

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО ЧЕРВОНОГО ПРАПОРА
МЕТАЛУРГІЙНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

ДОНСЬКОВ Євген Гаврилович

НАУКОВІ ОСНОВИ ТА ПРАКТИКА ВИРІШЕННЯ
ПРОБЛЕМ ПАЛИВА ТА ФОРСУВАННЯ ПЛАВИ
З ДОПОМОГОЮ РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ ДИНАМІКИ
ГАЗУ В ДОМЕННИХ ПЕЧАХ

Спеціальність 05.16.02
"Металургія чорних металів"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпропетровськ - 1993



Робота в журналі
ордена Трудового Червоного
металургійному інституту

О ф і ц і й н і о п о н е н т и ;

Доктор технічних наук, професор Іванов А.І.
Доктор технічних наук, професор Логінов В.І.
Доктор технічних наук, професор Тарасов В.П.

П р о в і д н е п і д п р и е м с т в о -

Запорізький металургійний комбінат "Запоріжсталь" ім. С.Орджоні-
кідзе

Захист дисертації відбудеться "14" 05 1993 р.
на засіданні спеціалізованої ради Д 068.02.02 при Дніпропетров-
ському ордену Трудового Червоного Прапора металургійному інс-
титуті / 320635, м. Дніпропетровськ, проспект Гагаріна, 4 /

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці інституту.
Автореферат розісланий "___" _____ 199 р.

Учений секретар
спеціалізованої ради
доктор технічних наук,
професор

В.К. Цанко

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Найбільш важливим завданням сучасного промислового виробництва є підвищення його економічної ефективності і, насамперед, на основі скорочення витрат енергоносіїв, вартість котрих на світовому ринку неухильно росте. Для чорної металургії України це має особливе значення ще й тому, що накреслюється виснаження природних запасів палива. Стосовно до доменного виробництва, завдання конкретизується в напрямку подальшого зниження витрати коксу при виплавці чавуну, а також підвищення віддачі від заміників коксу, що використовуються, і скорочення витрат енергії на інтенсифікацію плавки за рахунок підвищення ефективності інтенсифікаторів, що застосовуються. Вирішення вказаної проблеми видається досить актуальним також в зв'язку з необхідністю оздоровлення екологічного середовища в промислових районах республіки.

Перерахованим завданням відповідає нарощення виплавлення чавуну і покращення економічних показників роботи сучасних печей на існуючих потужностях за рахунок розкриття та реалізації резервів доменного виробництва. Достатнім свідченням наявності таких резервів є досить суттєва різниця показників плавки по витраті палива та продуктивності печей при їх роботі в однакових умовах шихты та дуття.

Ця дисертаційна робота присвячена дослідженню можливостей скорочення витрат палива та інтенсифікації плавки чавуну з допомогою підвищення навантаження на кокс та витрати дуття на основі раціоналізації газодуттєвого режиму роботи печей і удосконалення розподілу матеріалів на колошнику. З урахуванням вищевикладеного, це є значною народно-господарською проблемою. Рівень розвитку теорії доменної плавки дозволяє провести кваліфікований аналіз стану питання і, в найбільш загальному вигляді, визначити можливість вирішення проблеми, але вимагає уточнення уявлень по ряду позицій, що пов'язані з потребами у вуглеці процесів відновлення та теплообміну, з газорозподілом в горні та механікою фурмених зон горіння, закономірностями формування профілю засипки матеріалів та інше.

В зв'язку з різноманітністю факторів, що визначають технічні та економічні показники доменної плавки, в роботі вико-

ристаний комплексний підхід, що включає розробку методик розрахунку, вирішення на їх основі задач аналізу, що дозволяють розкрити основні закономірності впливу заходів "знизу" та "зверху" у взаємозв'язку на процеси газодинаміки, тепло- та масообміну в доменних печах, проведення комплексу експериментальних досліджень в лабораторних та промислових умовах, а також дослідно-промислових випробувань запропонованих рішень. Натурні експериментальні дослідження, проведені на доменних печах об'ємом І033-5000 м³, які працювали в різних умовах шихти та дуття.

Метою роботи є пошук, теоретичне обґрунтування та розробка технологічних засобів ведення плавки і впливу на хід печей, що забезпечують покращення умов динаміки газу і, на цьому ґрунті, підвищення ефективності роботи вуглецю в тепло- та масообмінних процесах.

Досягнення поставленої мети вимагало вирішення таких основних завдань:

1/ аналізу шляхів розвитку і сучасного стану технології доменної плавки, включаючи обумовлення рівня реалізації традиційних заходів по удосконаленню техніко-економічних показників роботи печей, а також можливостей практичної реалізації нових технологічних розробок та резервів виплавлення чавуну;

2/ аналізу перспектив, визначення умов, теоретичного обґрунтування і розробки найбільш актуальних напрямків реалізації технологічних резервів доменного виробництва по зниженню витрати коксу та підвищенню інтенсивності плавки відносно до печей України;

3/ розробки, теоретичного та експериментального обґрунтування, а також дослідно-промислової перевірки конкретних технологічних заходів по освоєнню вказаних напрямків на практиці.

Наукову новизну мають і на захист вносяться такі розробки автора:

А. Методика і наслідки аналізу перспектив зниження витрати коксу в доменному процесі з позицій роздільного обліку впливу потреб плавки у вуглеці як відновлювачі і як постачальнику тепла, в тому числі:

- обґрунтування показників для оцінки окреслених потреб і виведення рівнянь їх зв'язків з умовами плавки;

- вивід рівнянь зв'язків та наслідки досліджень особливос-

тей впливу потреб у вуглеці-віновловачі і у вуглеці-джерелі тепла на міру прямого відновлення заліза та розход коксу;

- уточнення ролі міри прямого відновлення заліза в доменному процесі як координатора та синхронізатора витрат вуглецю в процесах відновлення та теплоспоживання, за допомогою якого при зниженні потреб у вуглеці-джерелі тепла скорочується його витрата в процесах відновлення та навпаки;

- методи та наслідки оцінки коефіцієнта корисної дії вуглецю в процесах відновлення та тепловіддачі і розкриття фізичної суті високої ефективності заходів по зниженню теплотреб високотемпературної зони;

- визначення ефективних напрямків скорочення витрати коксу та інтенсифікації доменної плавки в сучасних умовах і обґрунтування можливостей їх реалізації на основі удосконалення газорозподілу в горні.

Б. Методика та наслідки використання закону збереження енергії для аналізу впливу параметрів повітряних фурм та газодинамічного режиму плавки на виникнення та розміри зон горіння / циркуляції /, а також газорозподіл в горні доменних печей, в тому числі:

- аналіз факторів, що визначають роботу потоку дуття та розміри зон горіння в ізотермічних умовах, та обґрунтування впливу енергії тиску стисненого газу на механічні процеси біля фурм;

- уточнення впливу початкового діаметра струменя / фурм / за допомогою методики Г.Н. Абрамовича;

- вивід рівнянь та наслідки аналізу впливу параметрів фурм та дуття, а також процесів горіння на роботу потоку, витрачену на виникнення зон циркуляції в неізотермічних умовах діючих печей;

- обґрунтування раціонального показника для оцінки робоздібності струменя дуття в механічних процесах біля фурм;

В. Наслідки досліджень шляхів удосконалення структури стовба шихти в доменній печі на основі підвищення газопроникності шару залізорудних матеріалів та раціоналізації розподілу шихти на колошнику, в тому числі:

- уточнення газодинамічних характеристик агломерату і об'єктів і висновок про можливість підвищення газопроникності ша-

ру залізорудних матеріалів та раціоналізації розподілу шихти на колошнику, в тому числі:

- уточнення газодинамічних характеристик агломерату і обкатишів і висновок про можливість підвищення газопроникності шару поліфракційного агломерату при добавлянні до нього обкатишів, а також детальне вивчення поведінки сумішей агломерату з обкатишами під дією статичних, ударних та стираючих навантажень в холодному стані та при відновлювально-тепловій обробці;

- методика й наслідки аналітичних і експериментальних досліджень по уточненню закономірностей формування профілю засипки при завантаженні доменних печей типовими засипними апаратами;

- розробка і обґрунтування технологічних переваг принципово нового способу обертання розподільного жолоба - планетарного, стосовно до безконусного завантажувального пристрою.

Г. Наслідки експериментальних досліджень впливу кількості та діаметра повітряних фурм на втрати тиску при продувці стовбасипучих матеріалів в шахтних печах.

Практичне значення роботи полягає у всебіному обґрунтуванні, долідно-промислових випробуваннях і частковому здійсненні на доменних печах України метода зниження витрати коксу, при одночасному підвищенні інтенсивності плавки, що реалізується за рахунок скорочення потреби у високотемпературному теплі на основі вдосконалення газорозподілу в горні і, зокрема, в:

- розробці, обґрунтуванні та практичному здійсненні раціонального газодинамічного режиму плавки, включаючи збільшення на сучасних печах кількості та діаметра повітряних фурм;

- обґрунтуванні впливу загального перепаду статичного тиску в доменних печах на газорозподіл в горні;

- формуванні та обґрунтуванні принципа використання інтенсифікаторів плавки, що забезпечує збереження незмінним газорозподілення в горні;

- розробці, теоретичному та експериментальному обґрунтуванні комплексу заходів по вдосконаленню газорозподілення одночасно по радіусу та окружності горна;

- розробці та практичному здійсненні заходів по підвищенню газопроникності шару залізорудних матеріалів на основі змішування агломерату з обкатишами в процесі загрузки, а також режимів загрузки, що забезпечують вдосконалення розподілу матеріа-

лів по радіусу та окружності колошника при роботі на типовому обладнанні;

- розробці пропозицій по вдосконаленню розподільного вузла на сучасних безконусних завантажувальних пристроях /БЗП/ типу "воронка-габелок" та по створенню сучасного безконусного завантажувального пристрою доменних печей з розподільвачем шихти нового покоління.

Реалізація наслідків роботи. На доменних печах комбінату "Криворіжсталь" впроваджені або в різний час з позитивним ефектом використовувались такі розробки та рекомендації цієї дисертації:

- збільшення проти проектної кількості повітряних фурм на доменних печах №4 та №6-9;

- збільшення до 0,19 м діаметра повітряних фурм на доменних печах №1 та №4-8 / в 1973-1978 роках /; на д.п. №8 випробувані з економічним ефектом в 71 тис. карб. фурми діаметром 0,21 м;

- режим завантаження, що включає змішування обкатишів з агломератом перед подачею в піч на доменних печах №№1-4 та №9; економічна ефективність 58,197 тис. карб. на рік;

- режим завантаження, що включає набір двох скіпів шихтових матеріалів на малий конус на доменних печах №№1, 5, 7, 8; економічна ефективність 58,197 тис. карб. на рік;

- режим завантаження, що включає зменшення до 6 кількості станцій роботи обертового розподільвача шихти на доменних печах №№1-3, 5, 7, 8; економічна ефективність 51,295 тис. карб. на рік;

- режим завантаження, що включає раціональний порядок цикловання прямих та зворотних подач на доменній печі №7; економічна ефективність 22,541 тис. карб. на рік;

- живильники вібраційні для дозування агломерату, обкатишів та коксу на доменній печі №9 в кількості 14 шт.; економічна ефективність 46 тис. карб. на рік на I живильник;

- грохоти агломерату з просторовими коливаннями на доменних печах №№5-8 в кількості 4 шт.; економічна ефективність 33,6 тис. карб. на рік на I грохот;

- проходять стадію досліднопромислових випробувань модернізовані завантажувальні пристрої на доменних печах №№1 та 4.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи викладені та обговорені на Всесоюзному науково-технічному семінарі "Проблеми автоматизованого управління доменним виробництвом" / Київ, 1971 та 1983 р.р. /; на республіканській нараді "Шляхи зниження витрат коксу" в м. Дніпропетровську в 1982 р.; всесоюзних науково-технічних конференціях "Теорія та практика сучасного доменного виробництва" і "Теорія та технологія підготовки сировини для доменної плавки" в м. Дніпропетровську в 1983 та 1985 роках; науково-практичній конференції "Моделювання процесів в шахтних та доменних печах" в м. Свердловську в 1985 та 1988 роках; науково-технічних конференціях "Створення та вдосконалення енергозберігаючих технологій в пірометалургії" і "Шляхи покращення газомеханіки металургійних шихт" в м. Караганді в 1988 та 1990 роках, а також на наукових семінарах кафедр металургії чавуну ДМетІ та ДІІ, РТП МІСіС та відділу металургії чавуну ІЧМ.

Публікації. Наслідки досліджень по темі дисертації опубліковані в 39 статтях та 10 авторських свідоцтвах на винахід.

Структура та об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, 9 розділів, висновків, переліку літератури з 353 найменувань та додатку. Робота викладена на 350 сторінках машинописного тексту, включаючи 49 малюнків та 32 таблиці.

ЗМІСТ РОБОТИ

I. СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Розвиток доменного виробництва України, починаючи з перших післявоєнних п'ятирічок і до кінця 70-х років характеризувався високими темпами росту виплавлення чавуну, який забезпечувався одночасним використанням екстенсивних та інтенсивних заходів.

В роботі подано коротку характеристику особливостей розвитку металургії та показано, що разом з будівництвом нових печей і збільшення їх об'єма, введенням в дію об'єктів по підготовці палива та обкускованої залізорудної сировини йому сприяло також значне покращення питомих показників виплавки.

До кінця 70-х років збільшення об'єма печей, як фактор під-

вищення їх продуктивності, втратило своє значення, а такі заходи по зниженню витрати коксу, як підвищення основності та вмісту заліза в обкускованій сировині, тиску на колошнику, температури дуття та витрати природного газу в значній мірі вичерпали себе. Це стало об'єктивною основою зниження темпів розвитку підгалузі, котре в 80-х роках обернулося скороченням виплавлення чавуну та підвищенням витрат палива, чому в немалій мірі сприяло погіршення сировинних та паливних умов роботи печей.

Сучасна металургійна наука пропонує виробництву ряд нових розробок, перспективних у довготерміновому плані його розвитку. З урахуванням цільових функцій та засобів досягнення поставленої мети вони можуть бути розділені на заходи, що мають метою вдосконалення шихтових умов роботи печей / металізація та брикетування сировини, виробництво автоклавованих обкатишів та ін./ і заходи по частковій заміні коксу твердими або газоподібними менш дефіцитними видами палива, що вдуваються в шахту або горн доменних печей. Використання цих заходів у сучасних умовах не видається можливим, перш за все, з огляду на невідпрацьованість технічних засобів їх реалізації. Переважна більшість процесів по отриманню нових видів доменної сировини, а також примінення у промислових масштабах в якості дуттєвих добавок продуктів конверсії та піролізу газів та рідких палив, водню та колошникового газу, що відмитий від двоокису вуглецю, повинні пройти стадії технічного та технологічного відпрацювання. Впровадження цих заходів на промислових печах вимагає значних капіталовкладень в аглодоменне виробництво.

Реальним та таким, що не потребує капіталовкладень, є розвиток галузі за рахунок вдосконалення технологічних прийомів впливу на хід печей і підвищення якості заходів по керуванню плавкою. Як показав огляд літератури, середня продуктивність печей передових доменних цехів на 15-25% вище, а витрата коксу на них ~15% нижче середньогалузевих; ще вище ефективність плавки на окремих печах. Про наявність резервів, що пов'язані з даними обставинами, свідчить також робота вітчизняних доменних печей великого об'єма, котрі в кращих шихтових та газо-дуттєвих умовах поступають перед меншими печами у відношенні витрати коксу та питомої продуктивності. Принципові можливості досягнення печами різного об'єму рівних показників роботи в рівних

умовах обумовлюються однаковим характером проходження у них газодинамічних, відновлювальних та теплообмінних процесів. Практичним підтвердженням справедливості цього міркування є досвід роботи крупних доменних печей зарубіжних заводів, перш за все, Японії та країн Західної Європи.

Реалізація обумовлених резервів передбачає необхідність випереджаючого розвитку ряду теоретичних уявлень про доменну плавку і, в першу чергу, визначення найбільш ефективних шляхів скорочення витрати коксу, детального аналізу впливу на нього потреб у вуглеці процесів відновлення та теплоспоживання у взаємозв'язку. Для вирішення ряду завдань практичного характеру необхідно уточнення уявлень про особливості газорозподілу в горні, закони розвитку вогнищ горіння біля повітряних фурм, а також про закономірності формування профіля засипу при завантаженні доменних печей. Перераховані питання стали предметом досліджень, що лягли в основу даної дисертації.

2. ПИТАННЯ ТЕОРІЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ЕФЕКТИВНОЇ РОБОТИ ГАЗУ У ДОМЕННИХ ПЕЧАХ

2.1. Умови зниження витрати коксу

Продуктивність доменних печей може бути збільшена шляхом підвищення інтенсивності плавки або зниження питомої витрати коксу. Горіння / газифікація / коксу у доменних печах здійснюється біля фурм киснем дуття і в області прямого відновлення киснем шихти, тому інтенсивність процесу визначається швидкостями надходження кисню у нижню частину печі з дуттям та шихтою. Швидкість газифікації палива в кисні шихти росте при підвищенні ступеня прямого відновлення оксидів при скороченні витрати коксу. Тому головний меті даної роботи відповідає пошук заходів зниження витрати коксу, що забезпечують одночасну інтенсифікацію його горіння та підвищення продуктивності печей.

З урахуванням особливостей відновлення оксидів заліза та двоякої ролі вуглецю у доменному процесі зроблено припущення про те, що загальна потреба плавки в паливі складається з необхідних кількостей вуглецю як відновлювачі та як джерелі тепла

у високотемпературному ступені теплообміну. У ході аналізу відновлення FeO газом CO та твердим вуглецем виразили слідуєчим чином:

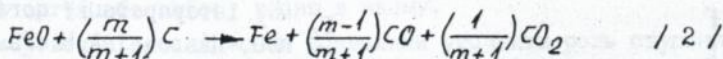
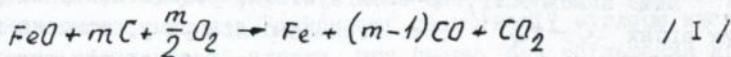


Схема / 1 / відображає непряме відновлення і є результатом додавання реакції горіння C до CO до реакції послідуєчого відновлення монооксиду заліза газом CO ; схема / 2 / також є сумою реакцій відновлення монооксиду Fe твердим C та газом CO , що утворився при прямому відновленні. Коефіцієнт m в обох випадках характеризує фактичну потребу процесу непрямого відновлення заліза з FeO в надлишковому CO і є величиною зворотною фактичному ступеню використання CO у даній реакції. Показано, що для працюєчої печі ця потреба може бути розрахована на основі витрат та складу шихти та колошникового газу.

Як видно з співставлення реакцій / 1 / та / 2 /, необхідна для відновлення моля Fe з FeO кількість вуглецю відновлювача при відновленні по схемі / 2 / в $m+1$ разів менша, ніж по схемі / 1 / і при зміні співвідношення реакцій мінється від максимуму, при стопроцентному розвитку непрямого відновлення

$$C_o^d = 12m \quad , \text{ г/моль} \quad / 3 /$$

до мінімальної кількості, при стопроцентному прямому відновленні,

$$C_{min}^d = 12m/(m+1) \quad , \text{ г/моль} \quad / 4 /$$

Кількість вуглецю-джерела тепла, що необхідна тільки для задоволення теплопотреби ендотермієчної реакції / 2 /, змінється від нуля до максимуму

$$C_{dmax}^T = q_{Fe} \frac{m}{q_C} (m+1) \quad , \text{ г/моль} \quad / 5 /$$

Кількість вуглецю-джерела тепла, що необхідна для задоволення потреб в теплі інших статей теплового балансу нижнього ступеня теплообміну, в випадку, що розглядається, не змінється-

ся і може характеризуватись величиною C_o^T - потребою у вуглеці-джерелі тепла при 100% розвитку схеми відновлення / I /.

Якщо залежності, що аналізуються, розмістити у координатних вісях $C - z_d$, то отримаємо діаграму, основна відмінність котрої від широко відомої інтерпретації поглядів М.О. Павлова, А.Н. Раммом та М.М. Лейбовичем полягає у тому, що тут пряма C_b відображає не рівноважну, як звичайно, а фактичну потребу у вуглеці-відновлювачі. Далі в роботі виводяться рівняння прямих C_b та C_T , віднаходяться їх зв'язки з C_o^b та C_o^T , та виводяться формули, що зв'язують ступінь прямого відновлення Fe з FeO / z_d / та витрату вуглецю, що газифікується / C_o /, з умовами плавки. Останні, при цьому,

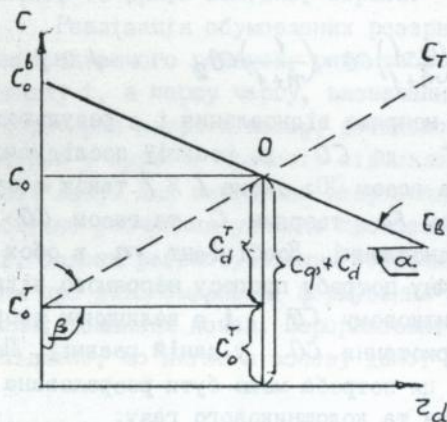


Рис. I. Схема до визначення зв'язків C та z_d з C_o^b та C_o^T

характеризуються двома показниками - потребою у вуглеці-відновлювачі / C_o^b / та вуглеці-джерелі тепла / C_o^T / при фіксованому / $z_d = 0$ / ступені прямого відновлення:

$$z_d = (C_o^b - C_o^T) / (C_o^b + q_d z_c) \quad / 6 /$$

$$C_o = C_o^b - C_o^b (C_o^b - C_o^T) / (C_o^b + q_d z_c) \quad / 7 /$$

де q_d - відношення теплових ефектів реакції відновлення FeO твердим вуглецем та горіння C до CO ;

z_c - частина заліза, що відновлюється з FeO вуглецем коксу прямим та непрямым шляхом.

Графічна ілюстрація рівнянь виявила такі особливості зв'язків, що досліджуються:

I. При зниженні потреби у вуглеці-відновлювачі зменшення витрати палива супроводжується скороченням ступеня прямого відновлення і зниженням інтенсивності газифікації вуглецю киснем шихти. Збереження інтенсивності плавки на попередньому рівні

вимагає підвищення витрати кисню / дуття / через фурми.

2. При скороченні потреби в вуглеці-джерелі тепла зниження витрати палива супроводжується підвищенням ступеня прямого відновлення оксидів заліза, швидкості газифікації вуглецю киснем шихти та інтенсивності плавки, при цьому, без збільшення кількості дуття або вмісту кисню в ньому.

Проведені дослідження дозволили уточнити роль ступеня прямого відновлення заліза у доменному процесі та розкрити його значення як своєрідного координатора витрат вуглецю по каналам відновлення та теплоспоживання. Показано, що при скороченні потреби плавки у вуглеці-джерелі тепла з його допомогою синхронно зменшується витрата вуглецю у процесах відновлення; а при зниженні потреби у вуглеці-відновлювачі, відповідно, зменшується витрата вуглецю в процесах теплообміну. При цьому сам ступінь прямого відновлення не є незалежною змінною, а визначається співвідношенням потреб плавки у вуглеці-відновлювачі і вуглеці-джерелі тепла. При зниженні потреб у вуглеці-відновлювачі ступінь прямого відновлення знижується, що обумовлює скорочення витрати коксу, а при зниженні потреби у вуглеці-джерелі тепла знижується витрата коксу, що обумовлює підвищення ступеня прямого відновлення заліза.

Аналіз особливостей вдосконалення роботи вуглецю в граничних по Z_d умовах показав, що при роботі з Z_d близьким до нуля більш актуальним є зниження потреби плавки в теплі, а при значеннях Z_d близьких до одиниці, відповідно, більш актуальним є скорочення потреб плавки у вуглеці-відновлювачі.

Одним з вірогідних способів скорочення витрати коксу є підвищення коефіцієнта корисної дії вуглецю у процесах відновлення та теплоспоживання. Запропонована методика розрахунку значень указаних к.к.д. і з її допомогою показано, що, по-перше, ефективність роботи вуглецю у процесах відновлення підвищується, зокрема, при зниженні потреби плавки у теплі, та, по-друге, можливості підвищення надзвичайно низьких / $\sim 10\%$ / значень к.к.д. вуглецю у процесах теплоспоживання в умовах доменної плавки обмежені. Останнє пов'язане з витраченням частини завантаженого через колошник вуглецю палива на науглецювання чавуну і пряме відновлення, низьким тепловим ефектом реакції горіння вуглецю біля фурм та високою викидною температурою нижнього сту-

пеня теплообміну, котрий визначає потребу в паливі.

Усе разом обумовлює високу ефективність будь-яких заходів, що націлені на зниження потреб у теплі високотемпературної зони у доменній печі. Практична реалізація даного напрямку полягає в зниженні витрати тепла на виплавлення чавуну та шлаку, скороченні прямого відновлення і, зокрема, Si , підвищенні тепловіддачі вуглецю біля фурм за рахунок збільшення тепловмісту дуття та добавок до дуття, а також зниження тепловитрат на основі вдосконалення газорозподілу в горні та зниження температур у вогнищах горіння.

На основі рівняння / 7 / виведена формула для розрахунку витрати коксу у доменній плавці та наведені рекомендації по використанню встановлених закономірностей для розрахункового аналізу доменного процесу.

2.2. Рационалізація газорозподілу у горні

Очевидними методами підвищення рівномірності розподілу газу по окружності та радіусу горна доменних печей є збільшення числа та одиничних розмірів зон горіння. Якщо реалізація першого методу також очевидна, то здійснення другого вимагає уточнення уявлень про механіку фурмених зон, детального обліку та використання усіх сил, що тут діють.

Узагальнення опублікованих матеріалів про процеси горіння палива біля фурм доменних печей виявило протирічність думок та експериментальних даних з питання про вплив на розмір зон кінетичної енергії дуття, кількості та діаметра фурм і т.д. Це додатково обумовлює необхідність поглиблення уявлень про особливості механічної роботи дуттєвого струменя при його впровадженні в шар сипучого матеріалу.

Вираз для визначення роботи / L / потоку дуття по створенню зони циркуляції / горіння / для ізотермічних умов виведений із закону збереження енергії

$$L = M \left(\Delta p / \rho + \omega^2 / 2 \right) \quad / 8 /$$

Як видно, в указаних умовах у роботу по створенню зони циркуляції поруч з кінетичною енергією дуття реалізується також частина тиску стисненого газу / енергії проштовхування /. Остан-

Не вже на даному етапі дозволяє дати задовільне пояснення експериментально встановленому факту росту розмірів циркуляційних зон у міру збільшення діаметра фурм в умовах постійності кінетичної енергії дуття. При збільшенні діаметра фурм та збереженні величини кінетичної енергії в струмені дуття, пропорціонально зниженню швидкості зростає масовий розход і збільшується запас енергії проштотування. Виходячи з цього, при однаковій кінетичній енергії, струмінь більшого початкового діаметра здатний здійснити більше механічної роботи, в даному випадку, утворити зону циркуляції більшого об'єму.

Уточнення впливу початкового діаметра струменя з використанням рівнянь Г.Н. Абрамовича показало, що останній обставині сприяє також зниження гальмування струменя навколишнім середовищем, в зв'язку зі зменшенням відношення периметра до площі поперечного перерізу струменя.

Для фурм діючих доменних печей обставиною, що ускладнює закономірності, які розглядаються, є вивільнення внутрішньої енергії спалюваного палива, котра передається газу і частково витрачається на здійснення роботи розширення. Показано, що величина роботи пропорційна масі потоку і залежить від складу та температури дуття, а її вплив на розміри зони горіння здійснюється з допомогою змінення статичного тиску газу, тобто першого співдоданка в рівнянні / 8 /. З урахуванням цього, а також взявши до уваги змінення маси / M_d / , складу та густини / ρ_d / дуття в результаті його взаємодії з паливом та виразивши масу та швидкість дуття через його розход / Q_d / , число / n / та діаметр / d / фурм, рівняння / 8 / приведено до вигляду, що зручний для аналізу особливостей впливу різних параметрів плавки на розміри зони горіння

$$L = Q_d \left[\kappa_r \xi (\rho_d - \rho_k) + 0,8 \rho_d Q_d / n^2 d^4 \right] / n \quad / 9 /$$

Тут $\kappa_r = (M_r / M_d) / (\rho_r^4 / \rho_d^4)$ - коефіцієнт, що враховує зміни маси та зв'язаної з складом / нормальної / густини дуття;

$\xi = \Delta P_{sr} / \Delta P_x$ - коефіцієнт, що передає частку втрат тиску в зоні циркуляції в загальному перепаді статичного тиску газу

$$\Delta P_x = \rho_d - \rho_k$$

З рівняння висвічується важлива роль перепаду статичного тиску газу в доменній печі як фактора, що впливає на розміри зон

горіння та газорозподіл у горні. Відоме посилення периферійного газового потоку при використанні інтенсифікаторів, що сприяють зниженню перепаду статичного тиску газу / кисень, підвищення тиску та інше /, пояснюється цією обставиною та підтверджує її.

Звідси формулюється принцип використання інтенсифікаторів доменної плавки, що дозволяє зберегти газорозподіл у горні та полягає у відповідному коректуванні газо-дутьового режиму, яке забезпечує постійність перепаду статичного тиску газу в печі. Як коригуючі впливи можуть використовуватись зміни витрати дуття, розподілу матеріалів та тиску на колошнику, кількості і діаметра фурм. У зв'язку з цим зміни перелічених параметрів, в рамках їх впливу на процес, повинні розглядатися, в одних випадках, як заходи ініціативні, що націлені на вдосконалення плавки, в інших - як заходи у відповідь, що мають за мету збереження газорозподілу при коливаннях інших параметрів плавки. В першому випадку максимальне їх значення, зі всією очевидністю, обумовлюється технічними можливостями обладнання, об'ємом та конструктивними особливостями печей, в другому, відповідно, необхідністю збереження газорозподілу в горні і, зокрема, робочого значення загального перепаду статичного тиску газу. В відповідності з цим, в одних умовах корисним є збільшення кількості або діаметра фурм, тиску на колошнику і таке інше, в інших - їх зменшення. Взагалі це обумовлює відсутність однозначного оптимума значень перелічених параметрів і, зокрема, дана обставина затруднює визначення для печей різного об'єму, кількості та діаметра фурм, які були б оптимальними для будь-яких умов їх роботи.

Проведені дослідження дозволили виявити раціональні комплекси заходів, що забезпечують покращення розподілу газу одночасно по радіусу та окружності горна. В першу чергу до них відносяться збільшення кількості або / та / діаметра повітряних фурм при одночасному збільшенні розходу дуття, а, в разі відсутності на печі резервів по дуттю, при одночасному зниженні тиску колошникового газу в межах, що забезпечують збереження незмінним робочого значення загального перепаду статичного тиску. Зважаючи, що в даному разі створюються умови для економії витрати вуглецю в процесах відновлення та теплоспоживання, а також для підвищення інтенсивності його горіння в кисні дуття та шкоти, вказані комплекси заходів можуть розцінюватись як напрям

вдосконалення доменного процесу, що забезпечує скорочення витрати коксу при одночасному форсуванні плавки.

2.3. Вдосконалення структури стовба матеріалів

У зв'язку з високим ступенем взаємообумовленості явищ доменної плавки ефект від раціоналізації режиму дуття росте при одночасному покращенні структури стовба матеріалів у печах. У роботі вивчені можливості такого покращення, в існуючих умовах якості сировини, за рахунок підвищення газопроникності шару залізородних матеріалів і вдосконалення розподілу матеріалів на колошнику.

Спираючись на дослідження К. Фернеса, М.О. Шаловалова, М.О. Стефановича, В.П. Тарасова та інших, зроблено предположення про можливість підвищення порозності шару агломерату, що на $\sim 60\%$ складається з часток крупністю 5-25 мм при подальшому збільшенні вмісту цих фракцій, зокрема, за рахунок додання до нього залізородних обкатишів. Газопроникність усього стовба шихтових матеріалів у печі, в даному випадку, повинна збільшуватись ще й з причини виводу окремого шару обкатишів, що має, в порівнянні з шарами коксу й агломерату, найбільший газодинамічний опір. Уточнення газодинамічних характеристик агломерату та обкатишів, що було проведене з аналітичних позицій, а також експериментально, підтвердило можливість отримання такого ефекту при змішуванні агломерату з обкатишами в процесі заправки.

Більшість доменних печей України обладнані двоконусними засипними апаратами і в цей час важко назвати загрузочний пристрій, яким би вони могли бути замінені в найближчій перспективі. В цьому зв'язку продовжують бути актуальними дослідження, що мають відношення до закономірностей формування профілю засипки та розподілу матеріалів при загрузці з конуса та використанні типового обертаючого розподільника шихти. Учинені аналітичні та експериментальні дослідження дозволили уточнити закономірності і на цьому ґрунті визначити можливості та шляхи вдосконалення розподілу матеріалів при роботі на типовому обладнанні. В результаті розроблено, захищено авторськими свідоцтвами та випробувано кілька нових способів завантаження, стосовно до найроз-

повсюдженіших конструкцій засипного апарата та розподільника шихти. Розроблені режими включають в себе зменшення кількості станцій, зсув їх положення та зміни послідовності чергування станцій після завершення циклу роботи розподільника чи повного циклу загрузки. Наведені результати досліджень та показаний високий рівень якості окружного розподілу матеріалів, що досягається при використанні розроблених режимів загрузки.

Найбільш радикальним методом, що забезпечує покращення та оптимізацію розподілу матеріалів на колошнику є вдосконалення обладнання загрузки, в першу чергу, засипних апаратів. У цьому зв'язку в останні 20-30 років в усьому світі ведеться активна робота по модернізації відомих та розробці принципово нових конструкцій завантажувальних пристроїв. Проведений аналіз літератури та виробничого досвіду не виявив абсолютних переваг якої-небудь із численних їх конструкцій. Тому на Криворізькому факультеті ДМетІ з участю автора розроблена конструкція безконусного загрузочного пристрою, що включає принципово новий спосіб роботи розподільного елемента - обертового жолоба. Останній має можливість обертатися навколо двох осей: власного центра обертання, що знаходиться на деякій відстані від осі печі, і, разом з цим центром, навколо осі печі. Це забезпечує розгрузочному кінцю жолоба можливість здійснювати плоско-паралельний планетарний рух та подавати струмінь матеріалу в будь-яку точку колошника печі. В роботі наведені матеріали, що свідчать про ширші технологічні можливості запропонованого апарата порівняно з апаратом фірми "Пауль-Вурт".

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ВИРОБНИЧИЙ ДОСВІД ПО РАЦІОНАЛІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ДУТТЯ ТА ЗАГРУЗКИ

3.1. Вплив режиму дуття, кількості та перерізу фурм

Оцінка обгрунтованості основних висновків аналітичного розділу роботи в усіх випадках проводилась спочатку в лабораторних умовах, а потім - на діючих доменних печах комбінату "Криворіжсталь".

Викладена характеристика використаного лабораторного об-

ладнання, методик досліджень та дотримання умов однозначності з натурними зразками. Важливими відмінними особливостями лабораторних установок стали використання стисненого компресорного повітря як дуття та можливість варіювання кількості та діаметра фурм в умовах постійності їх сумарного перерізу. Це дозволяло в ході експеримента окремо спостерігати й співставляти вплив числа фурм при збереженні, зменшенні чи збільшенні їх діаметра та сумарного перерізу, а також кількісно оцінювати значення кінетичної енергії дуття та енергії тиску стисненого газу в створенні зон циркуляції.

Наслідки лабораторних досліджень експериментально підтвердили справедливність обґрунтованих аналітично висновків про реалізацію в роботу по створенню зони циркуляції біля фурм, поряд з кінетичною енергією дуття, також частини енергії тиску стисненого газу. Показано, що при змінах кількості та діаметра фурм міняється структура / співвідношення розходів вказаних енергій / та величина роботи потоку дуття, що затрачена на створення зони. При цьому збільшення як числа, так і діаметра фурм підвищує значимість енергії тиску, відповідно, знижуючи значення кінетичної енергії, і, при тих же енергетичних витратах, викликає зріст сумарної площі горизонтальних проєкцій вогнищ горіння та підвищує рівномірність розподілу газу по поперечному перерізу горна.

У ході експериментів виявлено, що при продувці стаціонарного силучого шару в циліндричній посудині з периферійним підводом дуття через фурми, пропускна по газу здібність та сталість шару зростають при збільшенні як кількості, так і діаметра фурм. При цьому, зокрема, збільшуються витрати дуття, з якими біля фурм створюється вільна від матеріалів порожнина, починається циркуляція часток матеріалу в ній, а також розходи, при яких шар переходить в псевдоскrapлений стан.

Проведеними дослідженнями встановлено, що втрати тиску при продувці шару постійною кількістю дуття залежать від сумарної площі вихідного перерізу і з збільшенням її відносної величини / зменшення $S_r/n S_f$ / понижуються; при постійному сумарному перерізу фурм втрати тиску знижуються по мірі зростання числа фурм, а при постійному числі - з збільшенням їх діаметра.

/ Рис. 2 /. Встановлено, що кількість фурм здійснює вплив на перепад тиску значніше, ніж їх діаметр, тому при одночасному збільшенні числа та зменшенні діаметра в умовах постійності сумарного перерізу фурм страти тиску зменшуються також. Разом з тим, зменшення діаметра фурм знижує ефект, отриманий від зростання їх кількості, в деяких випадках, до нуля. Ефект скорочення страт тиску в зв'язку з сумарним перерізом фурм у проведених дослідженнях зростає від верхньої частини шару до нижньої та мав максимальне значення на фурменій зоні. Звідси витікає, що ефективність впливу збільшення перерізу на форсування плавки дуттям повинна рости при одночасному покращенні газодинамічних умов у верхній частині доменних печей. З іншої сторони, захід, що розглядається, в свою чергу, може бути розцінений як метод підвищення ефективності таких заходів вдосконалення газодинаміки "сухої" зони доменних печей, як покращення гранскладу та міцностних якостей шихтових матеріалів, підвищення тиску колошникового газу і т.п.

На основі проведених аналітичних та лабораторних досліджень зроблені висновки про доцільність збільшення кількості та / або / діаметра повітряних фурм на сучасних вітчизняних печах та видані відповідні рекомендації промисловості.

Промислові випробування та промисловий досвід підтвердили доцільність цього.

В роботі наведені та піддані всебічному аналізу наслідки прибільшення кількості фурм при одночасному зменшенні, збереженні або зростанні їх діаметра на печах об'ємом 1719, 2000, 2700 та 5000 м³ "Криворіжсталі", а також на печах об'ємом 1310 м³ КМК та 10007 м³ ЧерМК. Промисловий досвід та випробування підтвердили справедливість концепції про доцільність збереження діаметра або, принаймні, сумарного перерізу фурм при збільшенні їх числа. Дотримання цієї умови при збільшенні кількості фурм на доменних печах об'ємом 1719, 2000 та 2700 м³ комбінату "Криворіжсталь", а також на згаданих печах КМК та ЧерМК дозволило прибільшити їх продуктивність на 2-28% при зниженні витрати коксу на 1-15%. У той же час зменшення на 10,5% сумарного перерізу / за рахунок діаметра / повітряних фурм при збільшенні їх числа на печі об'ємом 5000 м³ привело

Вплив кількості / чисельник / та діаметра / знаменник /
 фурн на страти тиску при продувці стаціонарного шару

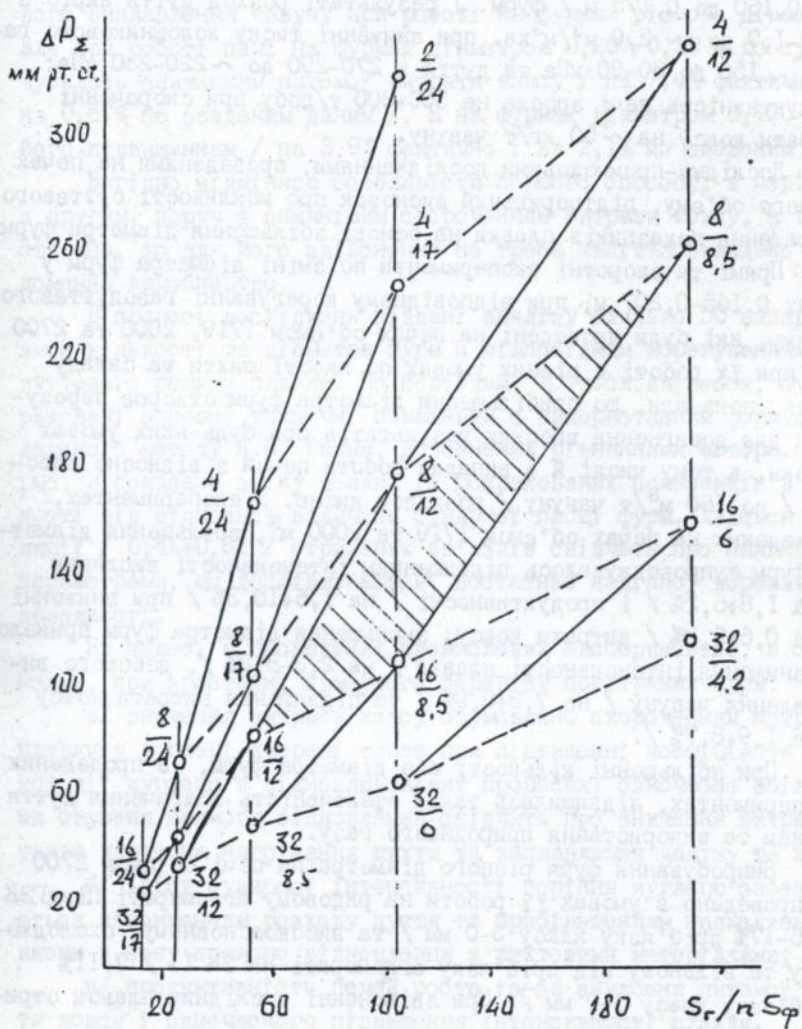


Рис. 2

до зниження на 7% продуктивності печі при незначному скороченні витрати коксу.

Переконливі матеріали отримані на печі об'ємом 2000 м³ при одночасному збільшенні на ній числа / з 20 до 24 / та діаметра / з 0,160 до 0,175 м / фурм. У результаті розход дуття виріс з 1,65-1,7 до ~ 2,0 м³/м³хв. при зниженні тиску колошникового газу з ~ 150 до 80-90 кПа та дуття з 270-290 до ~ 220-230 кПа; продуктивність печі зросла на 500-800 т/добу при скороченні витрати коксу на ~ 50 кг/т чавуну.

Дослідно-промисловими дослідженнями, проведеними на печах різного об'єму, підтверджений висновок про можливості суттєвого покращення показників плавки на основі збільшення діаметра фурм.

Прямі та зворотні експерименти по зміні діаметра фурм у межах 0,165-0,207 м, при відповідному корегуванні газодуттєвого режиму, які були проведені на печах об'ємом 1719, 2000 та 2700 м³, при їх роботі в різних умовах по якості шихти та складу дуття, показали, що збільшення діаметра фурм створює передумови для досягнення високих результатів при будь-яких умовах плавки, в тому числі й в випадку роботи печей з відносно високим / до 160 м³/т чавуну / розходом кисню. В експериментах, проведених на печах об'ємом 1719 та 2000 м³, збільшення діаметра фурм супроводжувалось підвищенням інтенсивності виплавки / на 1,8+6,2% / і продуктивності / на 1,6+10,3% / при зниженні / на 0,6+6,3% / витрати коксу; зменшення діаметра фурм привело до зниження інтенсивності плавки / на 2,3-8,2% /, добового виплавлення чавуну / на 7,8+8,9% / та підвищення витрати коксу / на 1,9+8,7% /.

При збільшенні кількості або діаметра фурм, в проведених експериментах, підвищилась також ефективність збагачення дуття киснем та використання природнього газу.

Випробування фурм різного діаметра на печі об'ємом 2700 м³ проведено в умовах її роботи на рядовому агломераті ПівдГЗК / 16-17% дріб'язку класу 5-0 мм / та високоосновному, охолодженому та вільному від дріб'язку агломераті НКГЗК II / 7-II% дріб'язку класу 5-0 мм /. При здійсненні дослідних плавок отримані такі наслідки:

а/ при збільшенні діаметра фурм показники роботи покращува-

лись в будь-яких шихтових умовах, але при виплавці сировини більш високої якості досягався вищий ефект, як у відношенні продуктивності, так і у відношенні зниження витрати коксу;

б/ покращення якості сировини приводило до зростання добового виплавлення чавуну при роботі на фурмах різного діаметра; але при роботі печі на фурмах діаметром 0,207/0,19 м це супроводжувалось зниженням питомої витрати коксу / на 7,4% фактично і на 0,61% по зведеним даним /, а на фурмах діаметром 0,165 м його підвищенням / на 3,9% фактично і на 2,1% по зведеним даним/.

Вигідно відмінною особливістю першого способу, в порівнянні з другим, поруч з значнішим скороченням витрати коксу, є та обставина, що для його здійснення не треба капіталовкладень в аглодоменне виробництво.

В процесі досліджень піддані аналізу близько 50 випадків змін кількості та діаметра фурм з відповідним корегуванням газодуттєвого режиму плавки. По періодам, що досліджуються, були розраховані основні технічні показники з використанням формул комплексного методу А.Н. Рамма, доповнених рівняннями автора. На рис. 3 показано зміну деяких із розрахованих показників в залежності від відносної величини сумарної площі фурм. Індeksi кореляції / $0,41 \pm 0,62$ / отриманих зв'язків свідчать про наявність між параметрами, що досліджувались, достатньо надійної кореляційної залежності.

Як видно, в проведених промислових експериментах, в середньому, при зростанні сумарного перерізу повітряних фурм:

а/ зниження витрати коксу обумовлено скороченням потреби плавки у вуглеці-джерелі тепла при підвищенні коефіцієнта корисної дії вуглецю в відновлювальних процесах; одночасне збільшення ступеня прямого відновлення свідчить про зниження витрати тепла якраз на нагрівання шихти та виплавлення чавуну та шлаку;

б/ зріст сумарної інтенсивності горіння вуглецю забезпечується підвищенням розходу дуття та приблизненням надходження кисню в зону прямого відновлення з шихтовими матеріалами;

в/ продуктивність печей росте із-за зниження питомої витрати коксу і одночасного підвищення інтенсивності плавки.

Таким чином, дослідно-промислові плавки, проведені в доменних печах різного об'єму, що працюють в різних шихтових та дут-

Вплив сумарного перерізу фурм на деякі показники доменної плавки

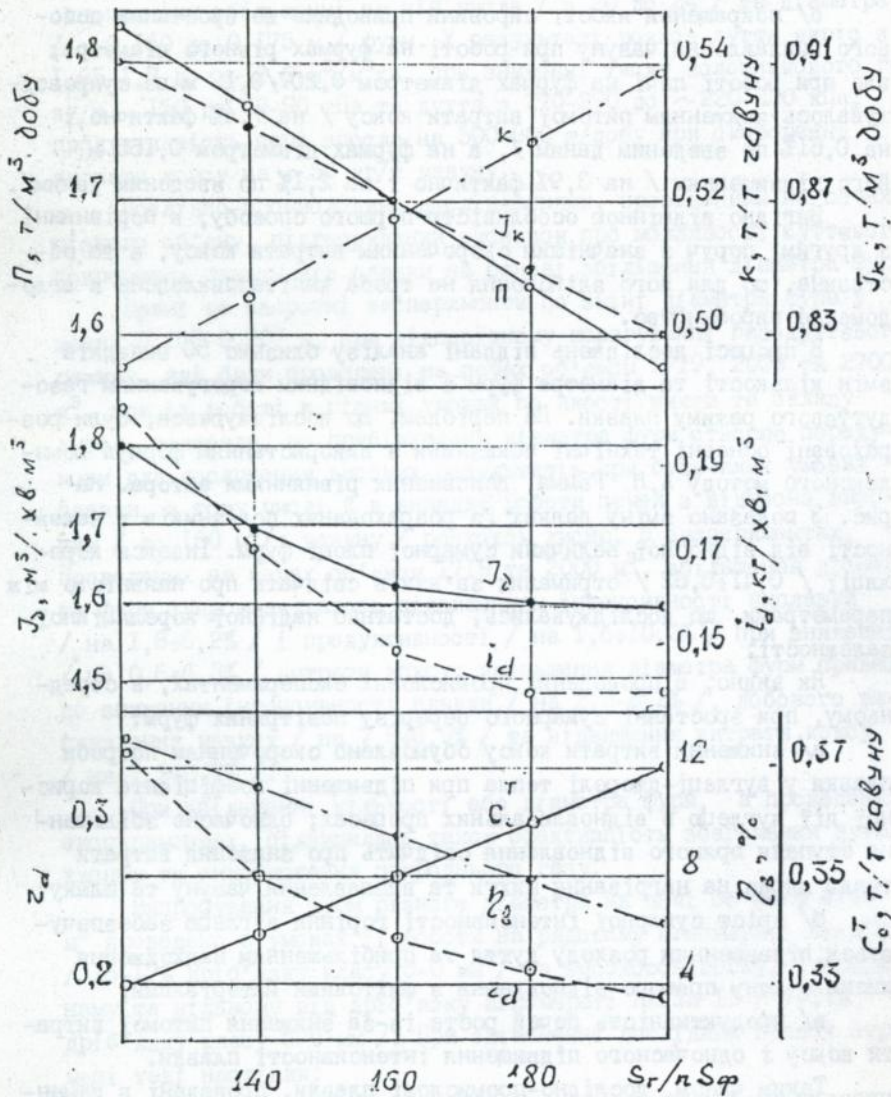


Рис. 3.

тевих умовах, повністю підтвердили обґрунтованість основної гіпотези цієї дисертаційної роботи про наявність в сучасних доменних печах резервів, що належать до подальшого зниження витрати коксу при одночасному підвищенні інтенсивності плавки, та про можливість їх освоєння на підставі раціоналізації параметрів фурм та газодуттєвого режиму плавки.

Проведеними дослідженнями встановлено, що гарантоване покращення показників плавки при збільшенні кількості або діаметра фурм досягається тільки в тому випадку, якщо при цьому не погіршується розподіл газу по радіусу горна. Показано, що, в першому наближенні, граничною умовою, що забезпечує дане положення, можна вважати збереження робочого значення загального перепаду статичного тиску газу.

Промисловими експериментами підтверджене значення загального перепаду тиску газу в доменних печах, як параметра не тільки залежного від газорозподілу, але й такого, що впливає на нього.

Окреслені межі можливого збільшення кількості та діаметра повітряних фурм для вітчизняних доменних печей різного об'єму. Запропоновано рівняння для визначення необхідної кількості фурм. Показано, що можливості до збільшення числа фурм, при існуючих конструкціях фурмених приладів, є у доменних печах об'ємом до 3000 м³; число фурм, поставлених після реконструкції на печі об'ємом 5000 м³ / 42 /, при їх розміщенні в один ряд є крайнім.

Проведені аналітичні, лабораторні та промислові дослідження та випробування дозволяють вважати доцільним збільшення на доменних печах України також діаметра повітряних фурм / до 0,19-0,21 м / при одночасному підвищенні розходу дуття чи використанні інших заходів, що забезпечують збереження, а на ряді печей і підвищення / на 10-30 кПа / величини загального перепаду статичного тиску газу.

3.2. Вдосконалення структури стовба матеріалів

Найрадикальнішим методом підвищення газопроникності верхньої частини доменних печей є покращення ситового складу та міцності шихтових матеріалів і, в першу чергу, агломерату, але це вимагає капіталовкладень в аглодоменне виробництво. Часткове вирішення проблеми якості залізорудної сировини, що завантажу-

ється в печі, може бути здійсненим за рахунок модернізації обладнання шихтоподач та покращення роботи механізмів, призначених для виділення дрібних та пороховидних фракцій із агломерату та обкатишів. Останнє збільшує витрату залізорудних матеріалів на виплавлення чавуну і, в зв'язку з цим, може знаходити примінення тільки в умовах наявності деякого їх надміру, що в ряді випадків також обертається необхідністю вкладення коштів у виробництво обкускованої залізорудної сировини.

Проведені експериментальні дослідження та випробування в лабораторних та промислових умовах підтвердили можливість вирішення проблеми вдосконалення структури стовба шихтових матеріалів в умовах існуючої їх якості на основі раціоналізації режимів загрузки та розподілу матеріалів на колошнику.

В дисертаційній роботі дані характеристики обладнання, використаних методик та подані наслідки детального вивчення поведінки сумішей агломерату з обкатишами під дією статичних, ударних та відстираючих навантажень у холодному стані та при відновлювальній обробці, а також продувок в аеродинамічній трубі, які підтвердили очікувані більш високі газодинамічні характеристики сумішей. Дослідження показали, зокрема, що, поруч з підвищенням порозності, однією з причин більш високої газопроникності даних сумішей є менше їх руйнування під дією різних навантажень як у холодному стані, так і при нагріванні та відновлювальній обробці. Установлені закономірності підкріплені наслідками дослідно-промислових випробувань режимів загрузки, що включають змішування агломерату з обкатишами, на доменних печах різного об'єму. Результати проведених досліджень дозволили рекомендувати такі режими загрузки для промислового впровадження, що й було здійснено на доменних печах №1-4 та №9 комбінату "Криворіжсталь", обладнання дільниці загрузки яких дозволяє організувати ефективне змішування залізорудних матеріалів. Нині такі режими загрузки розповсюджуються на інших заводах.

Проведено уточнення впливу радіального розподілу матеріалів на колошнику на показники роботи доменних печей в умовах комбінату "Криворіжсталь", внаслідок чого підтверджена доцільність впровадження V-подібного розподілу шихти по радіусу печей. Дослідженнями та дослідними плавками, проведеними на трьох доменних печах великого об'єму, показано, що підгрузка

периферії, що забезпечує підвищення вмісту CO_2 в газі з периферійної зони з 8-10 до 14-16% та відповідне зниження в центрі з 10-12 до 2-4%, що покращує використання теплової та відновлювальної енергії газу та супроводжується зниженням перепаду статичного тиску газу при тому ж розході дуття. Раціональний розподіл матеріалів по радіусу колошника на вказаних печах, обладнаних типовими завантажувальними пристроями, було досягнуто шляхом зменшення маси подачі, пониження рівня засипки та збільшення частки прямих подач у циклі загрузки і привело до скорочення витрати коксу на 1-3,5% та підвищення продуктивності печей на 2-5%.

Приведені наслідки дослідних плавок, проведених на доменних печах різного об'єму, які підтверджують висновки аналітичного розділу роботи в частині можливості підвищення якості горизонтального розподілу матеріалів при роботі на двоконусних апаратах УЗТМ з використання обертового розподільника шихти. За рахунок раціоналізації режимів загрузки, що втілюється в зменшенні кількості станцій роботи розподільника шихти до 3-х - 6-ти та циклуванні прямих та зворотних подач числами, кратними кількості станцій ОПШ, продуктивність печей зростала на 1,5+6,0% при зниженні витрати коксу на 1,5-2,0%.

4. ЗАВЕРШЕННЯ

В дисертаційній роботі здійснено узагальнення стану ряду питань теорії та практики доменної виплавки і, на базі використання науково-обґрунтованих методів розрахунку та аналізу явищ доменного процесу, а також експериментів та дослідних плавок, проведених в лабораторних умовах та промислових доменних печах, здійснена спроба вирішення значної наукової проблеми, що має важливе народногосподарське значення та міститься в подальшому зниженні витрати коксу при одночасній інтенсифікації ходу плавки. Розроблені, випробувані та освоєні на вітчизняних доменних печах елементи технології плавки, що забезпечує підвищення витрати дуття, ефективно використання інтенсификаторів процесу та заміників коксу, економне розходження вуглецю в процесах відновлення та теплоспоживання.

Наведені в роботі наслідки досліджень та випробувань

дозволяють зробити такі основні висновки:

1. Збільшення об'єму доменних печей, підвищення тиску колошникового газу, основності та вмісту заліза в агломераті, розширення застосування високонагрітого комбінованого дуття та інші заходи, що забезпечували високі темпи розвитку доменного виробництва на протязі 1950-1975 років, по екстенсивності свого використання нині наближаються до завершення. Нові розробки, направлені на подальше зниження витрати коксу та інтенсифікацію плавки для свого впровадження повинні пройти стадії технічної та технологічної доробки та, крім того, вимагають капіталовкладень в аглодоменне виробництво. Все разом обумовлює актуальність пошуку заходів по вдосконаленню прийомів впливу на хід печей, які забезпечують реалізацію технологічних резервів доменної плавки.

2. Розроблена методика аналізу перспектив зниження витрат палива при виплавленні чавуну на підставі роздільного врахування та наступного співставлення ефективності скорочення потреб у вуглеці процесів відновлення та теплоспоживання. В ході аналізу уточнена роль ступеня прямого відновлення заліза як координатора та синхронізатора розходування вуглецю палива в тепло- та масообмінних процесах, означений коефіцієнт корисної дії вуглецю в кожному з них та розкрита фізична суть високої ефективності заходів, що мають за мету зниження потреби плавки у високотемпературному теплі. Показано, що сучасне доменне виробництво володіє суттєвими резервами по витраті коксу та інтенсивності плавки, які можуть бути освоєні в існуючих умовах роботи печей на основі скорочення потреби у вуглеці як джерелі тепла. При цьому зменшується витрата коксу, що обумовлює підвищення ступеня прямого відновлення заліза, через що виростає коефіцієнт корисної дії вуглецю в процесах відновлення та швидкість газифікації коксу киснем шихти. Продуктивність печей підвищується внаслідок зниження витрати палива та одночасного збільшення інтенсивності його горіння. Одним з можливих шляхів вирішення проблеми є скорочення винесення фізичного та хімічного тепла з продуктами плавки та тепловтрат. Останнє досягається шляхом удосконалення газорозподілу в горні.

3. З використанням закону збереження енергії розроблена методика аналізу впливу параметрів фурм та показників газоди-

намічного режиму плавки на газорозподіл у горні. На основі балансу енергії в зоні горіння виведені рівняння зв'язку роботи потоку дуття по створенню вогнища горіння з параметрами, що її визначають, для ізотермічних умов лабораторних експериментів та неізотермічних умов діючих печей. В умовах постійності фізичних властивостей і розподілу шихтових матеріалів на колошнику печі газорозподіл у горні визначається кількістю та одиничними розмірами вогнищ горіння біля повітряних фурм і може бути покращеним за рахунок збільшення числа фурм та реалізації заходів, що забезпечують зріст одиничних об'ємів зон горіння. Проведеними дослідженнями встановлено, що такими заходами можуть бути збільшення діаметра фурм з одночасним підвищенням розходу дуття або зниження тиску колошникового газу в межах, що обумовлюються постійністю кінетичної енергії дуття або робочого значення загального перепаду статичного тиску газу. Розміри циркуляційних зон, при цьому, зростають через:

- збільшення в струменні дуття, що витікає з фурм, запалу, а також зріст участі у створенні зон, енергії стисненого газу / проштовхування /;

- скорочення витрат / дисипацію / механічної енергії потоку дуття в теплову в процесах тертя, в зв'язку зі зменшенням питомої бокової поверхні гальмування потоку;

- значніший зріст в зонах горіння на діючих печах енергії проштовхування за рахунок внутрішньої енергії палива, що пов'язане із збільшенням швидкості його газифікації.

4. Випробування та досвід примінення вдосконалення, що рекомендується, параметрів фурм та газодинамічного режиму плавки на промислових доменних печах комбінату "Криворіжсталь" та інших підприємств в повній мірі підтвердили спроможність висновків роботи в частині наявності та шляхів освоєння на сучасних доменних печах резервів по витраті коксу та продуктивності. При цьому збільшення як кількості, так і діаметра повітряних фурм в умовах одночасного підвищення розходу дуття привело до:

- збільшення / на 2-28% / продуктивності печей у зв'язку із зниженням / на 1-15% / витрати коксу та підвищенням інтенсивності його горіння;

- скорочення витрати коксу через зменшення теплотребі

плавки з підвищенням ступеня прямого відновлення та коефіцієнта корисної дії вуглецю у відновлювальних процесах;

- підвищення інтенсивності плавки із-за збільшення розходу дуття та швидкості газифікації коксу киснем шихти;

- зі збільшенням кількості та зменшенням діаметра фурм позитивний ефект в проведених випробуваннях мав місце в тому випадку, якщо сумарний переріз фурм не зменшувався;

- ефективність заходів "знизу" в проведених експериментах та дослідних плавках зростала при одночасному вдосконаленні структури стовба шихтових матеріалів.

5. Розроблені, випробувані в лабораторних та промислових умовах та здійснені на практиці заходи по покращенню структури стовба матеріалів при існуючій якості на підставі модернізації обладнання загрузки, а також підвищення газопроникності шару залізородних компонентів шихти. Детально вивчено поведінку сумішей агломерату з обкатишами під дією статичних, ударних та відстираючих навантажень у холодному стані та при відновлювально-тепловій обробці. Показано, що, в порівнянні з пошаровою загрузкою суміш має вищу газопроникність через вивід із складу стовба шихти окремого шару обкатишів, скорочення руйнування матеріалів, а також зниження вмісту дріб'язку класу 0-5 мм та підвищення частки середніх фракцій 5-25 мм в шарі агломерату.

6. Розроблена методика, з допомогою якої вивчені та уточнені закономірності формування профілю засипу матеріалів на колошнику при завантаженні з конуса та роботі обертового розподільника шихти по станціям. Розроблені, випробувані та впроваджені на печах "Криворіжсталі" ряд нових режимів загрузки, що забезпечують підвищення якості розподілу матеріалів при використанні найрозповсюдженіших типових двоконусних загрузочних пристроїв.

7. Стосовно безконусних загрузочних пристроїв розроблена конструкція розподільника шихти нового покоління, що має більш широкі технологічні можливості, порівняно з існуючими.

Основний зміст дисертації опубліковано в роботах:

1. Влияние режимов загрузки и дутья на распределение потока газа по радиальному сечению доменных печей / Г.А. Воловик, Е.Г. Донсков, В.И. Бондаренко и др. // Известия вузов. ЧМ.- 1972.- №12.- С. 81-83.
2. Влияние распределения газа по радиусу низа доменных печей большого объема на их работу / Г.А. Воловик, Е.Г. Донсков, В.И. Бондаренко и др. // Известия вузов. ЧМ.- 1973.- №1.- С. 33-36.
3. Влияние кинетической энергии дутья на радиальное распределение газа в шахте доменной печи / Г.А. Воловик, Е.Г. Донсков, Б.В. Боклан и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность.- 1973.- №3.- С. 3-5.
4. Работа доменных печей на фурмах различного диаметра / Г.А. Воловик, Е.Г. Донсков, Б.В. Боклан и др. // Metallург.- 1973.- №3.- С. 5-6.
5. Радиальное распределение газового потока в доменных печах большого объема / Е.Г. Донсков, Б.В. Боклан, В.А. Шатлов, В.И. Бондаренко // Metallург.- 1973.- №7.- С. 10-12.
6. Определение количественного распределения газового потока по радиальному сечению доменной печи / Б.В. Боклан, Е.Г. Донсков, В.И. Бондаренко, В.А. Шатлов // Metallургия и коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техника.- 1974.- Вып. 38.- С. 34-39.
7. Уширение колошника мощных доменных печей / Е.Г. Донсков, В.А. Шатлов, Р.Д. Каменев и др. // Metallург.- 1974.- №5.- С. 6-8.
8. Исследование работы доменной печи полезным объемом 2000 м³ после капитального ремонта / В.А. Шатлов, Р.Д. Каменев, Е.Г. Донсков и др. // Сталь.- 1974.- №3.- С. 197-201.
9. О числе и элементах сечения воздушных фурм доменных печей / Е.Г. Донсков, Б.В. Боклан, В.А. Шатлов и др. // Metallургия и коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техника.- 1975.- Вып. 43 - С. 65-71.
10. Анализ влияния начальной температуры газов у фурм и параметров комбинированного дутья на газодинамику доменного процесса / И.Г. Товаровский, В.И. Бондаренко, Е.Г. Донсков и др. // Сталь.- 1975.- №12.- С. 1069-1073.
11. Сравнение показателей работы доменных печей различного объема / Е.Г. Донсков, Г.А. Воловик, В.А. Шатлов и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность.- 1976.- №2.- С. 3-5.
12. Оценка причин снижения форсировки хода доменных печей большого объема / Г.А. Воловик, Е.Г. Донсков, Н.С. Снаговская и др. // Metallургия и коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техника.- Вып. 48.- 1976.- С. 62-65.
13. Кинетическая энергия дутья доменных печей разного объема / Г.А. Воловик, Е.Г. Донсков, Н.С. Снаговская и др. // Metallургия и коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техника.- 1976.- Вып. 48.- С. 66-68.
14. Влияние суммарного сечения воздушных фурм на потери напора газа в доменной печи / Е.Г. Донсков, В.Т. Оськин, Б.В. Боклан и др. // Сталь.- 1978.- №9.- С. 787-792.
15. К вопросу о влиянии количества и диаметра воздушных фурм на

- показатели работы доменной печи / Г.А. Воловик, Е.Г. Донсков, Б.В. Боклан и др. // Известия вузов. ЧМ.- 1979.- №12.- С. 24-29.
16. Улучшение работы доменной печи при изменении загрузки шихты, содержащей окатыши / И.Т. Хомич, А.Я. Зусмановский, Г.А. Воловик, Е.Г. Донсков и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность.- 1979.- №4.- С. 60-61.
 17. Оптимизация радиального распределения шихтовых материалов, содержащих железорудные окатыши / Е.Г. Донсков, И.Г. Ризницкий, Б.В. Боклан и др. // Metallург.- 1979.- №4.- С. 10-13.
 18. Управление распределением газового потока по окружности печи / Е.Г. Донсков, И.Г. Ризницкий, И.А. Прокофьев и др. // Metallург.- 1979.- №10.- С. 12-15.
 19. Работа доменной печи с использованием освобожденного от мелочи высокоосновного агломерата / И.А. Прокофьев, И.Г. Товаровский, В.И. Бондаренко, Е.Г. Донсков и др. // Сталь.- 1979.- №5.- С. 332-333.
 20. К вопросу об оптимальном распределении шихты по радиусу колошника / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк, Г.А. Воловик и др. // Известия вузов. ЧМ.- 1980.- №8.- С. 23-25.
 21. Исследование циркуляции материалов в фурменной зоне в лабораторных условиях / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк, Б.В. Боклан и др. // Metallургия и коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техника.- 1980.- Вып. №70.- С. 57-61.
 22. Об улучшении газодинамических характеристик шихтовых материалов в процессе загрузки доменных печей / Е.Г. Донсков, А.Д. Учитель, И.Г. Ризницкий и др. // Сталь.- 1980.- №7.- С. 552-559.
 23. Влияние параметров струи дутья и слоя кокса на длину фурменной зоны циркуляции / Е.Г. Донсков, Г.А. Воловик, Н.А. Гладков и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность.- 1980.- №3.- С. 7-8.
 24. Работа доменных печей при смешивании агломерата с окатышами в процессе их загрузки / Е.Г. Донсков, И.Г. Ризницкий, Р.Д. Каменев и др. // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема.- М: Metallургия.- 1981.- С. 35-39.
 25. О работе доменных печей на фурмах разной формы и площади выходного сечения. Сообщения 1 и 2 / Б.В. Боклан, Е.Г. Донсков, В.М. Гладуш и др. // Известия вузов. ЧМ.- 1981.- №3.- С. 31-33; №5.- С. 30-32.
 26. Донсков Е.Г., Лялюк В.П. О кинетической энергии дутья и ее влиянии на размеры зон горения у фурм доменной печи // Сталь.- 1981.- №7.- С. 9-12.
 27. Работа доменной печи на фурмах различного диаметра с использованием освобожденного от мелочи высокоосновного агломерата / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк, Р.Д. Каменев и др. // Metallургическая и горнорудная промышленность.- 1982.- №3.- С. 7-9.
 28. Донсков Е.Г. Анализ связей потребностей доменной плавки в углеводе-восстановителе и в углеводе-источнике тепла с общим расходом углерода и степенью прямого восстановления окислов железа // Metallургия и коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техника.- Вып. 75.- С. 68-76.
 29. Донсков Е.Г., Каменев Р.Д. Определение расхода кокса без учета прямого восстановления окислов железа // Metallургия и

- коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техника.- 1982.- Вып. 75.- С. 77-80.
30. Реализация набора двух скипов шихты в распределитель типового загрузочного устройства ломенной печи / Д.А. Сторожик, В.Д. Сергиенко, О.И. Демин, Е.Г. Донсков и др. // Сталь.- 1982.- С. 29-32.
 31. Донсков Е.Г., Боклан Б.В., Фомин Л.Д. Исследование взаимосвязей распределения газа по радиусу и окружности доменных печей // Проблемы автоматизированного управления доменным производством.- ЦНИИ ТЭИ приборостроения.- 1983.- С. 10-11.
 32. Исследование окружного распределения материалов при различных режимах работы ВРШ / Е.Г. Донсков, Л.Д. Фомин, В.П. Лялюк и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1984.- №2.- С. 3-5.
 33. Донсков Е.Г. Исследование влияния количества станций типового вращающегося распределителя шихты на равномерность распределения материалов по окружности печи. Сообщения I и 2 // Известия вузов. ЧМ.- 1984.- №6.- С. 20-25; №8.- С. 31-39.
 34. Влияние количества и диаметра воздушных фурм на газопроницаемость стационарного слоя / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк, Н.А. Гладков и др. // Известия вузов. ЧМ.- 1985.- №3.- С. 21-25.
 35. Эффективность использования повышенного давления в современных условиях доменной плавки / Е.Г. Донсков, Р.Д. Каменев, В.П. Лялюк и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность.- 1987.- №1.- С. 12-14.
 36. Донсков Е.Г. Совершенствование газораспределения в горне доменных печей. Сообщения I и 2 // Известия вузов. ЧМ.- 1987.- №10.- С. 17-20; №12.- С. 24-29.
 37. Донсков Е.Г. Эффективность использования доменной печи как нагревательного аппарата // Металлургия и коксохимия: Респ. межвед. научно-техн. сб.- Киев: Техника.- 1988.- Вып. 88.- С. 55-60.
 38. Совершенствование технологии плавки на доменной печи объемом 2000 м³ после капитального ремонта / Е.Г. Донсков, В.П. Лялюк, И.И. Дышлевич и др. // Бюллетень ЦНИИЧМ.- 1990.- №9.- С. 45-46.
 39. Донсков Е.Г. Анализ перспектив снижения расхода кокса в доменном процессе // Известия вузов. ЧМ.- 1990.- №4.- С. 10-13.

По темі дисертації отримані авторські свідоцтва СРСР №№
663641, 713919, 922153, 926016, 1068484, 1174094, 1206311,
1527268, 1669988, 1678844.

AB 27.084

AB 27.084