 років. В 1968 році в конвертерному цеху СМЗ впроваджена на АП система контролю вмісту вуглецю, що використовувала як балансово-статистичний метод, так і метод, який засновано на контролі характеру зміни вихідних параметрів плавки в кінці продувки. АП виконано в блочному варіанті. Блоки завдання й показання розміщені в посту управління конвертером на пульті оператора. Інформація про масу металошихти і сипучих вводилась в пристрій оператором з використанням ручних задавачів. Дані про температуру і тиск газів, розхід кисню і положення фурми вводилась автоматично за допомогою феродинамічних перетворювачів, що умонтовані в прилади контролю цих параметрів. Результати розрахунку по-

точного вмісту вуглецю в ванні виводились на шкалу блока показання, який видає сигнал про момент закінчення продувки. Система дозволяла провести повалку з точністю $\pm 0,05\%$ [С] приблизно на 80 % плавок.

У 1972 році впроваджена система контролю вмісту вуглецю на базі ЦОМ УМ-1 Система додатково здійснює автоматичний опит давачів температури чавуну і сталі, маси чавуну і сипучих матеріалів. Хімісклад чавуну і сталі вводився в систему з ПРВ, що розміщені в квантометричній лабораторії. Досвід попередніх плавок враховувався за більш складним алгоритмом. Збільшилась точність системи, але через низьку наробку на відмову УОК з УСО надійність системи спала.

У 1973 році на 130-тонному конвертері ЄМЗ впроваджена система з елементами динаміки на базі АП "МДК". Алгоритм управління включав статичний розрахунок шихти, контроль зміни хімічного складу і температури ванни в процесі продувки, управління дуттьовим і температурним режимами плавки для одержання заданих значень температури і хімічного складу металу. Розрахунок шихти виконували перед продувкою за сукупністю рівнянь теплового і матеріального балансу на основі інформації про початкові та кінцеві параметри процесу.

Контроль динаміки засновано на використанні безперервної інформації, яку одержують за допомогою давачів тиску газів в перехідному газоході ОКГ, температури факелу на виході з горловини конвертера, теплових потоків на фурму і кесон, розходу і чистоти кисню та ін. У процесі продувки безперервно розв'язується система диференціальних рівнянь, що характеризують баланс кисню в порожнині конвертера, теплові баланси ванни, газів на виході з горловини конвертера і в перехідному газоході ОКГ. Як результат визначалась кількість вуглецю, що вигорів, прирощування температури ванни і кількості заліза в шлаці. На основі розрахунків система видавала рекомендацію про присадку вапна або шпату в залежності від поточного значення окисленості шлаку, а також про присадку руди або підйом фурми, якщо температурний хід процесу відрізнявся від оптимального.

Промислові випробування системи показали такі результати. Середня помилка досягнення заданого вмісту вуглецю склала 0,034 %, заданої температури - 10,2 °С; кількість плавок, в яких помилка не перевищувала заданих меж, склала за вуглицем 86,9 %, за температурою 88,8 %, з одночасним одержанням заданих значень параметрів 82,8 % (на плавках, що проведені без порушення технології). Застосування системи дозволило збільшити на 15 % кількість плавок, що випущені з першої повалки, у порівнянні з статичною системою і на 35 % у порівнянні з ручним управлінням. Такі ж результати отримані при використанні АП, що реалізує алгоритм з елементами динаміки, на 130-тонному конвертері КМК.

У 1981 році система управління плавкою з елементами динаміки на базі спеціалізованого двохпроцесорного УОК М-6000 реалізована на конвертерах ЄМЗ. Крім параметрів, що контролювались АП, безперервно вимірювали склад і розхід газів, що відходять, автоматично вводили масу чавуну та його температуру, масу брукхту, температуру сталі, з ПРВ - інформацію про хімісклад чавуну, сталі і шлаку, номер совка з брукхтом при зважуванні, номери ковшів з чавуном. При зборі й первинній обробці інформації здійснюються виміри параметрів (35 вимірів на

один конвертер), фільтрація сигналів, обробка інформації від вимірювальних перетворювачів та ПРВ, перевірка вірогідності інформації, інтегрування й усереднення параметрів, вивід інформації на цифрові індикатори (ЦІ) і в локальні системи управління, аналіз інформації. Введення аналогових сигналів здійснюється від струмових або частотних перетворювачів, що знаходяться в первинних приладах. Введення ініціативних і пасивних дискретних сигналів здійснюється від локальних схем з рівнем дискретного сигналу "сухий контакт".

Замкнута система управління реалізована у вигляді трьохрівневої ієрархічної технічної структури. Вибір рівнів управління визначався принципом їх інваріантності. Нижній рівень - інформаційно-вимірювальні пристрої (давачі, перетворювачі, ПРВ, ЦІ та ін.) - реалізується на уніфікованих серійних приладах аналогової гілки державної системи приладів. Цей рівень є автономним і дозволяє продовжувати управління об'єктом в ручному режимі у випадку виходу з ладу середнього і верхнього рівнів.

Середній рівень складають функціонально і територіально розділені локальні підсистеми управління, що об'єднані єдиною сіттю з верхнім рівнем і виконані, наприклад, для СМЗ на елементній базі КТС ЛІУС-2 (зараз замінені на СМ1810). Передбачена також автономна робота цифрових локальних підсистем управління розходом кисню, положенням фурми, дозуванням і завантаженням сипучих матеріалів і феросплавів як у режимі стабілізації вихідних параметрів, так і в режимі програмного управління у випадку виходу з ладу верхнього рівня.

Верхня ланка ієрархії включає багатомашинний УОК на ПЕОМ ІВМ РС/АТ з великою номенклатурою периферійного і допоміжного устаткування для збору, обробки і подання технологічної інформації, у тому числі для настройки, навчання і видачі завдань в нижні рівні системи. Управління здійснюється в супервізорному режимі.

Система вирішує такі задачі:

а) прогнозування хімічного складу чавуну в міксері з виданням інформації на ЦІ майстра підготовки виробництва;

б) розрахунок завантаження конвертера з виданням завдань на дисплейний модуль (ДМ) оператора відповідного конвертера по масі брухту і сипучих матеріалів;

в) розрахунок об'єму кисневого дуття для виплавки заданої марки сталі з виданням рекомендацій на ДМ;

г) контроль параметрів процесу і управління дуттьовим, температурним режимом і режимом шлакоутворення;

д) визначення моменту припинення продувки;

е) розрахунок і дозування маси феросплавів з виданням інформації на ЦІ майстра цеху;

ж) формування і видання інформації на мнемосхему і прилади щита майстра підготовки виробництва;

з) друкування паспорта плавки і плавильного журналу;

к) оперативну і періодичну корекцію коефіцієнтів рівнянь.

Технічні характеристики системи такі:

Кількість, шт.:

параметрів, що вводяться в УОК	315
у тому числі	
аналогових	125
дискретних	190
параметрів, що вводяться в систему	
автоматично	220
регульованих	15
управляючих впливів в режимі ПЦУ, що передаються на виконавчі механізми	6
на задавачі САР	9
задач, що розв'язуються УОК	33
форм документів	13
Цикл, с:	
опитування давачів	2
розрахунку управляючих впливів	15
Об'єм пам'яті, що зайнятий інформаційною базою і програмами функціонування, байт	2 М

Економічний ефект АСУТП конвертерного виробництва досягається за рахунок випуску плавки за заданими марками сталі, збільшення виходу годного, покращання якості продукції (зменшується масова частка азоту в металі), економії матеріалів, часу продувки і робочої сили, а також підвищення ефективності управління внаслідок покращання інформаційного забезпечення експлуатаційного персоналу. Це приводить до підвищення ритмічності і координації роботи автоматизованого технологічного комплексу, попередження виникнення аварійних ситуацій, скорочення тривалості простою агрегатів з організаційних причин, підвищення коефіцієнта використання устаткування та ін. Крім того, функціонування АСУ приводить до важливих соціальних наслідків, вивільняючи обслуговуючий персонал від важкої рутинної роботи, поліпшуючи умови праці і змінюючи її характер.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Аналіз відомих математичних моделей, які описують поведінку конвертерної плавки, показує, що на цей час є досвід відтворення на моделі деякої "середньої" плавки. Завдання відтворення конкретних плавки принаймні, на порядок складніше через необхідність врахування великої кількості апріорно невідомих випадкових факторів, які впливають на хід плавки. АСУТП, що побудовані на базі відомих зарубіжних і вітчизняних моделей, успішно працюють тільки при усередненні шихтових матеріалів по хімічному складу, температурі і насипній щільності.

2. Проведена декомпозиція задачі контролю та управління конвертерною плавкою - множина керуючих впливів розбита на ті, що розраховуються до початку продувки, в процесі продувки, в періоди коректування плавки і її розкис-

лення в ковші. Запропоновано новий підхід до визначення масштабних коефіцієнтів цільової функції, що полягає у визначенні впливу на неї окремих коректуючих операцій по доводці плавки у випадку непопадання її в задані межі після першої повалки. Удосконалено критерій замкнутого управління плавкою, що забезпечує побудову нової траєкторії управління при відхиленні від оптимальних процесів знеуглецювання, нагріву і окисленості ванни та повернення процесу до старої траєкторії при управлінні процесом шлакоутворення.

3. Запропоновано і досліджено новий підхід до побудови цільової функції критерію оптимального управління з мінімізацією собівартості сталі, що полягає в поділі параметрів на три групи - витрачених на плавку матеріалів, початкових і кінцевих умов плавки, а також керуючих параметрів, які не зв'язані явно з собівартістю сталі, з подальшою ідентифікацією функції в кожній групі окремо. Одержані чисельні значення цільової функції оптимального управління з мінімізацією собівартості сталі. Реалізація оптимальних значень керуючих параметрів, які визначені методом найскорішого спуску за допомогою ПЕОМ, дозволила знизити собівартість сталі в середньому на 0,74 %.

4. На основі теоретичного й експериментального дослідження процесів хвилювання в ванні конвертера доведено зв'язок цих процесів з амплітудно-частотними характеристиками вихідних параметрів і можливість їх використання в АСУТП конвертерної плавки для контролю режимних параметрів.

5. На основі системного розгляду явищ переносу одержані співвідношення по кінетиці масо- і теплообміну, що використані в алгоритмах контролю і управління киснево-конвертерним процесом з зворотним зв'язком за результатами раніш проведених плавок. Ідентифікація показників кінетики процесу за експериментальними даними підтвердила постульовані гіпотези теоретичних викладок.

6. Одержали подальший розвиток методи контролю основних режимних параметрів процесу - швидкості знеуглецювання, температури, рівня ванни і режиму шлакоутворення. Як вихідні параметри, що мають тісний зв'язок з температурою і масовою часткою компонентів ванни, використані параметри газу, що відходить (хімсклад, розхід, тиск, температура, акустичний ефект, амплітудно-частотні характеристики пульсацій, електрофізичні властивості), водоохолоджуючого устаткування - фурма, кесон, екрани ОКГ (температурне лінійне розширення поверхонь нагріву і об'ємне розширення для теплоносія, температура холодоагенту, теплові потоки, вібрації).

7. Розроблена комбінована модель контролю швидкості знеуглецювання і вмісту вуглецю у ванні конвертера, особливстю якої є змінна структура по контролю обох параметрів, що використовує балансово-статистичний метод і характер зміни вихідних параметрів у процесі продувки як багатоканальну систему розпізнавання технологічних ситуацій. Модель забезпечує на плавках, що пройшли без порушення технології, стандартне відхилення 0,024 % [С].

8. Розроблена модель контролю і управління температурою ванни, яка відрізняється від відомих тим, що включає теплові втрати конвертера і чугуновізного ковша при наднормативному простоті останніх та параметри непрямого виміру температури і забезпечує точність не нижче 1 %.

9. Розроблені методи контролю режиму шлакоутворення, які відрізняються тим, що включають характеристики пограничних шарів футеровки, застосування яких в моделі управління плавкою дозволило збільшити кількість контрольованих плавок, зменшити кількість плавок, що супроводжуються викидами, знизити втрати шлакоутворюючих матеріалів і вогнетривів.

10. Розроблені нові методи контролю рівня ванни конвертера за вібрацією фурми і виштовхуючою силою, які збільшили кількість плавок, що попадають в задані межі, при використанні моделі управління на 5 %.

11. Запропоновано і досліджено новий підхід до проблеми побудови математичної моделі технологічного процесу, що заснований на спільному застосуванні детермінованих, імовірних і евристичних методів з наступною ідентифікацією моделі в процесі експлуатації по плавках позитивного досвіду. З використанням цього підходу розроблені:

- статична модель управління, що включає розрахунок шихти, стабілізацію глибини реакційної зони, режиму введення охолоджуючих і шлакоутворюючих матеріалів в конвертер;

- динамічна модель управління, що включає розрахунок параметрів дуттьового режиму по ходу процесу, а також коректуючих присадок шлакоутворюючих матеріалів за безперервною інформацією про шлакоутворення в ванні конвертера. Модель складена для найбільш загального випадку - продувки з залишенням частини шлаку від попередньої плавки;

- модель доводки плавки, що включає розрахунок кількості дуття для доведення плавки по вмісту вуглецю, а також параметрів дуттьового режиму при необхідності нагріти плавку та охолоджуючих матеріалів - при необхідності її охолодити;

- модель процесу розкислення, що включає розрахунок грубої і точної дози розкислювачів з безперервною корекцією коефіцієнтів вигару за результатами раніш проведених плавок;

- принципи оперативної і періодичної корекції коефіцієнтів моделей, що враховують зміни неконтрольованих збурюючих впливів і граничних умов, які прогнозуються в залежності від роботи АСУ, портфеля замовлень і стану устаткування, і збільшують кількість плавок, що випущені з першої повалки, на 7 %.

12. Розроблені і впроваджені:

- системи статичного управління киснево-конвертерною плавкою, що реалізують зв'язане регулювання дуттьового, температурного і шлакового режимів на основі інформації про початкові, поточні і кінцеві параметри процесу;

- системи з елементами динаміки і замкнутого управління, що використовують інформацію про непрямі параметри плавки. Особливість підходу до проблеми створення замкнутої системи управління полягає в комплексному пов'язанні на всіх стадіях рафінування, включаючи доводку плавки, фізико-хімічних, аеродинамічних і теплообмінних процесів. Система синтезує багатопараметричне оптимальне управління плавкою за узагальненою цільовою функцією, яка забезпечує мінімум собівартості сталі шляхом зв'язаного регулювання впливів по розході

дугтя, положенню продувної фурми, ритму введення сипучих матеріалів і розкислювачів.

13. Промислова експлуатація АСУТП на ЄМЗ, КМК, комбінатах "Азовсталь" та ім. Ілліча дозволила істотно поліпшити якість управління і ТЕП процесу: скоротити тривалість продувки на 1,5 хв., зменшити вилгар заліза на 0,5 %, брак до 1%; збільшити стійкість футеровки конвертерів, зменшити кількість вогнетривів на 3 %; збільшити кількість контрольованих плавок на 10 %; зменшити кількість феросплавів на 25 кг на плавку; збільшити частку плавок, що випущені без корекції, на 18 %.

Зміст дисертації опубліковано в таких основних роботах:

КНИГАХ:

1. Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. АСУТП производства стали в конвертерах. - К.: Техніка, 1991. - 180 с.
2. Богушевский В.С., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. Основы математического описания технологических процессов конвертерного производства стали.- К.: НПО "Киевский институт автоматики", 1992. - 168 с.
3. Богушевский В.С., Оробцев Ю.В., Рюмшин Н.А., Сорокин Н.А. Математическая модель АСУ конвертерной плавкой. - НПК "Киевский институт автоматики", 1995. - 212 с.

СТАТТЯХ:

4. Богушевский В.С. Исследование динамики кислородно-конвертерного процесса//Автоматизация металлургических производств. Динамическое управление кислородно-конвертерной плавкой. - К.: Ин-т автоматики, 1972. - С. 5 - 15.
5. Богушевский В.С. О возможности определения содержания углерода в ванне конвертера по скорости обезуглероживания//Автоматизация металлургических производств. Динамическое управление кислородно-конвертерной плавкой. - К.: Ин-т автоматики, 1972. - С. 49 - 53.
6. Богушевский В.С. О возможности представления процесса выгорания углерода линейной моделью//Комплексная автоматизация сталеплавильного производства. - К.: Техніка, 1973. - С. 5 - 7.
7. Богушевский В.С. Контроль температуры и содержания углерода в ванне кислородного конвертера//Комплексная автоматизация сталеплавильного производства. - К.: Техніка, 1974. - С. 11 - 15.
8. Богушевский В.С. Перспективы автоматизации конвертерного производства//Разработка и эксплуатация эффективных систем и средств автоматизации сталеплавильного производства. - К.: Ин-т автоматики, 1982. - С. 3 - 9.
9. Богушевский В.С. Перспективы автоматизации конвертерного процесса// Науч. и метод. тр. Киев. политехн. ин-та. - 1994. - Т.2. - С. 6-11.
10. Богушевский В.С. Опыт эксплуатации и перспективы развития АСУТП в конвертерном производстве // Автоматизация производственных процессов. - 1996. - №1. - С. 18 - 23.
11. Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Гончаров А.Н., Сколобанов А.В. Управление шлаковым режимом конвертерной плавки//Сталь. - 1985. - №3. - С. 22 - 26.

12. Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Беляев Е.И. Замкнутое управление шлаковым режимом кислородно-конвертерной плавки//Изв. АН СССР. Металлы. - 1985. - №5. - С. 25 - 29.

13. Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Беляев Е.И. Определение скорости обезуглероживания в ванне конвертера//Изв. вузов. Чер. металлургия. - 1986. - №2. - С. 18 - 21.

14. Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Лигоцкий И.Л. Теплообмен холодной металлозагрузки с расплавом в ванне печи//Изв. АН СССР. Металлы. - 1989. - №3. - С. 15 - 20.

15. Богушевский В.С., Сорокин Н.А. Расчет кислородно-конвертерной плавки с оптимизацией себестоимости стали//Сталь. - 1989. - №4. - С. 98 - 101.

16. Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Церковницкий Н.С. Контроль обезуглероживания и шлакообразования кислородно-конвертерной плавки по амплитудно-частотным характеристикам газовой фазы//Изв. АН СССР. Металлы. - 1990. - №6. - С. 15 - 20.

17. Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Лигоцкий И.Л., Церковницкий Н.С. Контроль обезуглероживания конвертерной ванны по термодинамическим параметрам состояния отходящего газа//Изв. вузов. Чер. металлургия. - 1990. - №8. - С. 87 - 89.

18. Богушевский В.С., Сорокин Н.А., Миски-Оглу А.Г. Критерий оптимального управления конвертерной плавки // Автоматизация производственных процессов. - 1995. - №1. - С. 56 - 65.

19. Сорокин Н.А., Богушевский В.С., Оробцев Ю.В. Математическая модель волнообразования в сталеплавильной ванне//Сталь.-1995.-№2.- С.15 - 20.

АВТОРСЬКИХ СВИДОЦТВАХ ТА ПАТЕНТАХ:

20. А.с. 857269 СССР, МКИ³ С21С. Устройство управления прекращением продувки конвертера/В.С.Богушевский (СССР).- №2847692/22-02; Заявлено 01.09.79; Опубл. 23.08.81, Бюл. №31. - 8 с.

21. Патент 7417 Україна, МКВ⁵ С 21 С. Пристрій контролю параметрів ванни конвертера/В.С.Богушевський, М.О.Сорокін, І.В.Присяжнюк, М.С.Церковницький (Україна). - №4618194; Заявл. 12.12.88; Вид. 29.09.95, Бюл. №3. - 6 с.

22. Патент 7421 Україна, МКВ⁵ С 21 С. Пристрій контролю процесу шлакоутворення у конвертері/В.С.Богушевський, А.М.Гончаров, М.О.Сорокін, М.С.Церковницький (Україна). - №4672365/22-02; Заявл.03.04.89; Вид.15.03.91, Бюл. №10. - 10 с.

23. Патент. 2026360 Российской федерации, МКИ⁶, С 21 С 5/30. Устройство определения момента слива металла из конвертера./Богушевский В.С., Лигоцкий И.Л., Церковницкий Н.С., Сорокин Н.А. (Украина). - №5016015/02; Заявл. 02.07.91; Опубл. 10.01.95. - 13 с.

24. А.с.775139 СССР, МКИ³ С 21 С 5/30. Способ контроля скорости обезуглероживания в ванне металлургического агрегата/ Ю.Л.Гребенчук, В.С.Богушев-

ский, Н.А.Сорокин, С.К.Соболев, В.М.Глуховская (СССР). - №2682570/22- 02; Заявлено 09.11.78; Оpubл. 30.10.80, Бюл. №40. - 3 с.

25. А.с. 909631 СССР, МКИ³ G 01 N 27/02. Способ контроля скорости обезуглероживания в металле в конвертере и устройство для его осуществления/ Ю.Л.Гребенчук, В.С.Богушевский, С.К.Соболев, Н.А.Цыбенко, Р.В.Ганефельд, А.И.Быстрый (СССР). - №2940003/02-22; Заявлено 13.06.80; Оpubл. 28.02.82, Бюл. №8. - 5 с.

26. А.с. 908833 СССР, МКИ³ С 21 С 5/30. Устройство контроля количества чугуна в миксере/В.С.Богушевский, Н.А.Сорокин, Е.И.Беляев, С.К.Соболев, А.В.Сколобанов (СССР).- №2822714/22-02; Заявлено 27.09.79; Оpubл.28.02.82, Бюл. №8. - 5 с.

27. А.с. 870444 СССР, МКИ³ С 21 С 5/30. Способ управления положением фурмы кислородного конвертера/В.С.Богушевский, Н.А.Сорокин, С.К.Соболев (СССР) - №2855443/22-02; Заявлено 21.12.79; Оpubл. 07.10.81, Бюл. №37. - 5 с.

28. А.с. 1002363 СССР, МКИ³ С 21 С 5/30. Устройство контроля момента появления шлака/В.С.Богушевский, Н.А.Сорокин, В.М.Глуховская, С.К.Соболев (СССР) - №3351579/22-02; Заявлено 08.10.81; Оpubл. 07.03.83, Бюл. №9. - 3 с.

29. А.с. 1047962 СССР, МКИ³ С 21 С 5/30. Устройство контроля температуры металла в конвертере/В.С.Богушевский, Ю.Л.Гребенчук, Н.А.Сорокин, В.А.Ясинский (СССР). - №3406279/22-02; Заявлено 02.03.83; Оpubл. 15.10.83, Бюл. №38. - 8 с.

30. Патент 13039 Україна, МКВ⁵ С 21 С. Пристрій контролю маси конвертера/ Богушевський В.С., Церковницький М.С., Гуца К.В., Сорокін М.О., Соболев С.К., Іванов Є.О., Ясинський В.О., Сорокін В.В., Степаненко М.Д. (Україна). - №95320327; Заявл..19.08.93; Вид. 10.01.97, Бюл. №1. - 6 с.

31. А.с.1097684 СССР, МКИ³ С 21 С 5/30. Устройство контроля содержания углерода в ванне конвертера/В.С.Богушевский, Н.А.Сорокин,В.М.Глуховская, Е.И.Беляев (СССР). - №3592714/22-02; Заявлено20.05.83; Оpubл. 15.06.84, Бюл. №22. - 10 с.

32. А.с. 1073290 СССР, МКИ³ С 21 С 5/30. Устройство контроля температуры металла в конвертере/В.С.Богушевский, И.С.Кочков, Н.А.Сорокин, С.К.Соболев (СССР). - №2968281/22-02; Заявлено 01.08.80; опубл. 15.02.84, Бюл. №6. - 7 с.

АНОТАЦІЯ

Богушевський В.С. Розробка математичних моделей і системи управління конвертерною плавкою. - Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 - автоматизація технологічних процесів. - Інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, Київ, 1997.

Дисертація присвячена питанням розробки математичних моделей, алгоритмів, способів і засобів контролю параметрів конвертерного процесу і створенню на їх основі системи контролю і управління. Проведено декомпозицію задачі контролю і управління конвертерною плавкою, розроблено критерій управління.

У відповідності з критерієм одержані математичні моделі управління виробництвом конвертерної сталі. Наведені результати досліджень технологічних закономірностей процесу, визначені параметри контролю і управління. Розроблена система управління конвертерною плавкою в статичному, динамічному і замкнутому режимах. Основні результати роботи впроваджені в експлуатацію на ряді металургійних комбінатів України.

Ключові слова: математична модель, алгоритм, контроль, управління, система, критерій, конвертер, плавка.

АННОТАЦІЯ

Богушевский В.С. Разработка математических моделей и системы управления конвертерной плавкой. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 - автоматизация технологических процессов. - Институт электросварки им. Е.О.Патона НАН Украины, Киев, 1997.

Диссертация посвящена вопросам разработки математических моделей, алгоритмов, способов и средств контроля параметров конвертерного процесса и созданию на их основе системы контроля и управления. Произведена декомпозиция задачи контроля и управления конвертерной плавкой, разработан критерий управления. В соответствии с критерием получены математические модели управления производством конвертерной стали. Приведены результаты исследований технологических закономерностей процесса, определены параметры контроля и управления. Разработана система управления конвертерной плавкой в статическом, динамическом и замкнутом режимах. Основные результаты работы внедрены на ряде металлургических комбинатов Украины.

Ключевые слова: математическая модель, алгоритм, контроль, управление, система, критерий, конвертер, плавка.

ABSTRACT

Bogushevsky V.S. Development of mathematical models and control system of BOF. - Manuscript.

Thesis for a doctor's degree by speciality 05.13.07 - Automation of technological processes.- E.O.Paton Electric Welding Institute of National Academy of Science of Ukraine, Kyiv, 1997.

The dissertation is devoted to the development of mathematical models, algorithms, control methods and means of the BOF's parameters, and to the creation of control system on their basis. The decomposition of problem of control by converter heat is fulfilled. The control criterion is developed. The mathematical models of the steel-making process control are got in accordance with the criterion. The results of the research of the technological conformity of the process are adduced. The control parameters are defined. The control system for converter heat is developed in static, dynamic

conditions and closed-loop control. The main results of this work commercialized at the number of metallurgical plants of Ukraine.

Key words: mathematical model, algorithm, control, system, criterion, converter, heat.

Підп. до друку 22.10.97. Формат 60×84/16. Папір офс. Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,86. Ум. фарбо-відб. 1,98. Обл.-вид. арк. 2,0. Зам. 412. Тираж 100.

Прим. _____

Редакційно-видавничий відділ з поліграфічною дільницею
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України
252022 Київ-022, проспект Академіка Глушкова, 40

121409

AV 38.708