ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ МЕТАЛУРГІЙНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

КОВШОВ Володимир Миколайович

# ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ДОМЕННОГО ПРОЦЕСУ З ВИКОРИСТАННЯМ СТВОРЕНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ЗАВАНТАЖЕННЯ ТА ГАЗОДИНАМІКИ ВЕРХНЬОЇ ЗОНИ ПЕЧІ

Спеціальність — 05.16.02 — «Металургія чорних металів»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ
1993

ЛННБ України ім.В.Стефаника
00814581 (R)

Робота виконана в Дніпропетровському металургійному інституті

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Логінов В. І.**,
доктор технічних наук, професор **Тарасов В. П.**,
доктор технічних наук, ст. н. сотр. **Товаровський І. Г.**

Провідне підприємство:
металургійний комбінат «Запоріжсталь»

Захист відбудеться « 1 » 06 1993 р.

в 12.30. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.02.02 Дніпропетровського металургійного інституту за адресою: м. Дніпропетровськ, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ДМетІ.

Автореферат розісланий « 31 » 03 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої ради,
доктор технічних наук,
професор ЦАПКО В. К.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

АБ-26.961

## Загальна характеристика роботи

Актуальність. Постійний зріст виробництва чорних металів та поліпшення їх якості є матеріальною базою технічного прогресу.

В теперішньому часі найбільш важливою задачою народного господарства є переведення економіки на інтенсивний шлях розвитку і більш раціональне використання виробничого потенціалу країни. Для рішення цієї задачі у чорній металургії необхідні розробки нових теоретичних та експеріментально обгрунтованих технологій та процесів, а також удосконалення існуючих.

Одним з основних напрямків розвитку доменного процесу в сучасних умовах вітчизняною і закордонною наукою та практикою визнано удосконалення завантаження доменних печей великого об'єму, що викликано існуючим резервом організації потоків шихти та газу, а також значними змінами якісного складу доменної шихти, які відбулися за останні 15-20 років. В залізорудній частині шихти з'явився новий вид сировини - обкотиші, які різко відрізняються за фізико-механічними властивостями від агломерату; якість самого агломерату поліпшилась при деякому погіршенні якості коксу із-за зростаючого дефіциту коксуючого вугілля. Все це обумовило виникнення проблеми раціонального співвідношення та розподілу нових компонентів шихти в доменній печі. Ця проблема може бути вирішена в основному за рахунок удосконалення завантаження шихти та оптимізації газодинамічного режиму доменної плавки шляхом поглибленого дослідження процесів методами фізичного та математичного моделювання.

Мета та задачі роботи. Теоретичні та експериментальні дослідження закономірностей взаємодії шихти та газу в доменній печі, розробка на їх основі адекватних математичних моделей розподілу шихти та газу, дозволяючих раціоналізувати процес завантаження і оптимізувати газодинамічний режим роботи доменних печей, забезпечуючий краще використання газового потоку, приводячий до збільшення виробництва печі та зменщення витрат коксу.

Для досягнення поставленої мети вирішувались слідуючі основні задачі:

- на основі теоретичного узагальнення результатів досліджень та технологічного досвіду були сформульовані та обгрунтовані раціональні принципи розробки математичних моделей завантаження та га-

зодинаміки доменної плавки;

- з урахуванням накопленого досвіду створювання математичних моделей були розроблені детерміновані та стохастичні моделі завантаження і газодинаміки доменної плавки, які дозволяють більш глибоко проаналізувати конкретні ситуації та видати технологічні рекомендації для покращення роботи доменних печей;

- в результаті удосконалення методів дослідження доменного процесу було виконано опис закономірностей розподілу газодинамічних характеристик шихти в об'єму доменної печі, визначених умовами завантаження, рухом та зміною фізичного стану шихти;

- для раціоналізації конструкцій завантажувальних пристроїв та оптимізації завантаження і газодинаміки доменної плавки були застосовані розроблені математичні моделі.

Наукова новизна. Теоретичні узагальнення основних положень газодинаміки дозволили розробити комплекс нових рішень по оптимізації завантаження та розподілу шихти і газу на колошнику.

Розроблена математична модель радіального розподілу шихти, яка відрізняється від уже існуючих повнотою охопленнятехнологічних факторів, реально діючих на процес.

Розроблені методи фізичного моделювання руху сипучих середовищ стосовно до доменного процесу. Отримані критеріально-емпіричні формули висипання шихти з кільцевої щілини "конус-чаша" та вантажних клапанів бункерів круглої та еліптичної форм для визначення початкової швидкості доменної шихти.

Запропоновані раціональні методи маневрування великим конусом та завантаженням обкотишів в доменну піч.

Розроблена математична модель газодинаміки верхньої зони доменної печі з урахуванням радіального розподілу шихти. Вперше запропонована емпірична формула для визначення порозності багатокомпонентної та полідисперсної доменної шихти; розроблен розрахунково-емпіричний метод визначення локальної порозності в рухомому шару шихти, за допомогою якого розкриті закономірності та отримана емпірична залежність для розрахунку радіального розподілу порозності в рухомій доменній шихті.

Вперше виявлені газодинамічні закономірності та зроблена оцінка впливу міжшарових зон на загальні втрати тиску в доменній печі; запропоновані оригінальні формули для визначення втрат тиску та газорозподілу в нерівномірно розподіленому шару шихтових

матеріалів. Запропоновані методи збільшення газопроникності шихти дозованим впровадженням проміжних фракцій в залізорудну частину шихти.

На основі системного аналізу розроблена ієрархічна структура доменного процесу, з якої виділені локальні підсистеми газодинаміки, базовані на стохастичних моделях та запропоновані методи їх оптимізації.

Сукупність отриманих результатів є теоретичним узагальненням в галузі завантаження та газодинаміки доменного процесу, яке спрямоване на рішення великої наукової проблеми збільшення ефективності доменного процесу, що має важливе народногосподарське значення.

Практична цінність роботи визначається рішенням наступних науково-технічних проблем:

- розробкою розрахункових методів радіального розподілу шихти та газу на колошнику доменної печі в реальних умовах;
- визначенням практичного рішення використання математичних моделей у поліпшенні конструкцій завантажувальних пристроїв та технології завантаження;
- пропозицією та реалізацією оригінальних методів керування завантаженням шихти шляхом ступінчатого опускання конуса;
- на основі математичного моделювання визначенням умов розпушування шихти під час руху, пропозицією і випробуванням на доменних печах розпушувачів, дозволяючих підвищити газопроникність шихти;
- розробкою ієрархічної структури параметрів доменного процесу, дозволяючих отримати локальні стохастичні моделі завантаження та газодинаміки доменної печі;
- з використанням стохастичних математичних моделей завантаження та газодинаміки пропозицією метода оптимізації, дозволяючим інтенсифікувати доменний процес в конкретних умовах.

Розроблені нові конструкції завантажувальних пристроїв та раціональні методи завантаження, забезпечуючі підвищення продуктивності та зниження витрат коксу, реалізовувались в межах республіканської комплексної цільової науково-технічної програми "Метал" Мінвузу СРСР, по програмам Мінчермету УРСР та металургійних заводів.

Реалізація результатів в промисловості. На доменних печах металургійного заводу ім. Петровського упроваджені: технологія доменної плавки з подачою до агломерату проміжних фракцій коксу, дозволяюча збільшити продуктивність печі на 1,1% і знизити витрати коксу на 1,4% за рахунок підвищення газопроникності шихти та поліпшення використання газового потоку; метод ступінчатого маневрування великим конусом, дозволяючий підвищити газопроникність верхньої зони печі, знизити дроблення шихти на колошнику і таким чином підвищити продуктивність печі на 1-1,5% та знизити витрати коксу на 0,2-0,4%; раціональний спосіб завантаження шихти, яка вміщує оптимальну кількість обкотишів, дозволяючий підвищити продуктивність печі на 2% при незначному зниженні витрат коксу.

На доменних печах Криворізького металургійного комбінату впроваджено: робота доменних печей 5,6,8 з оптимальними параметрами завантаження, які виявлені на основі статистичних моделей газодинаміки доменної плавки та послідовного симплексного пошуку, забезпечуючого підвищення продуктивності на 2% і зниження витрат коксу на 0,4%; робота доменної печі 7 з раціональними системами завантаження шихти, яка вміщує різну кількість обкотишів, зі збільшенням продуктивності на 2,8%; робота доменної печі 9 в період освоєння з раціональними системами завантаження, отриманими на основі оптимального пошуку, яка дозволює зменшити витрати коксу на 0,47%.

Результати досліджень використані УКРДІПРОМЕЗОМ при проектуванні безконусного завантажувального пристрою для доменної печі 6 металургійного комбінату "Криворіжсталь".

Загальний економічний ефект від впровадження технологічних розробок складає 1 млн. 602 тис. крб. за рік у цінах до 1990 р.

Теоретичні розробки автора упроваджені в учбовий процес кафедри металургії чавуну Дніпропетровського металургійного інституту у вигляді нового лекційного матеріалу, лабораторних робіт та методичних вказівок по науково-дослідним роботам студентів для спеціальності 11.01 - "Металургія чорних металів".

Апробація роботи. Доповідь про матеріали дисертації та їх обговорення були проведені на Всесоюзних і республіканських науково-технічних конференціях та семінарах: межвузовской научно-технической конференции по организации и регулированию хода до-

менного процесса.- Магнитогорск, апрель, 1968; первой республиканской конференции молодых ученых-металлургов.- Днепропетровск, январь, 1969; на научно-технической конференции "Газодинамика и механика движения шихты в доменных печах".- Свердловск, март, 1969; всесоюзной научной конференции "Теоретические основы металлургии чугуна".- Москва, январь, 1974; третьей республиканской научно-технической конференции молодых инженеров-металлургов.- Днепропетровск, декабрь, 1974; первой научно-технической конференции "Молодые ученые - научно-техническому прогрессу в металлургии".- Донецк, июнь 1977; всесоюзной научно-технической конференции "Пятилетке качества и эффективности - труд и поиск молодых металлургов".- Тула, октябрь, 1978; всесоюзном научно-техническом совещании "Проблемы автоматизированного управления доменным производством".- Киев, октябрь, 1979; всесоюзной научно-технической конференции "Теория и практика современного доменного производства".- Днепропетровск, май, 1983.

Результати роботи опробовані на науково-технічних семінарах кафедр металургії чавуну Дніпропетровського металургійного інституту, Московського інституту сталі та сплавів, Магнітогорського гірничо-металургійного інституту ім. Г.І. Носова, Дніпродзержинського індустріального інституту ім. М.І. Арсенічева; на об'єднаному засіданні кафедр теплотехніки металургійних печей та металургії чавуну Уральського політехнічного інституту ім. С.М. Кірова, доменного відділу Всесоюзного науково-дослідного інституту металургійної теплотехніки та лабораторії пірометалургійних процесів Уральского наукового центру АН СРСР.

Матеріали дисертації доповідались на щорічних науково-технічних конференціях заводу ім. Петровського та комбінату "Криворіжсталь".

Публікації. Основний зміст дисертації є опублікований в учбовому посібнику, монографії, 68 статтях та 20 авторських свідоцтвах на винахід.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається з 8 глав, включаючи вступ, 236 сторінок машинописного тексту, 65 ілюстрацій, 20 таблиць, список літератури з 193 найменувань та додаток на 16 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

1. Вступ

Поліпшення якості металу та збільшення випуску ефективних видів металопродукції в галузі виробництва чавуну можливо за рахунок удосконалення технології доменної плавки з метою подальшої інтенсифікації їх роботи та впроводження в експлуатацію більш потужних доменних печей.

Збільшення об'єму доменних печей в останні 20-25 років відбулося за рахунок більш прискореного росту поперечних розмірів профіля. Збільшення діаметра колошника доменних печей при одинаковій якості шихти збільшило проблему раціонального її розподілу.

Удосконалення завантаження як конусними, так і безконусними завантажувальними пристроями можливо при детальному досліджуванні цього процесу, коли відомий кількісний розподіл шихти по перерізу доменної печі. Подібне ж вивчання механізму завантаження шихти та отримання кількісних характеристик розподілу дає кінець кінцем математична модель, а тому створення математичної моделі розподілу шихти сучасними завантажувальними пристроями є актуальною задачою в загальній проблемі подальшого удосконалення доменного процесу.

Математичні моделі розподілу шихти і створення на їх основі розподілу газу в верхній зоні доменної печі надають можливість визначити напрями удосконалення технології завантаження в перспективних умовах, виявити нові раціональні методи та оптимізувати газодинаміку доменної плавки, що дозволить найбільш повно та економно інтенсифікувати процес.

В роботі проаналізовані можливі шляхи досягнення максимальної продуктивності та зниження витрат коксу. Аналіз показав, що найбільш раціональною є така послідовність робіт: дослідження та формалізація процесу завантаження доменних печей, обладнаних сучасними завантажувальними пристроями;

дослідження та математичний опис закономірностей розподілу газодинамічних характеристик шихти в об'ємі доменної печі, обумовлених завантаженням, рухом шихти та конфігурацією профіля печі;

розробка математичної моделі газодинаміки доменної печі;

вибір метода рішення та інтерпретація результатів для конкретних сучасних та перспективних умов доменної плавки;

залучення отриманих математичних залежностей для поліпшення та оптимізації газодинамічного режиму і роботи доменної печі;

впроводження раціональної технології завантаження та оптимального газодинамічного режиму роботи доменних печей.

Дисертація являє собою узагальнення наукових результатів, отриманих при виконанні науково-дослідних робіт в Дніпропетровському металургійному інституті за період з 1965 по 1991 роки.

В проведенні та упровадженні лабораторних і промислових експериментів автору допомогали співробітники Дніпропетровського металургійного інституту, металургійного заводу ім. Г.І. Петровського, металургійного комбінату "Криворіжсталь", УКРДІПРОМЕЗУ, Інституту чорної металургії АН України.

## 2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГАЗОДИНАМІКИ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

Для розробки математичних моделей руху газу була вироблена його класифікація в умовах доменної плавки. Рівняння руху газу виводили з класичних рівнянь Ейлера з урахуванням сил опору по методу академіка Жуковського при допомозі емпіричної формули Дарсі-Вейсбаха-Жаворонкова:

$$\vec{F} - \vec{F}_o - \frac{1}{\rho} grad\, P = d\vec{v}_r / d\tau, \qquad /1/$$

$\vec{F}$ - об'ємні сили, віднесені до одиниці маси;
$\rho, P, v_r$ - густина, тиск та швидкість газового потоку.

$$grad\, P = B\vec{v}_r^{\,1.8}, \quad \vec{v} = \vec{v}_r / |v_r|^{0.8}, \qquad /2/$$

де $B = 3{,}87 \rho h(x,y) \nu^{0.2} K_\varphi^{1.2}(x,y)(1-\varepsilon(x,y))^{1.2} / d_u^{1.2}(x,y)\, \varepsilon(x,y)\, g$,

$K_\varphi$ - коефіцієнт форми кусків шихти, $\varepsilon$ - порозність, $h$ - товщина залізорудного шару, $\nu$ - коефіцієнт в'язкості газу, $d_u$ - середній діаметр шихти, $g$ - прискорення вільного падіння, та $x, y$ - горизонтальна та вертикальна вісі координат.

Таким чином, рівняння Ейлера-Жуковського в кінцевім вигляді з добавленням умов нерозривності газового потоку, рівняння теплообміну, залежність густини газу від тиску та температури, а також зміна агрегатного стану шихти, розподілу тиску в усьому об'ємі печі:

$$\begin{cases} \vec{F} + B\vec{v}/\rho - (\mathrm{grad}\, P)/\rho = d\vec{v}/d\tau, \\ \nabla \vec{v} = 0, \\ \rho = f(T, P), \\ T = f(w_w, w_r), \\ B = f(\alpha_w, \varepsilon, \rho, h), \\ \alpha, \varepsilon, h = f(x, y). \end{cases} \qquad /3/$$

$T$ - температура, $W_w$ та $W_r$ - водяні еквіваленти шихти та газу.

Систему рівнянь /3/ розв'язували в конкретних межевих умовах методами електромоделювання.

Для підвищення влучності, швидкості та наочності розрахунку газорозподілу в залежності від систем завантаження було розроблено спрощену математичну модель газодинаміки шихти доменної печі для кожного шару подачі

$$\Delta P_{общ} = \sum_1^m (\Delta P_{a,i} + \Delta P_{k,i}) \qquad /4/$$

Втрати тиску в нерівномірно розподіленому шарі залізорудної частини подачі розраховувались за формулою

$$\Delta P_{a,i} = Q^{1.8} / \left(\sum_1^k (1/B_j)^{0.56}\right)^{1.8}, \qquad /5/$$

де $Q$ - загальна кількість колошникового газу. Оскільки шар коксу має газопроникність на порядок вищу ніж шар залізорудної частини подачі, то втрати тиску в ньому рахували як в рівномірно розподіленому шарі з дуже малою помилкою.

Розподілення швидкостей газового потоку в шахті доменної печі розраховується в кожному окремому шарі залізорудної частини подачі на основі відомого радіального розподілення шихти по товщині шару, крупності та порозності під час руху шихти. Шари коксу, які розділяють залізорудний матеріал, служать перерозподілителями газового потоку, оскільки газопроникність їх висока.

Нерівномірне розподілення швидкостей по радіусу, котре спостерігається в доменній печі, визначається з наступного виразу:

$$v_m = \frac{Q}{\bar{S}\bar{\varepsilon}} \left( \frac{(1-\bar{\varepsilon})\,\varepsilon(x,y)\,d_w(x,y)}{\bar{\varepsilon}\,(1-\varepsilon(x,y))\,\bar{d}_w} \right)^{(1+n)/(2-n)} \left( \frac{\bar{h}}{h(x,y)} \right)^{1/(2-n)}, \qquad /6/$$

де $n$ - величина, яка визначає режим руху газового потоку;
$\bar{S}$ - площа колошника. По цій формулі можна підрахувати значення локальних швидкостей в будь-якому місці по радіусу печі, якщо відомі емпіричні закономірності розподілення фізичних властивостей шихти: $\varepsilon$, $d_w$, $h = f(x, y)$ в об'єму доменної печі.

## 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЗАВАНТАЖЕННЯ ТА РОЗПОДІЛУ ШИХТИ НА КОЛОШНИКУ

Розподілення шихти на колошнику доменної печі визначає газодинаміку доменного процесу. Отже, щоб отримати кількісні закономірності для раціоналізації завантаження та оптимізації газодинамічного режиму роботи печі необхідно формалізувати процес формування шихтових матеріалів на колошнику.

Математичний опис розподілення шихти на колошнику розпадається на ряд задач, з яких основними є: знаходження траєкторії руху матеріалів з метою визначення місця зустрічі їх з поверхнею насипу і початкової швидкості шихти на укосі, визначення кутів укосу шихтових матеріалів на колошнику та визначення рельєфу поверхні насипу перед завантаженням чергової подачі. Рішення цих задач дозволило обконтурити шар залізорудних матеріалів і визначити зміну його товщини по радіусу та розподілення в об'єму доменної печі.

Для визначення траєкторії потоку шихти склали диференційне рівняння руху останьої з розподілителя /конусу, лотка/, з урахуванням принципу Даламбера:

$$m\,d^2L/d\tau^2 = \vec{F}_g - \vec{F}_r, \qquad /7/$$

де $m$ и $L$ - маса та переміщення шихти, $\tau$ - час руху шихти, $\vec{F}_g$ та $F_r$ - сили ваги та підпору газового потоку. Вирішували осесиметричну задачу в координатах $x$ та $y$ методом ітерації з початковими умовами: $x = 0$, $y = 0$, $\tau = 0$, $dx/d\tau = v_k \cos\alpha$, $dy/d\tau = v_k \sin\alpha$, де $v_k$ - швидкість шихти на кінці розподілителя, $\alpha$ - кут нахилу розподілителя. Отримані рівняння опису-

ють траєкторію падіння шихти та визначають точку зустрічі потоку шихти з поверхнею насипу.

Визначення кутів укосу шихтових матеріалів /$\alpha_{ст}$/ на колошнику при завантаженні зроблено з допомогою рішення диференційного рівняння руху шихти по поверхні насипу:

$$m\,d^2L/d\tau^2 = \vec{F}_в - \vec{F}_{тр} - \vec{F}_г, \qquad /8/$$

де $\vec{F}_{тр}$ - сила тертя. Рівняння вирішували після проектування сил на поверхню насипу з початковими умовами: $L = 0$, $\tau = 0$, $dL/d\tau = v_{но}$ - початкова швидкість шихти на укосі, яка визначається диференцуванням траєкторії по часу. При вирішуванні виходили з того, що шихта по поверхні насипу рухається паралельними шарами, а місце зупинки шара відповідає відстані центру ваги сектору або сегменту шихти від гребіня

$$tg^3\alpha_{ст} + \left(\frac{3K_в^2(v_к^2\sin^2\alpha + 2y(g - Bv_г^{1,8}\cos\alpha))}{2(R_к - z_п - l)(g - B_1 v_{гк}^{1,8})} - f\right)tg^2\alpha_{ст} + tg\alpha_{ст} - f = 0, \qquad /9/$$

де $K_в$ - емпіричний коефіцієнт відновлення механічної енергії шихти при ударі її о поверхню насипу, $R_к$ та $z_п$ - радіуси колошника та виклинювання подачі, $l$ - відстань від стінки колошника до гребіня шихти, $v_{гк}$ - швидкість газу на колошнику в шарі шихти, $f$ - коефіцієнт внутрішнього тертя. По цій же формулі розраховували кут укосу шихти до стінки колошника.

Положення лінії укосу відносно вісі печі визначається кутом укосу /9/ та положенням точки, де товщина нерівномірно розподіленого шару подачі наближається до середньої товщини подачі на колошнику $h_{ср} = M/\rho_ш \pi R_к^2$, де $\rho_ш$ - насипна маса шихти.

Таким чином, вираження /7/, /8/, /9/ використовувались для отримання рівняння верхньої лінії насипу $L_о = f_1(R_к)$, яка апроксимувалась кривою третього ступеню. Рівняння нижньої лінії шару $L_2 = f_2(R_к)$, на котру висипається шихта, визначалась за відомими епюрами швидкостей руху шихти з урахуванням динамічного впливу завантажуваної подачі, або за показаннями профілеміру.

Розподілення товщини шару по радіусу визначалось як різниця функцій нижньої та верхньої кривих, оконтуруючих шар:

$$h_д = L_2 - L_о = a_о + a_1 R_к + a_2 R_к^2, \qquad /10/$$

та уточнювалася по рівності об'ємів рівномірно і нерівномірно

розподіленої на колошнику подачі:

$$M/\rho_ш = \pi \int_a^b (x(y))^2 dy.$$

Процес радіального розподілення шихти упроваджується сегрегацією, знання котрої доповнює математичну модель радіального розподілення шихти. Досліджування показали, що сегрегація шихти по радіусу для конусних завантажувальних пристроїв рівняється 30-40% і залежить від величини подачі /5%/, нахилу поверхні насипу /8%/, рівня насипу /10%/ та кількості дуття /10%/.

Товщину шару порції, завантаженої безконусним пристроєм з обертальним лотком, визначали, виходячи з розрахованого об'єму шихти, висипаного на поверхню насипу. Положення кожної станції на колошнику визначалося троекторією. Кут укосу до стінки та до вісі печі підраховували по формулі /9/. Отримані значення товщин шару по радіусу печі апроксимували кривою третього ступеню.

Таким чином, на основі отриманих рівнянь для розрахунку траекторій руху шихти і кутів укосу на колошнику розроблено загальне рівняння розподілення шихти конусними та лотковими завантажувальними пристроями. Для використання отриманих закономірностей в удосконаленні технології визначали емпіричні коефіцієнти тертя та відновлення механічної енергії, початкові швидкості руху шихти при висипанні з щілини "конус-чаша" та вантажних затворів бункерів.

Адекватність отриманих математичних моделей радіального розподілення шихти перевірялася дослідженнями, які проводились на працюючих доменних печах та перед задувкою, по літературним даним, а також на великомасштабних стендах з дуттьом, обладнаних конусними та безконусними завантажувальними пристроями.

При фізичному моделюванні процесу розподілення шихти на стендах знайдено, що визначальними комплексами для шихти є крітерії Ньютона, радіального розподілення, окружного розподілення $\omega M/Q_ш \rho_ш = idem$ /для безконусних завантажувальних пристроїв/; для газу - Ейлера або Лагранжа. Для повної подоби розподілення шихти додержували рівенство $Q_ш/d_ш^{1.5} g^{0.5} = idem$ та $M/D_к^3 \rho_ш = idem$, де $Q_ш$ - витрата шихти через щілину "конус-чаша" або вантажний клапан бункера, $D_к$ - діаметр конуса, $\omega$ - обертальна швидкість.

Оскільки геометрична подоба розмірів шихти неможлива /особ-

ливо дрібних фракцій 0-5 мм/, то гранулометричний склад моделювальної шихти устанавлювався на основі емпіричної залежності критерія радіального розподілення $\mathcal{E}$ від симплексу $D_к / d_ш$ в автомодельній області та відомого співвідношення між розмірами фракцій в реальній шихті:

Початкову швидкість шихти при висипанні з щілини "конус-чаша" та вантажних клапанів шихтових бункерів безконусного завантажувального пристрою визначали емпірично на доменних печах стетоскопічним методом, а також на стендах в широкому інтервалі розмірів агломерату, обкотишів та коксу. Обробка даних критеріальним методом дозволила отримати залежність початкової швидкості від площі отвору $S$ і середнього розміру шихти для щілини "конус-чаша" та круглих і еліптичних отворів вантажних клапанів:

$$v_0 = 0{,}0626\sqrt{S/d_ш}, \quad v_0 = 0{,}7379\, S^{0{,}287}/d_ш^{0{,}075}. \qquad /11/$$

Швидкість шихти у кінці конусу або лотка визначалась з вирішення диференційного рівнення руху шихти по похилим площинам конусу, тічок та лотків.

Установлено, що коефіцієнти тертя доменної шихти по конусу та лотку, які визначені за даними стендових іспитів та досліджень на доменних печах, наступні: для агломерату 0,4-0,5, коксу 0,3-0,4, обкотишів 0,2-0,3.

Експериментальне та шляхом розрахунків показано, що газовий потік та хід великого конусу значно впливають на траєкторію зсипання шихти. Для умов нормальної роботи доменної печі, обладнаної конусним завантажувальним пристроєм, горизонтальна складова траєкторії шихти під впливом газового потоку змінюється на 0,1-0,2 м. Для безконусних завантажувальних пристроїв з обертальним лотком газовий потік невиразно впливає на траєкторію. Зміна ходу конуса у межах 0,25-0,75 м збільшує горизонтальну складову траєкторії шихти на 0,15-0,17 м. Таким чином, змінюючи величину швидкості колошникового газу та ходу великого конусу, можна керувати радіальним розподіленням шихти на колошнику доменної печі.

Для визначення початкової швидкості шихти на укосі поверхні експериментально визначені коефіцієнти відновлення механічної енергії потоку доменної шихти при ударі об поверхню насипу. Установлено, що для агломерату і коксу вони дорівнюють 0,55 та 0,60 відповідно, а для обкотишів - 0,81. Таким чином, обкотиші із-за

малого коефіцієнту тертя і збільшеного коефіцієнту відновлення мають збільшену рухомість на колошнику печі при завантаженні, що приводить до нестійкого, а іноді і до аномального розподілення шихти.

Базуючись на отриманих закономірностях на персональній ЕОМ розроблено алгоритм розрахунку радіального розподілення шихти для різних систем завантаження в шихтових умовах металургійного комбінату "Криворіжсталь".

## 4. ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ ШЛЯХОМ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ЗАВАНТАЖЕННЯ

Сучасна доменна шихта вміщує значну кількість обкотишів. Перевага обкотишів перед агломератом полягає в постійності хімічного та гранулометричного складу, підвищеній газопроникності шару, вищій місткості заліза, підвищеній та рівномірній швидкості відновлення, а також підвищеній стійкості до зруйнування при перевантаженнях. До числа недоліків можливо віднести зменшення міцності обкотишів при відновлюванні в доменній печі, підвищений винос дрібнодисперсного колошникового пилу, прискорений знос завантажувальних апаратів, а також висока рухливість при завантаженні, яка приводить до незадовільного розподілення на колошнику.

Експериментально установлено, що введення обкотишів в шихту доменних печей змінює радіальне розподілення усього залізорудного шару подачі: збільшення долі останніх приводить до підвантаження центру печі залізорудною складовою. Отож, з підвищенням долі обкотишів у шихті необхідно застосовувати системи завантаження, міцніше підвантажуючих периферію доменної печі.

Оскільки при завантаженні неминуче відбувається часткове перемішування агломерату та обкотишів, то була зроблена оцінка її впливу на газопроникність доменної шихти. Експериментально установлено, що мінімальною газопроникністю володіє суміш 30% обкотишів та 70% рядового агломерату, отож, з точки зору газопроникності, кількість обкотишів у шихті належно бути більш 30%. З другого боку, більш 50% обкотишів у шихті мати небажано, оскільки з'являючись переважаючим по масі та більш рухомим компонентом шихти, обкотиші перевантажують центр печі, що погіршує використання газового потоку. Таким чином, нижня межа кількості обкоти-

шів у шихті визначається газопроникністю, верхня - газорозподіленням.

Визначено, що для обмеження нерегульованої рухомості обкотишів при завантаженні необхідно змішувати їх з коксом, що дає найбільш газопроникний шар, поліпшує радіальне газорозподілення, стабілізує газовий потік. Цій меті відповідають порядки скіпів в подачі АКОК↓, КАКО↓ та деякі інші.

Численними дослідженнями показано, що при зсипанні шихти з конусу відбувається удар об поверхню насипу, сила якого зростає від збільшення долі обкотишів у шихті. Динамічна дія падаючої шихти на поверхню насипу негативно впливає на газодинаміку верхньої зони, тому що ущільнює шихту, погіршуючи її газопроникність, дробить шихту, збільшуючи кількість дріб'язку та зменшує кут укосу шихти, з-за чого перевантажується центр печі залізорудною складовою. Для зменшення негативного впливу динамічної дії завантажуваної шихти нами досліджені фактори, впливаючі на його величину.

Розрахунковим шляхом отримано та експериментально перевірено рівняння для визначення сили динамічної дії шихти на поверхню насипу при завантаженні з конусу завантажувального пристрою:

$$F_g = 0{,}75\, Q_ш\, \rho_ш \sqrt{g H}. \qquad /12/$$

Експериментально визначена кількість дріб'язку 0-5 мм, який утворюється при завантаженні, ширина потоку шихти, падаючої з конусу:

$$\delta = 0{,}51\, H_к^{0{,}6}\, (H \cdot \cos\alpha)^{0{,}4}, \qquad /13/$$

на яку впливає рівень насипу $H$, хід великого конусу $H_к$ та кут нахилу його твірної. Ці дослідження дозволили визначити силу дії шихти на поверхню насипу для доменних печей різного об'єму та показати, що нею можливо керувати, змінюючи хід великого конусу.

Запропоновані методи раціоналізації процесу завантаження сучасної шихти у піч дозволили інтенсифікувати доменний процес та поліпшити його техніко-економічні показники.

## 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЕМПІРИЧНИЙ ОПИС ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ РОЗПОДІЛЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ШИХТИ У ШАХТІ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

На газодинаміку доменного процесу, крім знайомих, вхідних в рівняння втрат тиску газу у шарі шихти, впливають специфічні фактори, властиві тільки доменному процесу, такі як пошарове завантаження, нерівномірність розподілення по перерізу, периферійний підвід та відвід газів, рух шихти, нахил стін шахти, зони когезії, та інші. Специфічні фактори впливають на газодинаміку як безпосередньо, так і через розподілення газодинамічних характеристик шихти та газу в об'ємі доменної печі. Ці фактори необхідно вивчити, визначити ступень їх впливу на газодинаміку процесу та отримати математичні залежності з метою застосування у загальній моделі газодинаміки доменної печі.

Отже, експериментально установлено, що при пошаровому завантаженню шихти у доменну піч на межах різнорідних по гранулометричному складу шарів мають місце місцеві втрати тиску /міжшаровий газодинамічний ефект/, на величину яких впливають фактори: кількість дуття, співвідношення видів шихти та діаметрів кусків у суміжних шарах і порядок укладання шарів. Товщина шарів та ступень ущилення шихти практично не впливають на величину міжшарового ефекта. Отримані кількостні залежності величин міжшарового газодинамічного ефекту від факторів для стаціонарного та рухаючогося стовпа реальної доменної шихти. Експериментами на стенді та доменних печах показано, що втрати тиску від міжшарового ефекту складають 12-15% втрат тиску верхньої зони доменної печі, або 2-5% загальних втрат тиску.

Нерівномірність радіального розподілення шихти значно впливає на газодинаміку доменного процесу. Газопроникність нерівномірно розподіленого по радіусу шару шихти знаходиться в оберненo пропорційній залежності від показника радіального розподілення шихти та в прямій - від ступеню перемішування рудної та коксової частин подачі. При змінювані черги скіпів в подачі від ААКК↓ до ККАА↓ втрати тиску у верхній частині змінюються в диапазоні 30-35%, загальні - 6-12%.

Визначено та пояснено закономірності змінювання поля швидкостей газового потоку та втрат тиску в рухомому стовпі доменної

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

шихти від основних технологічних факторів: вида шихти, кількості дуття, швидкості руху шихти та висову фурм. Перші два фактора впливають на величину перепаду тиску, третій та четвертий - на переміщення кількості газу та поля швидкостей по радіусу доменної печі.

З метою використання ефекту розпушення шихти при руху її біля стін, вперше запропоновано застосування розпушувачів для верхньої найбільш напруженої у газодинамічним відношенні зони доменної печі. Визначена форма, кількість та місце їх установки. Найкращий ефект розпушення досягається при роботі доменної печі на шихті, яка вміщує меньше ніж 35% дріб'язку, при довжині розпушувачів 1/4 радіусу колошнику. Дослідження показали, що розпушувачі збільшують газопроникність стовпу шихти на 1,5-2%, що дозволяє збільшити виробництво на відповідну величину за рахунок форсировки доменної плавки дуттєм.

Експериментальним шляхом отримано універсальну емпіричну формулу порозності полідисперсьных та багатокомпонентних доменних шихт у залежності від їх гранулометричного складу:

$$\varepsilon = 1-(1-\varepsilon_к)a_к - \sum_1^p (1-\varepsilon_i)a_i(1{,}582-2{,}417\,d_i/d_к + \\ + 1{,}485\,(d_i/d_к)^2 + 0{,}18\,a_к/a_i - 0{,}015\,(a_к/a_i)^2, \qquad /14/$$

де $\varepsilon_к$ та $\varepsilon_i$ - порозності шарів великої та і-тих фракцій розмірів $d_к$ та $d_i$; $a_к$ та $a_i$ - долі великої та і-тих фракцій у суміші.

Під час руху шихти в доменній печі порозность її по радіусу змінюється. Для її визначення у будь-якій крапці об'єму рухомої шихти була розроблена розрахунково-емпірична методика, яка базується на вимірюванні швидкості газу термоанемометричними датчиками з послідовним перерахунком даних з використанням рівнянь втрат тиску газу в сипучім шарі. Таким чином, визначено реальне розподілення міжкускових порожнеч в усьому об'ємі рухаючогося шару. Експериментальні дані добре описуються емпіричною залежністю:

$$\varepsilon_i = (1-\bar{\varepsilon})d_ш / (d_ш + R - r) + \bar{\varepsilon}, \qquad /15/$$

де $r$ - поточне значення радіусу печі. Це рівняння використовується для визначення газорозподілення в залізорудному шарі шихти /6/.

Дослідженнями установлено, що при розробці математичної мо-

делі газодинаміки шахти, доменної печі необхідно обліковувати з кількох специфічних факторів: радіальне розподілення шихти, форма профіля печі, сегрегація та рух шихти.

Отримані закономірності розподілення товщини шару, гранулометричного складу та порозності по радіусу шахти були використані для аналізу впливу систем завантаження на економічність роботи печей і для вибору найбільш раціональних режимів, дозволяючих інтенсифікувати доменний процес.

## 6. ВИБІР РАЦІОНАЛЬНОГО ВЗАЄМОРОЗПОДІЛЕННЯ ШИХТИ ТА ГАЗУ В ШАХТІ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ НА ОСНОВІ ДЕТЕРМІНОВАНИХ МОДЕЛЕЙ

Звісно, раціональне взаєморозподілення шихти та газу можливе тоді, коли кожній одиниці оброблюваного матеріалу в печі відповідає визначена кількість газу. Дослідження в попередніх розділах дозволили розробити метод оцінки впливу систем завантаження на втрати тиску та використання газового потоку.

Газорозподілення у залізорудному шарі підраховується по формулі /6/, куди входять радіальне розподілення товщини шару /10/, гранулометричного складу та порозності /14, 15/. Для визначення кількісного розподілення шихти та газу підраховувалось газове навантаження по радіусу, котре уявляє собою відношення кількості газу в одиницю часу до ваги залізорудної частини шихти:

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{н},i} / M_i = v_{\text{ш}} \bar{\varepsilon} / h_a \rho_a , \qquad /16/$$

Для оцінки рівномірності взаєморозподілення підраховували дісперсії газових навантажень по радіусу, мінімальне значення котрої відповідало найкращому розподіленню шихти та газу. Загальну газопроникність шару шихти розраховували по формулі /5/, а для циклу подач - /4/. Сумарне розподілення газових навантажань в циклі подач визначали, виходячи з умов адитивності.

Таким чином, були проаналізовані основні системи завантаження та різні цикли, складені з них, стосовно до доменних печей корисним об'ємом 2000 м$^3$ в умовах комбінату "Криворіжсталь" та знайдені раціональні, маючі низькі значення дисперсії газових навантажень та витрат тиску.

Експериментально на доменних печах 5-7 перевірені вибрані системи завантаження та показана висока ефективність розробленого

методу аналізу. У наслідку застосування рекомендованих режимів завантаження на усіх печах отримано зниження витрат коксу та збільшення виробництва.

Аналіз газодинаміки шахти доменної печі показав, що залізорудний шар шихти є лімітуючим, порівняно з коксом, а втрати тиску у ньому на лад вищі, ніж у шарі коксу. Газопроникність залізорудної частини подачі можливо підвищити уведенням в нього проміжних фракцій, наприклад: коксовий "горіх" фр. 10-40 мм, а також другі компоненти та добавки, які входять у доменну шихту. Оптимальним є завантаження дрібного коксу у суміші з агломератом в кількості 25-28% за об'ємом від загальної кількості коксу. Введення більш великих кількостей негативно впливає на газодинаміку нижніх горизонтів доменної печі, внаслідок погіршення дренажу рідких продуктів плавки.

Застосування дрібного коксу до 28% в суміші з агломератом збільшує виробництво на 1,1% та знижує витрати коксу на 1,15% за рахунок зменшення втрат тиску у залізорудному шарі, поліпшення розподілення газового потоку в печі, стійкості проти зруйнування дрібних фракцій коксу, заміни частини коштовного металургійного коксу дешевим дрібним коксом.

## 7. РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ГАЗОДИНАМІКИ ШАХТИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

Для розробки моделей використано методи аналізу складних систем, тому що доменний процес, через його складність та багатофакторність, володіє усіма їх відмітними ознаками.

Усі фактори доменного процесу розбили на шість груп: систему завантаження /черга скіпів або радіальних станцій, маса подачі, рівень насипу, робота ОРШ/, сировинні умови /склад залізорудної шихти, вміст заліза, основність, гранулометричний склад/, дуттєві умови /склад дуття, температура, тиск/, параметри фурм /кількість, діаметр, висов, нахил/, конструктивні умови /розміри профілю, вид завантажувального пристрою та інші/ та випадкові /неполадки обладнання, затримкі випусків та інші/. Установили ієрархію, зв'язок факторів та параметрів доменного процесу. Відповідно з однією визначною ознакою складних систем, виділили з загальної схеми доменного процесу локальні підсистеми, які виз-

начають газопроникність та розподілення газового потоку в шахті доменної печі.

На газодинаміку верхньої зони впливають тринадцять факторів. Зв'язок деяких факторів з перепадом тиску /кількість дуття, гранулометрічний склад, тиск під колошником та температура/ добре вивчено та може бути ураховано по відомих закономірностях. Інші фактори /конструктивні, випадкові/ вважали сталими для кожної конкретної доменної печі. Фактори завантаження: лад скіпів ПС, маса подачі М, рівень насипу Н та склад залізорудної шихти СШ - впливають на газопроникність через змінювання ступеню нерівномірності розподілення шихти по перерізу печі. Зв'язок цих факторів з втратами тиску описували стохастичною моделлю з пристосуванням апаратів кореляційного та регресійного аналізів.

Процес взаєморозподілення шихти та газу описується залежністю використання загального колошникового газу від факторів завантаження. Таким чином, система

$$\eta_r = Q_к^{1,8} T_к H_в / \Delta P_в P_к d_ш^{1,2} = f_1(ПС, М, Н, СШ),$$
$$\eta_u = CO_2/CO = f_2(ПС, М, Н, СШ) \qquad /18/$$

зображує собою локальну стохастичну модель газодинаміки верхньої зони доменної печі, в якій $H_в$ - відстань між крапками отбору тиску для верхнього перепаду $\Delta P_в$; $Q_к$, $T_к$ та $P_к$ - кількість, температура та тиск колошникового газу.

Для визначення кількісних зв'язків фактори завантаження було формалізовано. Для конусного завантажувального апарату лад скіпів у подачі був розподілений на два кількісних показника: радіального розподілення шихти та перемішування. Для безконусного пристроя система завантаження була розподілена на три показника: середня станція залізорудної порції та коксу, кількість станцій у подачі та кількість порцій у циклі подач.

Таким чином, для отримання стохастичних моделей газодинаміки верхньої зони провели аналіз роботи доменних печей металургійного комбінату "Криворіжсталь" корисним об'ємом 2000 м$^3$ за період їх роботи в 1,5 роки. За цими даними методом множинної регресії були отримані зв'язки /18/ у вигляді квадратичних поліномів.

Дані моделі використали для визначення оптимальних факторів завантаження з метою пошуку найліпшого газодинамічного режиму доменної плавки, який відповідає підвищеним техніко-економічним

показникам. Оскільки газопроникність та використання газового потоку взаємно обмежують одне одного, застосували компромісну оптимізацію на основі методу невизначених множників Лагранжа. З системи рівнянь /18/ було складено функцію Лагранжа, яка досліджувалась на умовний екстремум в межах факторного простору. Вирішення робилось на ЕОМ методом ітерацій, з допомогою якого були визначені оптимальні значення факторів завантаження, відповідаючі компромісу між газопроникністю шихти та використанням газового потоку.

Дослідні плавки на доменних печах з використанням оптимальних значень факторів завантаження ствердили підвищену ефективність розробленого методу. Аналіз роботи доменних печей корисним об'ємом 2000 м$^3$ в умовах комбінату "Криворіжсталь" показав, що при підтримці параметрів завантаження на оптимальних рівнях можливо подальшее зменшення газодинамічного опору стовпа матеріалів у сухій зоні та форсування ходу доменних печей дуттєм на 5-10% без зниження ступеню використання газового потоку.

Дослідженнями на доменній печі 8 металургійного комбінату "Криворіжсталь" виявлено, що негативні стохастичні моделі, обумовлені недостатністю даних для пасивного експерименту, вузкістю факторного простору та нераціональним розподіленням дослідних точок в ньому, можна використовувати для визначення початкової точки та напрямку пошуку оптимуму. Подальший пошук проводили активним експериментуванням з допомогою послідовного симплексного методу. Параметрами оптимізації були показник газопроникності $\eta_г$ та ступінь використання газового потоку $\eta_и$, котрі дублювалися виробництвом $П$ та питомими витратами коксу $К$. Для спрощення процедури пошуку та підвищення її ефективності параметри оптимізації зводили в однонапрямкові комплекси: $\eta_и / \eta_г$, $П / К$, які при певних обмеженнях повинні прямувати до максимума.

Застосування послідовного симплексного методу до пошуку оптимума дозволило з мінімальними витратами визначити фактори завантаження, які зобезпечують найліпші техніко-економічні показники доменної плавки. Стосовно доменної печі 8 корисним об'ємом 2700 м$^3$ металургійного комбінату "Криворіжсталь" оптимізація газодинамічного режиму доменної печі привела до збільшення виробництва на 1,9% та до незначного зниження витрат коксу.

З використанням формалізованих факторів завантаження на домен-

ній печі 9, обладнаній безконусним завантажувальним пристроєм, в період освоєння виконано оптимізацію газодинамічного режиму верхньої зони печі методом статистичного градієнту. Це дозволило стабілізувати газовий потік, покращити його використання, що привело до економії коксу 0,5% та невеликому збільшенню виробництва.

Таким чином, дослідження, проведені на сучасних доменних печах, показали, що методи інтенсифікації доменної плавки на основі розробки та оптимізації стохастичних математичних моделей ефективні, бо дозволяють значно поліпшити техніко-економічні показники без додаткових капітальних витрат.

## ОСНОВНІ ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

1. Теоретичні та експериментальні дослідження, виконані в роботі, дозволили узагальнити та вирішити актуальну науково-прикладну проблему інтенсифікації процесу плавки на основі математичних моделей газодинаміки шахти доменних печей з метою збільшення виробництва та зниження витрат коксу без значних капітальних витрат.

2. Аналіз та узагальнення літературних джерел дозволили визначити напрямок розробки математичних моделей завантаження та газодинаміки з метою їх оптимізації для покращення техніко-економічних показників доменних печей.

3. Зроблена класифікація руху газового потоку та розроблена загальна модель газодинаміки доменної плавки з урахуванням радіального розподілу шихти на основі класичних рівнянь Ейлера-Жуковського з використанням емпіричних рівнянь руху газу в шарі доменної шихти.

4. Розроблено математичну модель радіального розподілу шихти сучасними завантажувальними пристроями /конусними та безконусними/ на основі вирішення рівнянь руху шихти з розподілителів у підконусному просторі і по поверхні насипу, яка дозволяє визначити товщину шару та сегрегацію шихтових матеріалів по радіусу печі з метою використання її у математичній моделі газодинаміки доменної плавки.

5. Експериментально на стендах та доменних печах доведена адекватність моделі радіального розподілу шихти, в якій емпіричним шляхом отримані залежності для розрахунку початкової швидко-

сті доменної шихти при зсипанні її з щілини між конусом та чашою, а також вантажних клапанів шихтових бункерів.

6. Теоретичний і експериментальний аналіз формування поверхні насипу дозволив виявити, що обкотиші із-за малого коефіцієнту тертя та збільшеного коефіцієнту відновлення механічної енергії володіють великою рухомістю при завантаженні. Для ліквідації цього визначено оптимальний вміст обкотишів у шихті та запропоновано нову технологію завантаження обкотишів в піч.

7. Реалізація математичної моделі радіального розподілу шихти дозволила виявити, що зміщення ходу великого конусу при завантаженні значно впливає на ущільнення шару, та положення траєкторії шихти. Для поліпшення завантаження була запропонована технологія ступеневого опускання великого конусу.

8. Теоретичний аналіз умов взаєморозподілення шихти та газу послужив основою для розробки спрощеної моделі руху газового потоку в шахті, ураховуючій пошарову структуру стовпа доменної шихти у вертикальнім та нерівномірну - у горизонтальному напрямку.

9. Експериментально досліджено вплив специфічних факторів: міжшарового газодинамічного ефекту, радіального розподілу, перемішування при зсипанні шихти у піч, руху шихти та параметрів фурм - на газодинаміку доменного процесу.

10. На базі спрощеної моделі газодинаміки шахти створена методика оцінювання впливу факторів завантаження на втрати тиску та використання газового потоку, дозволяюча вибрати найбільш раціональні системи і засоби завантаження.

11. На основі методів дослідження складних систем розроблена ієрархічна структура параметрів доменного процесу, яка дозволяє отримати локальні стохастичні моделі газодинаміки шахти доменної печі.

12. Розроблена методика оптимізації газодинамічного режиму шахти доменної печі факторами завантаження, яка заснована на стохастичних моделях з послідовним активним експериментуванням. Для оптимізації використовувались методи Лагранжа, послідовного симплексного та статистичного градієнту.

Основний зміст дисертації відображено у публікаціях:

1. Влияние равномерного распределения гранулометрического состава шихты по окружности колошника на работу доменной печи /И.И.Коробов, В.Н.Ковшов, К.И.Котов и др. /Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1968.- №6.- С. 1-4.

2. Коробов И.М., Ковшов В.Н. Исследование газопроницаемости слоя агломерата. /Изв. вузов. Черная металлургия.- 1969.- № 2. - С. 30-35.

3. Ковшов В.Н. Движение газового потока в послойной загруженной шихте //В сб.: Газодинамика и механика движения шихты в доменных печах.- Свердловск.- 1969.- С. 35-37.

4. О возможностях использования мелкого кокса в современной доменной плавке /И.И.Коробов, К.И.Котов, С.И.Пинчук и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1969.- № 5.- С.40-43.

5. Коробов И.И., Ковшов В.Н. Особенности распределения газового потока в слое агломерата в зависимости от его физических свойств /Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб. - Киев: Техніка.- 1970.- № 9.- С.51-59.

6. Коробов И.И., Ковшов В.Н., Котов К.И. Вопросы газопроницаемости слоя агломерата //Изв.вузов. Черная металлургия.- 1970. - С.31-34.

7. Коробов И.И., Ковшов В.Н. Особенности массо- и теплообмена в рудном слое подачи при неравномерном распределении его по сечению доменной печи //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед. научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1970.- № 24.- С.31-39.

8. Коробов И.И., Ковшов В.Н., Мищенко А.Ф. Рациональное использование шихты в доменной плавке //Металлургия и коксохимия. Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1972.- № 29.- С.40-46.

9. Ковшов В.Н., Коробов И.И. О влиянии темпа ссыпания шихты с большого конуса на радиальное распределение //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1972. - № 29.- С.66-72.

10. Изучение различных приемов загрузки доменной печи и выбор наиболее рациональных /И.И.Коробов, В.Н.Ковшов, А.Ф.Мищенко и др. //Сталь.- 1972.- № 5.- С. 418.

11. Защита засыпного аппарата доменной печи /И.И.Коробов, В.Н.Ковшов, В.А.Анисимов и др. //В сб.: Загрузочные устройства доменных печей.- Донецк: ДонНИИЧермет.- 1973.- С.53-58.

12. Исследование влияния рельефа поверхности засыпи на радиальное распределение шихты в доменной печи /И.И.Коробов, В.Н.Ковшов, В.Г.Чистяков и др. // Металлургия и коксохимия: Респ. межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1974.- № 38.- С.40-45.

13. Исследование работы доменной печи на разном количестве окатышей в шихте /И.И.Коробов, В.Н.Ковшов, А.И.Галаганов и др. //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.: - Киев: Техніка.- 1975.- № 43.- С.42-45.

14. Ковшов В.Н., Галаганов А.И., Егоров Н.А. Распределение давления в послойной загруженной шихте //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1975.- № 43. - С.60-64.

15. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г., Коряк С.В. Исследование газодинамических характеристик агломерата методом моделирования и симплексно-решетчатого планирования эксперимента //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1976. - № 48.- С.34-41.

16. Исследование порозности многокомпонентных доменных шихт /В.Н.Ковшов, А.И.Галаганов, В.Г.Чистяков и др. //Металлургия и коксохимия: Респмежвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1977.- № 53.- С.34-37.

17. Коробов И.И., Галаганов А.И., Ковшов В.Н. Об улучшении распределения на колошнике шихты, содержащей окатыши /Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1977.- № 3.- С.1-4.

18. Исследование влияния разрыхления шихты на его газопроницаемость /И.И.Коробов, В.Н.Ковшов, В.Г.Чистяков и др. //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка. - 1977.- № 53.- С.37-41.

19. Ковшов В.Н., Петренко В.А., Нечипоренко Ю.С. Исследование потерь давления в межслойных зонах доменной шихты. //Известия вузов. Черная металлургия.- 1978.- № 12.- С.29-32.

20. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г. Исследование динамического воздействия ссыпающейся шихты на поверхность засыпи в доменной печи //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1978.- № 59.- С.23-26.

21. Ковшов В.Н., Петренко В.А., Нечипоренко Ю.С. Исследование межслойного эффекта в доменной шихте /Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1978.- № 5.- С.31-34.

22. Исследование влияния систем загрузки на газопроницаемость доменной шихты в подаче /В.Н.Ковшов, В.Г.Чистяков, В.А.Петренко и др. //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн. сб.- Киев: Техніка.- 1979.- № 62.- С.30-34.

23. О выборе основных конструктивных параметров бесконусных загрузочных устройств с вращающимися лотками /В.Н.Ковшов, Г.С.Зозуля, В.Г.Чистяков и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1979.- № 3.- С.5-6.

24. Ковшов В.Н., Петренко В.А. Оптимальное количество окатышей в доменной шихте. //Бюллетень института "Черметинформация". Черная металлургия.- Вып. 16.- 1979.- С.23.

25. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г., Зозуля Г.С. Исследование радиального распределения шихты бесконусным устройством (загрузочным) с вращающимся лотком //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1980.- № 70.- С.38-41.

26. Ковшов В.Н., Петренко В.А., Терещенко Н.В. Методика определения газодинамических характеристик доменной шихты //Металлургия и коксохимия: Респ.межведнаучно-техн.сб.- Киев: Техніка. - 1980.- № 70.- С.31-34.

27. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г., Зозуля Г.С. Исследование истечения шихтовых материалов из бункеров загрузочных устройств доменных печей //Известия вузов. Черная металлургия.- 1980.- № 8. - С.126-130.

28. Оптимизация параметров загрузки мощных доменных печей с целью интенсификации плавки /В.Н.Ковшов, В.А.Петренко и др. Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1980.-№4.-С.1-3.

29. Ковшов В.Н., Петренко В.А., Терещенко Н.В. Закономерности изменения локальной порозности в однородной движущейся шихте //Известия вузов. Черная металлургия.- 1981.- № 7.- С.21-24.

30. Ковшов В.Н., Петренко В.А., Терещенко Н.В. Исследование взаимосвязи газодинамического сопротивления и газораспределения в движущемся столбе доменной шихты //Известия вузов. Черная металлургия.- 1981.- № 12.- С.17-20.

31. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г., Терещенко Н.В. Исследование технологических возможностей бесконусного загрузочного устройства //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.-Киев: Техніка.- 1982.- № 75.- С.27-32.

32. О возможностях математического описания газодинамики доменной плавки /В.Н.Ковшов, В.А.Петренко, Н.В.Терещенко и др. //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1982.- № 75.- С.36-42.

33. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента //Киев-Донецк: Вища школа.- 1982.- 120 с.

34. Анализ освоения технологии загрузки бесконусным устройством доменной печи № 9 завода "Криворожсталь" /В.Н.Ковшов, В.А.Петренко, Н.В.Терещенко и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1982.- № 1.- С.1-3

35. Ковшов В.Н. Формирование поверхности засыпи доменной печи современными загрузочными устройствами. Сообщение I //Известия вузов. Черная металлургия.- 1982. № 12.- С.8-12.

36. Ковшов В.Н. Формирование поверхности засыпи доменной печи современными загрузочными устройствами. Сообщение № 2 //Известия вузов. Черная металлургия.- 1983.- № 2.- С.5-9.

37. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г. Выбор критериев моделирования при исследовании распределения шихты загрузочными устройствами //Вопросы теории и практики производства чугуна: Темат.отрасл.сборник Минчермета СССР и ИЧМ.- М.: Металлургия.- 1983.

38. Исследование взаимовлияния факторов загрузки на радиальное распределение шихты /В.Г.Чистяков, В.Н.Ковшов, В.А.Петренко и др. //Известия вузов. Черная металлургия.- 1983.- № 8. - С.1-4.

39.Анализ применения разрыхляющих систем загрузки в условиях завода "Криворожсталь" И.И.Дышлевич, В.Н.Ковшов, Н.В.Терещенко и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1983.- № 2.- С.6-7.

40. Оптимизация загрузки современных доменных печей при помощи последовательного симплексного метода /В.Н.Ковшов, Н.В.Терещенко, И.И.Дышлевич и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1983.- № 3.- С.7-9.

41. Исследование закономерностей распределения статического давления в слое шихты /В.Н.Ковшов, В.Г.Чистяков, С.Г.Борисов и др. //Известия вузов. Черная металлургия.- 1983.- № 10.- С.16-19.

42. Методы определения экстремальных значений параметров распределения шихты /В.Н.Ковшов, Н.В.Терещенко, В.Г.Чистяков и др. //Известия вузов. Черная металлургия.- 1983.- № 11.- С.23-25.

43. Исследование влияния физико-химических свойств железорудного сырья на газопроницаемость пластической зоны в доменной печи В.Н.Ковшов, Н.А.Егоров, В.А.Петренко и др. //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1983. - № 79.- С.95-100.

44. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г. Дополнительные возможности управления формированием поверхности засыпи доменной печи. Сообщение I. //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1984.- № 5.- С.32-36.

45. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г. Дополнительные возможности управления формированием поверхности засыпи в доменной печи. Сообщение 2. //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1984.- №7.- С.26-29.

46. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г., Стан С.Я. Исследование сегрегации шихты при формировании поверхности засыпи в доменной печи //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1984.- № 84.- С.34-37.

47. Ковшов В.Н., Терещенко Н.В. Исследование и разработка метода оптимизации технологических факторов загрузки доменных печей. //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1984.- № 84.- С.50-57.

48. Влияние режима загрузки на распределение газовых нагрузок по сечению доменной печи /Н.В.Терещенко, В.А.Петренко, В.Н.Ковшов и др. //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1984.- № 10. - С.29-32.

49. Газодинамическая оценка процесса накопления продуктов доменной плавки /В.Н.Ковшов, Н.А.Егоров, В.А.Петренко и др. //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1984.- № 3.- С.29-33.

50. Экспериментальная оценка влияния режима загрузки на формирование пластичной зоны доменной печи /Н.А.Егоров, В.Н.Ковшов, В.А.Петренко и др. //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1984. - № 12.- С.24-26.

51. Экспериментальное определение рационального распределения газовых нагрузок по сечению доменной печи /В.Н.Ковшов, В.А.Петренко, С.М.Валявин и др. //Изв. вузов. Черная металлургия. - 1985.- № 2.- С.10-12.

52. Ковшов В.Н., Стан С.Я., Чистяков В.Г. Методика определения траектории ссыпания шихтовых материалов в доменную печь с конусных засыпных аппаратов, оборудованных подвижными элементами //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1985.- № 8.- С.137-141.

53. Ковшов В.Н., Петренко В.А., Киселев М.Я. Математическая модель для расчета газодинамических характеристик шахты доменной печи //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1985.- № 88.- С.46-49.

54. Ковшов В.Н., Терещенко Н.В., Петренко В.А. Методика экспериментального исследования режимов загрузки на стенде бесконусного загрузочного устройства //Изв. вузов. Черная металлургия. - 1985.- № 5.- С.54-57.

55. Влияние режима движения столба доменной шихты на изменение конфигурации слоев /В.Н.Ковшов, С.Г.Борисов, В.А.Петренко и др. //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1986.- № 2.- С.11-14.

56. Борисов С.Г., Ковшов В.Н., Петренко В.А. Влияние режима схода столба материалов на радиальное распределение шихты //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1986.- № 2.- С. 154.

57. Егоров Н.А., Ковшов В.Н., Петренко В.А. Взаимосвязь уровня расплава и газораспределение в нижней части доменной печи //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1986.- № 5.- С.24-26.

58. Петренко В.А., Ковшов В.Н., Терещенко Н.В. К вопросу о газораспределении и рудной нагрузке в доменной печи /Экономия кокса в доменных печах: Тем.сб.научн.трудов МЧМ СССР, ИЧМ.- М.: Металлургия.- 1986.- С.39-44.

59. Валявин С.М., Петренко В.А., Ковшов В.Н. Исследование влияния газовых нагрузок на ход процессов восстановления железорудного сырья //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1986.- № 6.- С. 152.

60. Исследование влияния распределительного кольца на формирование поверхности засыпи /В.Г.Чистяков, С.Я.Стан, В.Н.Ковшов и др. //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1986.- № 10.- С.21-25.

61. Технология загрузки доменной печи с учетом рациональной неравномерности опускания шихты /В.Н.Ковшов, В.А.Петренко,С.Г.Борисов и др. //Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1986.- № 3.- С.5-6.

62. Экспериментальный поиск рациональных режимов загрузки доменных печей комбината "Криворожсталь" /И.И.Дышлевич, В.Н.Ковшов, Н.В.Терещенко и др. // Вопросы теории и практики производства чугуна: Тем.сб.научн.трудов МЧМ СССР, ИЧМ.- М.: Металлургия. - 1986.- С.43-48.

63. Валявин С.М., Петренко В.А., Ковшов В.Н. Применение режима загрузки доменной печи с изменяющейся массой подачи в цикле //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1987.- № 3.- С.147-148.

64. Ковшов В.Н., Валявин С.М., Петренко В.А. Влияние режима загрузки на смешивание железорудного материала с коксом в подаче //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1987.- № 4.- С.151-152.

65. Изучение физических и газодинамических характеристик железорудной части доменной шихты при использовании локальных спеков окатышей /В.Н.Билоус, В.Н.Ковшов, С.А.Федосов и др. //Изв. вузов. Черная металлургия.- 1987.- № 6.- С.6-9.

66. Ковшов В.Н. Математическое описание распределения шихты по радиусу колошника доменной печи //Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техніка.- 1986.- № 95.- С.29-32.

67. Исследование газораспределения в движущемся слое шихты /В.Н.Ковшов, Н.В.Терещенко, В.А.Петренко и др. //Металлургия и коксохимия: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1988. - № 95.- С.46-51.

68. Ковшов В.Н., Терещенко Н.В., Поторока А.Г. Экспериментальное определение прогиба поверхности засыпи при загрузке доменной печи //Проблемы металлургического производства: Респ. межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка.- 1991.- № 104.- С.65-67.

69. Ковшов В.Н. Определение порозности потока шихты, ссыпающегося с большого конуса доменной печи //Проблемы металлургического производства: Респ.межвед.научно-техн.сб.- Киев: Техніка. - 1991.- № 104.- С.68-69.

70. Организация эксперимента: Учебн. пособие /В.И.Баптизманский, Ю.Н.Яковлев, Ю.С.Паниотов и др.- Киев: УМК ВО.- 1992.- 244с.

По темі дисертації отримані авторські свідоцтва СРСР №№ 374374, 603664, 699018, 709686, 730812, 767213, 779389, 908432, 933715, 998511, 1161563, 1219651, 1257090, 1266863, 1268613, 1320229, 1435603, 1449592, 1475927, 1571072.

470662

Ав 26.964