

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

БРУСОВ АНДРІЙ ЛЬВОВИЧ

УДК 669.162.24

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ І ТЕХНОЛОГІЇ РОЗПОДІЛУ ШИХТИ
НА КОЛОШНИКУ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ
ЛОТКОВИМ ЗАВАНТАЖУВАЛЬНИМ ПРИСТРОЄМ**

Спеціальність 05.16.02 –

Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Донецьк-2014

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» (м.Донецьк) Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
ЯРОШЕВСЬКИЙ Станіслав Львович,
Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»,
(м. Донецьк), професор кафедри руднотермічних процесів і маловідходних технологій

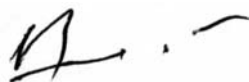
Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
КОВШОВ Володимир Миколайович,
Національна металургійна академія України,
(м. Дніпропетровськ), професор кафедри металургії чавуну;
кандидат технічних наук,
СЕМЕНОВ Юрій Станіславович,
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова
НАН України, (м. Дніпропетровськ), старший науковий співробітник відділу технологічного обладнання та систем управління.

Захист відбудеться « 26 » червня 2014 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.01 Державного вищого навчального закладу "Донецький національний технічний університет" за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, I навчальний корпус, малий актовий зал.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Державного вищого навчального закладу "Донецький національний технічний університет" за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, 2 навчальний корпус.

Автореферат розісланий « ___ » травня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 11.052.01, д.т.н., проф.



О.В. Яковченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Сучасний етап розвитку технології доменної плавки неможливий без заміни частини коксу альтернативними видами палива та покращення якості шихтових матеріалів. Це неминуче призведе до подальшого скорочення витрат коксу і більш напруженого газодинамічного режиму. Установка на доменних печах (ДП) безконусних завантажувальних пристроїв з обертовим розподільчим лотком (лоткових завантажувальних пристроїв (ЛЗП)), а головне, застосування раціональних режимів завантаження та автоматизованих систем управління розподілом шихтових матеріалів дозволить не тільки підвищити ефект від коксозберегаючих технологій, але й додатково заощадити кокс. Потрібно підкреслити, що саме ЛЗП найкращим чином підходить як для оптимізації завантаження, так і для автоматизації управління розподілом шихти. Завдання оптимізації розподілу шихти цим типом завантажувальних пристроїв (ЗП) актуальне, оскільки в останні роки відновилася практика оснащення ДП України ЛЗП вітчизняного (ВО "Азовмаш") та закордонного (фірма «Paul Wurth») виробництва. Так, вітчизняні пристрої працюють на ДП-3, 4 ПАТ «Азовсталь» і ДП-1 ПАТ «Алчевський металургійний комбінат».

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Питання та завдання, розглянуті в дисертаційній роботі, відповідають Державній програмі енергозбереження та Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року. Матеріали дисертаційної роботи узагальнення наукових і практичних результатів, отриманих автором у 1983-2005 роках при виконанні науково-дослідних робіт (НДР).

У 1982 році ДКНТ СРСР було прийнято рішення про створення (розробку конструкції та впровадження) вітчизняного ЛЗП. Перший такий пристрій планувалося встановити на ДП-3 ПАТ «Азовсталь». Дондідчормет (м. Донецьк) виконував науково-технічний супровід роботи, а автор був науковим керівником НДР: «Розробити конструкцію і впровадити безконусний завантажувальний пристрій з лотковим розподільником шихти. Освоїти роботу завантажувального пристрою і технологію доменної плавки з використанням системи автоматичного розподілу матеріалів на колошнику доменної печі. НДР № 554/83» (№ держ. реєстрації 01830009223); «Узагальнити досвід експлуатації існуючих і оцінити технологічні можливості перспективних конструкцій завантажувальних пристроїв доменних печей» (№ держ. реєстрації 01900027687); «Розробити програму розрахунку розподілу шихти відповідно до умов роботи ДП-3 комбінату «Азовсталь»» (№ держ. реєстрації 0193U014760). В якості наукового керівника НДР від науково-виробничої фірми (НВФ) «Стенд» (м. Донецьк) автор брав участь у дослідженні газорозподілу на колошнику за інформацією про температуру від стаціонарного охолоджуваного термозонду: «Розробити програмне забезпечення для аналізу газорозподілу на колошнику з використанням показань термозонду на промисловому комп'ютері» (№ держ. реєстрації 0196U021267).

Результати досліджень використані автором при розробці технологічних завдань: «Технологічне завдання для складання вихідних вимог на розробку та осво-

ення безконусного завантажувального пристрою з обертовим розподільчим лотком доменної печі об'ємом 3200 м³: ТЛЗ-5.2-20-65-85»; «Технологічне завдання на створення безконусного завантажувального пристрою лоткового типу для доменних печей: ТЛЗ-5.2-20-75-86»; «Автоматизація та електрична частина завантаження і розподілу шихти на колошнику доменної печі з урахуванням технологічних особливостей БЗП: 18.191.001.000.ТЛЗ». Зазначені роботи спрямовані на вдосконалення конструкції і технології розподілу шихти ЛЗП, а також автоматизацію цього процесу, і стали базовими для дисертації.

Мета і завдання дослідження.

Метою роботи є теоретичне та експериментальне обґрунтування нових технологічних прийомів управління розподілом шихти на колошнику ДП шляхом врахування особливостей руху шихтовим трактом і укладання шихти ЛЗП, а також створення комп'ютерної інформаційної системи збору та аналізу оперативної інформації про розподіл температури газового потоку для зменшення окружної нерівномірності, підвищення ступеня використання відновлювальної здатності газу та скорочення витрати коксу.

Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовані завдання:

- вивчити особливості формування та структуру укладки шихтових матеріалів у доменній печі ЛЗП;
- промодельовати рух шихти шихтовим трактом і визначити раціональні параметри, що забезпечують високу якість розподілу на колошнику;
- розробити засоби і методи оперативного контролю газорозподілу;
- розробити математичні моделі розподілу шихтових матеріалів;
- удосконалити технологію доменної плавки щодо управління розподілом шихти «зверху» і впровадити систему оперативного контролю газорозподілу безпосередньо на колошнику.

Об'єкт дослідження. Процес завантаження та розподілу шихтових матеріалів лотковим завантажувальним пристроєм доменної печі.

Предмет дослідження. Вплив параметрів завантаження і ЛЗУ на розподіл шихти і газового потоку по колу і радіусу колошника ДП.

Методи дослідження. При виконанні роботи використані методи фізичного моделювання в масштабі 1:1 і 1:5, аналітичного моделювання на комп'ютері розподілу шихти, а також статистичної обробки результатів. Початкові дослідження проведені на стенді Донндічормет в масштабі 1:5 за методикою, розробленою з використанням основних положень теорії подібності. Рекомендації щодо режиму завантаження доменної печі остаточно перевірені на стенді натуральних розмірів, що був побудований на рудному дворі доменного цеху ПАТ «Азовсталь», а також безпосередньо на печі перед її задувкою.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше встановлено і математично обґрунтовано вплив взаємного перекриття двох ділянок завантаження із змінюваною витратою (початкової і кінцевої) на нерівномірність розподілу порції шихти по колу колошника. Встановлено, що при заданій цілій частині числа витків, мінімальній окружній нерівномірності відповідає завантаження порції, за яким дробова частина числа витків має

проміжне значення між величинами початкової і кінцевої ділянок завантаження (від 0,2 до 0,4 за результатами експериментів).

2. Отримали подальший розвиток уявлення про вплив особливостей завантаження лотковим пристроєм з паралельними і симетрично розташованими бункерами, а саме, відхилення потоку шихти на розподільний лоток від осі його обертання, на її окружний розподіл. Встановлено, що при зміні бункера, що вивантажується, або напряму обертання лотка відбувається симетрична зміна окружного розподілу: осьова симетрія відносно осі печі – в першому випадку, і дзеркальна, відносно площини, що проходить через осі бункерів і вісь печі, у другому.

3. Отримали подальший розвиток уявлення про взаємозв'язок між температурою над рівнем засипу і хімічним складом колошникового газу під рівнем засипу. Показано, що для коректного зіставлення з хімічним складом дані про температуру газу потрібно усереднювати за дві години, що передують часу забору проби, при цьому збільшення температури на 100 °С відповідає зменшенню частки CO₂ на 3 %.

4. Вперше встановлені значення параметрів температурного поля колошникового газу над рівнем засипу на підставі тривалих спостережень. Використовуючи охолоджувані термозонди і комп'ютерну інформаційну систему для безперервного контролю температури газу за діаметром колошника над рівнем засипу, був зібраний щохвилинний масив даних за два роки. Встановлено, що з імовірністю 96 % швидкість зміни температури в часі потрапляє в інтервал ± 30 °С/хв., а виключивши вплив завантаження – ± 5 °С/хв. (85 %), градієнт температури по радіусу не більше 5 °С/см (98 %).

Практичне значення отриманих результатів підтверджено ефективним використанням удосконаленої технології доменної плавки щодо управління розподілом шихти «зверху», а також створеною системою контролю температури газового потоку над рівнем засипу, і полягає в наступному:

1. Впроваджено вдосконалену технологію доменної плавки щодо управління розподілом шихти «зверху» з використанням першого вітчизняного ЛЗП стосовно до шихтових умов роботи ДП-3 ПАТ «Азовсталь». Це забезпечило скорочення витрат коксу на 20 кг/т чавуну і збільшення виробництва чавуну на 5,2 %. Отримано фактичний економічний ефект 574 тис. руб. (у цінах до 1991 р.). Частка здобувача становить 20 % або 114,8 тис. руб.

2. Раціональний вибір часу вивантаження порції, при якому дробова частина числа витків дорівнює $0,3 \pm 0,1$, дозволяє, замкнувши витки, зменшити окружну нерівномірність у 2 рази. Запропоновано алгоритм «м'якої» компенсації окружної нерівномірності розподілу газового потоку зміною режиму завантаження, а саме: початкового сектора і часу вивантаження порції. Основні принципи управління окружним розподілом використані при розробці ТЛЗ (18.191.001.000.ТЛЗ), яке включено до робочої документації «Автоматизована система управління БЗП ДП-5 ВАТ «Запоріжсталь»», виконаної УкрДІПРОМЕЗом.

3. Розроблено математичну модель, яка заснована на системі диференціальних рівнянь руху потоку шихти по лотку і траєкторії її польоту з урахуванням зміни початкових умов руху при повороті розподільного лотка через відхилення потоку ши-

хти від осі його обертання. Використання моделі дозволяє прогнозувати характер окружного розподілу і вплив на нього параметрів ЛЗП, наприклад, довжини, радіуса і швидкості обертання лотка.

4. На «Спосіб ведення доменної плавки», який заснований на теоретичних уявленнях про симетричну зміну розподілу шихти по колу та аналізі показань периферійних термопар доменної печі, отримано АС СРСР № 1715847 і патент України № 1589. Практичне використання цього технологічного прийому дозволило істотно (з 500 °С до 200 °С) зменшити окружну нерівномірність розподілу температури газового потоку, що підвищило ступінь використання відновної здатності газу на 1 %.

5. Створено комп'ютерну інформаційну систему контролю розподілу температури по радіусу колошника. Джерело вхідної інформації - охолоджуваний термозонд для безперервного контролю температури газу над рівнем засипу, конструкція якого не спотворює показань термопар (патент України на винахід 22809). На шести доменних печах України встановлені термозонди нової конструкції: ДП-3, 4 і 5 ВАТ «Запоріжсталь», ДП-3 ПАТ «Алчевський металургійний комбінат», ДП-3 ПАТ «АЗОВСТАЛЬ», ДП-5 ПАТ «ММК ім. Ілліча», а розроблена методика контролю розподілу газового потоку використовується для вибору режимів завантаження і відображена в заводських технологічних інструкціях.

Особистий внесок здобувача. Основні ідеї досліджень належать автору дисертації. Здобувачем досліджено і математично описано вплив взаємного перекриття початкової і кінцевої ділянок укладання порції шихти на нерівномірність її розподілу. Фактичні показання периферійних термопар доменної печі зіставлені з теоретичними уявленнями про причини окружної нерівномірності і запропонований технологічний прийом компенсації нерівномірності. Розроблено методику коректного порівняння хімічного складу і температури газу, сформульовані основні вимоги до комп'ютерної інформаційної системи контролю розподілу температури по радіусу колошника.

У розробці деяких технічних рішень та їх реалізації взяли участь співробітники ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Дондідчормет, НПФ «Стенд», ВАТ «Запоріжсталь», ПАТ «АЗОВСТАЛЬ», ПАТ «ММК ім. Ілліча» та інших підприємств, що знайшло відображення у спільних статтях.

Апробація результатів дисертації. Основні результати обговорені на: Всеукраїнській НТК «Механическое и мехатронное оборудование заводов чёрной металлургии» (м. Донецьк, 6-7 квітня 2011 р.); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах» (м. Маріуполь, 7-9 вересня 2010 р.); Міжнародній науково-практичній конференції «Творческое наследие Б.И. Китаева» (м. Єкатеринбург, 11-14 лютого 2009 р.); Міжнародному конгресі доменщиків «Производство чугуна на рубеже столетий» (м. Дніпропетровськ, 7-12 червня 1999 р.); Всесоюзній науково-технічній конференції молодих вчених, інженерів і робітників: «Создание и освоение экологически чистых, ресурсосберегающих технологий в черной металлургии» (м. Донецьк, 22-24 травня 1991 р.); об'єднаному науковому семінарі кафедри металургії чавуну Національної Металургійної академії України та Інституту чорної металургії (м. Дніпропетровськ, 11 лютого 2014 р.); наукових семінарах кафедри «Руднотермі-

чні процеси і маловідходні технології» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (у 2008-13 рр.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 18 наукових робіт. Основні наукові результати дисертаційної роботи викладені в 9 публікаціях. Додаткові результати викладені в 9 публікаціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації становить 143 сторінки, на яких наведено 34 рисунка, 5 таблиць і 6 додатків. Список використаних джерел включає 225 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Аналіз сучасного рівня конструкцій завантажувальних пристроїв, способів завантаження доменної печі та розподілу шихти на колошнику» аналіз виконаний за публікаціями, за результатами фізичного моделювання на стенді Дондідчормет, математичного моделювання та досвіду освоєння ЗП. В якості основної характеристики для порівняння прийняті потенційні можливості ЗУ в управлінні розподілом шихти по колу і радіусу колошника. Враховано також перспективи розвитку технології доменної плавки щодо зменшення частки коксу і збільшення частки обкотишів в шихті для оцінки впливу цих факторів на розподіл шихти і газів, а також можливість використання відомих ЗП для вирішення завдань газодинаміки в перспективі. Порівняльний аналіз доводить, що саме ЛЗП найкращим чином підходить як для оптимізації завантаження (особливо з урахуванням неминучих змін у технології), так і для автоматизації управління розподілом шихтових матеріалів, але низка невирішених завдань не дозволяє повною мірою використовувати всі його переваги.

На момент розробки вітчизняного ЛЗП три доменні печі в СРСР (на Новолипецькому металургійному комбінаті, Криворіжсталі і Северсталі) були обладнані пристроями фірми «Paul Wurth». У їх освоєнні головна роль належала Інституту чорної металургії (м. Дніпропетровськ). Потрібно відзначити, що це були нові печі з рекордно великим корисним об'ємом, передовою конвеєрною подачею шихти на колошник і шихти якісної, а ДП-3 «Азовсталі», на яку планувалося встановити перший вітчизняний ЛЗП, – піч, що реконструюється, середнього об'єму зі скіповим завантаженням, яка переробляла керченський агломерат низької якості. Всі роботи, устаткування і програмне забезпечення виконували вітчизняні підприємства з метою подальшого тиражування та імпортозаміщення. Головною організацією з цієї тематики був призначений Дондідчормет (м. Донецьк), генеральним проектувальником – Гіпромет (м. Москва), виготовлювачем – «Азовмаш» (м. Маріуполь), провідним підприємством «Азовсталь» (м. Маріуполь).

Розглянуто сучасні підходи до розподілу шихти і газового потоку, а також засоби і методи контролю. Вивченню розподілу на колошнику доменної печі присвячені численні дослідження Большакова В.І., Грузинова В.К., Ковшова В.Н., Коробова І.І., Китаєва Б.І., Похвіснева А.Н., Тарасова В.П. та їхніх учнів. Загальноприйнята вимога до якості окружного розподілу: максимально рівномірний розподіл шихти,

однаковий з будь-якого радіусу, і можливість коригувати завантаженням розподіл газового потоку по колу. При експериментальній перевірці розподіл характеризується значенням коефіцієнта окружної нерівномірності: $\varphi = (P_{max} - P_{min}) / P_{cp} \times 100 \%$, де P_{max} , P_{min} , P_{cp} – відповідно максимальна, мінімальна і середня маса шихтового матеріалу в секторах, кг.

При обговоренні результатів освоєння ЛЗП нерідко висувалися зауваження, що існуючих засобів контролю розподілу (відбір проб газу один раз на день) недостатньо для об'єктивного вибору режиму завантаження. Аналіз публікацій показав, що це загальна проблема в освоєнні нових ЗП. Особливо актуальне це питання для України, де традиційний відбір газу по радіусу на більшості ДП проводиться рідко, а на деяких печах його не роблять зовсім. Якщо ж розподіл газового потоку контролювати за його температурою, то важливо визначити її відповідність щодо швидкості і хімічного складу газу, а також обґрунтовано вибрати горизонт виміру і положення термозонда щодо рівня засипу.

У другому розділі «Методика дослідження руху сипучого тіла по шихтовому тракту та вимоги до конструкції термозонда» описана методика експериментальних досліджень процесів завантаження і розподілу шихти, проведених на двох стендах різного масштабу: на дослідному універсальному механізованому стенді Доннічормет в масштабі 1:5 і на випробувальному стенді ЛЗП натуральних розмірів, побудованому на території рудного двору доменного цеху. Фізичне моделювання в поєднанні з математичним описом процесу – це основний, а іноді єдино можливий метод дослідження поведінки сипучих матеріалів, зокрема, руху доменної шихти по шихтовому тракту і формування шару на колошнику. Використано також комп'ютерне моделювання та статистичну обробку результатів. Методи дослідження обрані, виходячи з прийнятих в металургії, але з урахуванням особливостей завдань.

Фізичне моделювання в зменшеному масштабі виконано з використанням основних положень теорії подібності. На моделі колошника доменної печі досліджено окружний розподіл шихти, а на моделях окремих вузлів (бункер, збірна воронка і лоток) – рух шихти по шихтовому тракту. Модель колошника на універсальному стенді розділена на 8 рівних секторів. Шихта з кожного сектора потрапляла в свій короб і зважувалася. Координати початку і кінця зсипання, а також час вивантаження фіксувалися безконтактними датчиками, розташованими по колу моделі, і записувалися осцилографом. Модельна шихта для дотримання властивостей сипучого матеріалу виготовлялася з реального коксу та агломерату подрібненням, висівом потрібних фракцій і змішуванням їх в заданому співвідношенні, а обкотиші діаметром 4-6 мм отримували окремо. Сегрегація шихти оцінювалася за результатами розсіву проби мінімум на 3 фракції. Суміш коксу та агломерату поділялася електромагнітом, використовуючи розходження в їх магнітних властивостях. Агломерат, для його відділення від обкотишів, складали з фракцій + 6 мм і - 4 мм, а проби, отримані в результаті дослідів, розсівали.

Нова конструкція термозонда розроблена з метою безперервного контролю температури газу над рівнем засипу по радіусу колошника. Враховані наступні вимоги: можливість підвищення температури над рівнем засипу вище 900 °С; простота заміни за терміну служби не менше року; відсутність впливу охолоджуваної конс-

трукції на показання термопар. Для реалізації зазначених вимог виконано розрахунок теплотехнічний і на міцність.

У третьому розділі «Визначення раціональних технологічних параметрів шихтового тракту лоткового пристрою» зазначено, що на момент проведення досліджень і на сьогоднішній день у світовій практиці і теорії немає остаточних і однозначних відповідей на все коло питань, пов'язаних з конфігурацією шихтового тракту, що підтверджує безліч модифікацій ЛЗП. На першому етапі (проектування і виготовлення) виконані дослідження, пов'язані з вибором технологічних параметрів шихтового тракту, що забезпечили необхідний розподіл шихтових матеріалів. При розв'язанні цієї задачі для реконструйованої печі як обмеження виступала висота пристрою.

Шихтові бункери. Розроблено розрахункову схему, що дозволяє визначити оптимальний внутрішній діаметр циліндричної частини бункера, який відповідає мінімальній висоті завантажувального пристрою. Для корисного об'єму 20 м^3 – це 3,3 м. За модельним дослідженням мінімальні витрати шихти при стабільному вивантаженні – $0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ ($0,2\text{-}0,9 \text{ м}^3/\text{с}$). Точність регулювання затвором ($\pm 0,2^\circ$) і стабільність зсипання дають середньоквадратичне відхилення часу вивантаження – 0,6 с.

На моделі досліджені сегрегація шихти в бункерах і сумісне завантаження агломерату та обкотишів в один бункер різними скіпами. Досліди показали, що обкотиші, при будь-якій послідовності завантаження в бункер, мають тенденцію випереджати в процесі зсипання кокс і агломерат. Так, $3/4$ обкотишів вивантажуються в інтервалах $0\text{-}40\%$ і $20\text{-}55\%$, якщо їх завантажують, відповідно, першим або останнім скіпом.

Воронкоподібний характер вивантаження шихти – причина сегрегації в бункерах, але її вплив на розподіл шихти можна мінімізувати, використовуючи виявлену закономірність: максимум дрібних фракцій (в 1,5 рази більше) вивантажується в першій третині порції, а мінімум – в останній третині. Якщо укласти порцію на 6 витків, то розподіл фракцій по колу буде більш рівномірним.

Збірна воронка. Її призначення – направляти потік шихти від будь-якого з бункерів на розподільчий лоток, якомога ближче до осі печі. Відхилення потоку шихти від осі обертання лотка – основна причина орієнтованої нерівномірності. Рух сипучого тіла по похилому жолобу збірної воронки з перешкодою поперек потоку досліджено на моделях. Дослідження показали, що нижній кордон потоку шихти не збігається з поверхнею жолоба. При зсипанні утворюється малорухливий шар, а поверх нього рухається основний потік. Малорухливий шар відіграє роль «динамічної самофутеровки», тобто оберігає поверхню жолоба від зносу. Помічено, що кут нахилу верхньої межі, а значить і товщина малорухливого шару, залежать від витрати шихти, що вивантажується: при збільшенні витрати його товщина збільшується, а при зменшенні – зменшується, що згладжує коливання витрати. Це явище було використано в авторському свідоцтві № 1420026 «Розподільник шихти завантажувального пристрою», а перешкоду поперек потоку шихти названо «ребром-стабілізатором».

Обертаний розподільний лоток. Його призначення – укласти порцію шихти в задану кільцеву зону колошника. Задача визначення необхідної довжини лотка була вирішена при спільному використанні даних розрахунків та експериментів. Достатньою буде така довжина лотка, щоб у верхньому положенні (51°) траєкторія шихти

потрапляла в стик між горизонтальним профілем засипу і захисними плитами, а в нижньому положенні лоток був на 0,5 м вище цього профілю. Визначено ефективну довжину лотка (від осі обертання до носка) для доменних печей об'ємом: 1719 м³ – 2,0 м; 2000 м³ – 2,1 м; 3200 м³ – 2,8 м (ТЛЗ-5.2-20-75-86).

У відомі математичні моделі, які описують рух шихти обертовим розподільним лотком циліндричної форми, внесені деякі уточнення. Перше з них стосується початкової швидкості потоку після удару шихти о лоток, друге – відмінності в русі потоку шихти і окремого шматка (матеріальної точки). Перевірка адекватності моделі проводилася на стенді Донндічормет. Швидкість шихти на рівні нижнього зрізу розподільника ($6 \pm 0,5$ м/с) визначена за допомогою фотоелементів. Початкові умови польоту (вектор швидкості) визначали за траєкторією польоту, а координати траєкторії – за її фотографіями і місцем удару о горизонтальну лінійку. За результатами всієї сукупності дослідів середньозважений коефіцієнт тертя вийшов: 0,55 – для лотка з рівною «гладкою» футеровкою і 0,65 – для лотка з поперечними ребрами. Отримане значення коефіцієнта тертя дає хороший збіг розрахункових траєкторій у всьому діапазоні кутів нахилу і довжин лотка з результатами дослідів.

У четвертому розділі «Дослідження розподілу шихти вітчизняним лотковим пристроєм по колу і радіусу колошника» підкреслено, що дослідження попереднього розділу підпорядковані головній меті: забезпечити заданий розподіл шихти і газового потоку. Розподіл шихти, а це основне завдання ЗП, прийнято розділяти на радіальний і окружний. На випробувальному стенді ЛЗП були додатково досліджені: траєкторії при різних кутах нахилу лотка, витратні характеристики шихтового затвора для коксу та агломерату, вплив витрати шихти і геометрії футеровки лотка на формування профілю засипу для реальних шихт. За результатами досліджень обрані: 11 фіксованих кутів нахилу лотка (робочих станцій); тип футеровки лотка; раціональний спосіб розподілу порції шихти по кільцях і їх кількість. Результати використовувалися при виборі режиму завантаження і відображені в технологічній інструкції ТІ 232-27-95.

Прийнято, що висока якість окружного розподілу характеризується мінімальним значенням коефіцієнта окружної нерівномірності (φ %). За характерними особливостями розрізняють: орієнтовану і неорієнтовану окружну нерівномірність, а також несиметричне розташування гребеня засипу.

Одна з причин окружної нерівномірності – зміна витрати шихти на початку і наприкінці зсипання, тобто наявність так званих «незамкнених витків». Під витком тут і далі мається на увазі шар шихтового матеріалу на колошнику, що утворюється за одне обертання обертового розподільного лотка. Нерівномірність, викликана цією причиною, залежить від числа завантажених порцій і витоків, координат початку і кінця зсипання і не має суворої прив'язки до завантажувального пристрою – її називають неорієнтованою. При зсуві початку висипання кожної наступної порції нерівномірність зменшується і, чим менше витків, тим нерівномірність більше. Це було відомо, але зміну витрати на початку і наприкінці зсипання не враховували. Щоб дослідити вплив часу вивантаження і частоти обертання на окружну нерівномірність проведено більше 80 експериментів (рис. 1).

Спочатку передбачалося, що кількість витків укладання порції (n) пов'язана з окружною нерівномірністю (φ) простим співвідношенням ($\varphi = 1/n \cdot 100\%$ – пунктир на рис.1), яке впливає зі завантаження в частину секторів зайвого витка шихти. Так, при числі витків – 5,3, як мінімум в один сектор з восьми потрапить 6 витків, і як мінімум в п'ять секторів – по 5 витків. Окружна нерівномірність повинна скласти: $\varphi = (6 - 5) / 5,3 \cdot 100\% \approx 19\%$, а фактичний результат: 7-11%. При значеннях дробової частини числа витків 0,2-0,4 – нерівномірність зменшується вдвічі. Отже, спрощені уявлення про замикання витків не узгоджуються з експериментальними даними, що призводить до невірних висновків і рекомендацій. Так, встановивши час вивантаження порції з бункера, кратний часу одного обороту, ми, «замкнувши» витки, фактично отримуємо максимальну нерівномірність.

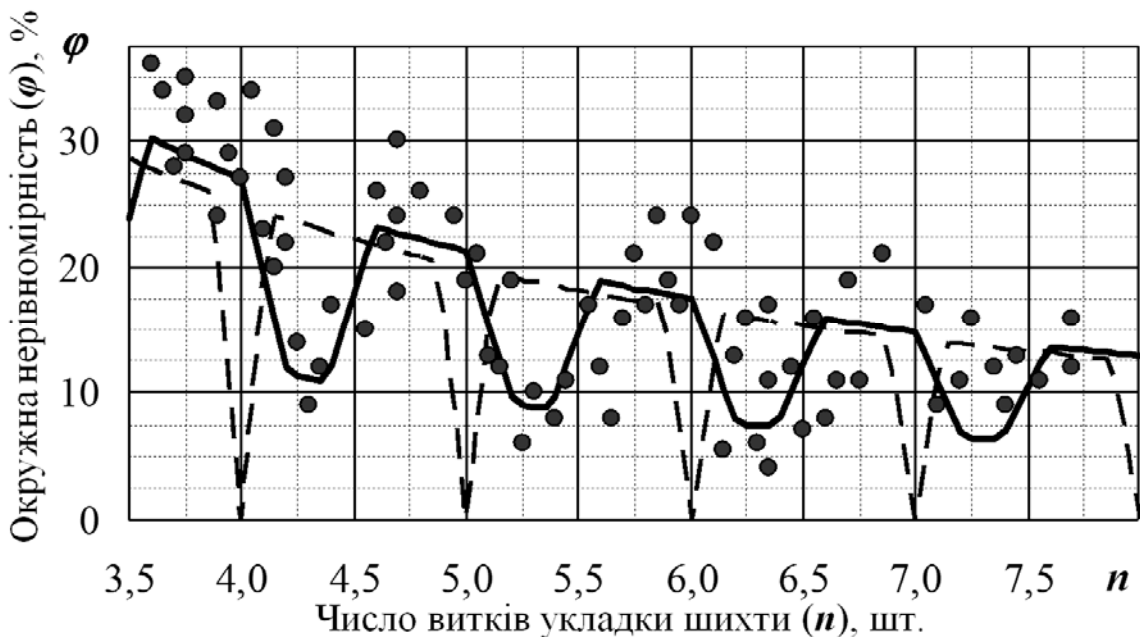


Рисунок 1 - Вплив числа витків укладання шихти (n) на окружну нерівномірність (φ): експериментальні дані (крапки); розрахунок за формулою $\varphi = 1/n \cdot 100\%$ з корекцією на «замикання» витків в межах одного сектора (пунктир); розрахунок за запропонованою математичною залежністю (лінія)

Для теоретичного обґрунтування експериментально отриманих результатів була розроблена математична модель, заснована на припущенні, що витрата шихти з бункера спочатку, в процесі розкриття шихтового затвора за час τ_H , лінійно зростає до величини q , після чого залишається постійною (це перевірено експериментально), а перед закінченням висипання лінійно зменшується за час τ_K .

Позначимо: n – число витків укладання шихти від початку до повного закінчення висипання порції (за час t), $N = [n]$ – число цілих витків, а $\{n\} = n - N$ – дробова частина цього числа; α_H – кут сектора витка, що утворюється за час τ_H , в частках обороту ($\alpha_H \leq 1$); α_K – кут сектора витка, що утворюється за час τ_K , а $\{\alpha_K\} = \alpha_K - [\alpha_K]$ – його дробова частина при $\alpha_K > 1$. Для однозначності прийнято, що $\alpha_H \leq \alpha_K$. З геометричних побудов і після математичних перетворень були отримані формули, які відповідають різним випадкам перекриття витків. Для випадку, коли дробова частина числа витків ($n - N$) менше дробової частини кінцевого сектора $\{\alpha_K\}$, маємо:

$$\varphi = \frac{(1 - \alpha_H) \cdot (1 + [\alpha_K])}{\alpha_K \cdot (n - (\alpha_H + \alpha_K)/2)} \cdot 100, \text{ при } n - N \leq \alpha_H - 1 + \alpha_K - [\alpha_K]; \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{1 - (n - N + \alpha_H) \cdot [\alpha_K] / \alpha_K}{n - (\alpha_H + \alpha_K)/2} \cdot 100, \text{ при } \alpha_H - 1 + \alpha_K - [\alpha_K] < n - N \leq \alpha_H; \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{1 - (1 + [\alpha_K]) \cdot \alpha_H / \alpha_K}{n - (\alpha_H + \alpha_K)/2} \cdot 100, \text{ при } \alpha_H < n - N \leq \alpha_K - [\alpha_K]. \quad (3)$$

Якщо дробова частина числа витків більше ($\{n\} > \{\alpha_K\}$), то маємо:

$$\varphi = \frac{(1 - \alpha_H) \cdot [\alpha_K]}{\alpha_K \cdot (n - (\alpha_H + \alpha_K)/2)} \cdot 100, \text{ при } n - N \leq \alpha_H; \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{n - N - \alpha_H + (1 - \alpha_H) \cdot [\alpha_K]}{\alpha_K \cdot (n - (\alpha_H + \alpha_K)/2)} \cdot 100, \text{ при } \alpha_H < n - N \leq \alpha_H + \alpha_K - [\alpha_K]; \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{1 - \alpha_H \cdot [\alpha_K] / \alpha_K}{n - (\alpha_H + \alpha_K)/2} \cdot 100, \text{ при } n - N > \alpha_H + \alpha_K - [\alpha_K]. \quad (6)$$

Результати розрахунку за формулами (1) – (6) наведено на рис. 1 (лінія). Видно, що математична модель адекватно описує результати експерименту (крапки). З графіка випливає, що окружна нерівномірність із збільшенням числа витків має тенденцію до зменшення типу затухаючих коливань, однак і при однаковому цілому числі витків, залежно від їх «замкнутості», тобто величини дробової частини витків, нерівномірність істотно зменшується в $\alpha_K / (\alpha_K - \alpha_H)$ разів (див. формулу (5)). Причому, значення мінімальної нерівномірності тим менше, чим ближче відношення α_H / α_K до одиниці, але при цьому зменшується зона мінімальних значень на графіку, а, отже, ускладниться підбір часу вивантаження порції, відповідного мінімальним значенням нерівномірності. Теоретично, при $\alpha_H \approx \alpha_K \approx 1$ окружна нерівномірність розподілу однієї порції, викликана незамкненим витком, повинна взагалі бути відсутня при будь-якому числі витків.

Друга причина – відхилення потоку шихти на розподільчий лоток від осі його обертання (осі доменної печі) – викликає орієнтовану відносно бункерів завантажувального пристрою окружну нерівномірність. Ця ж причина у несиметричного розташування гребеня засипу і різного радіального розподілу рудного навантаження в різних секторах печі. На відміну від неорієнтованої нерівномірності, яка змінюється від порції до порції, орієнтована нерівномірність утворюється при кожному витку і накопичується з кожною порцією.

Вважалося, що основна причина нерівномірності – зміна шляху, а, отже, і часу руху шихти по лотку. За цей додатковий час лоток встигає повернутися на більший кут, а точка зустрічі шихти з поверхнею засипу додатково зміститься в напрямку обертання. Інша причина – у зміні точки вильоту потоку шихти з розподільчого лотка і вектора початкової швидкості польоту. Так, відхилення потоку шихти від осі обертання лотка викликає відхилення шматків шихти від середньостатистичного місця їх падіння на поверхню засипу. У результаті, за повний оборот лотка в одних секторах шматки ляжуть щільніше, і їх буде більше, а в інших рідше, і їх буде менше.

У перших секторах буде максимум, а в інших – мінімум в окружному розподілі. Важливий висновок. При симетричному перенесенні місця удару шихти о лоток (наприклад, при зміні бункера, що вивантажується) картина розподілу симетрично відобразиться щодо осі обертання. А якщо змінити напрям обертання лотка на протилежний, то картина розподілу симетрично відобразиться відносно вертикальної площини, що проходить через вісь печі і осі двох шихтових бункерів.

Для перевірки цього припущення було проведено досліди серіями з трьох порцій зі зміщенням початку завантаження на 120° . Результати (рис. 2) підтвердили, що криві 2 і 3 (різні бункера) симетричні щодо центру кола, а 4 і 5 (напрямок обертання) - відносно горизонтальної осі.

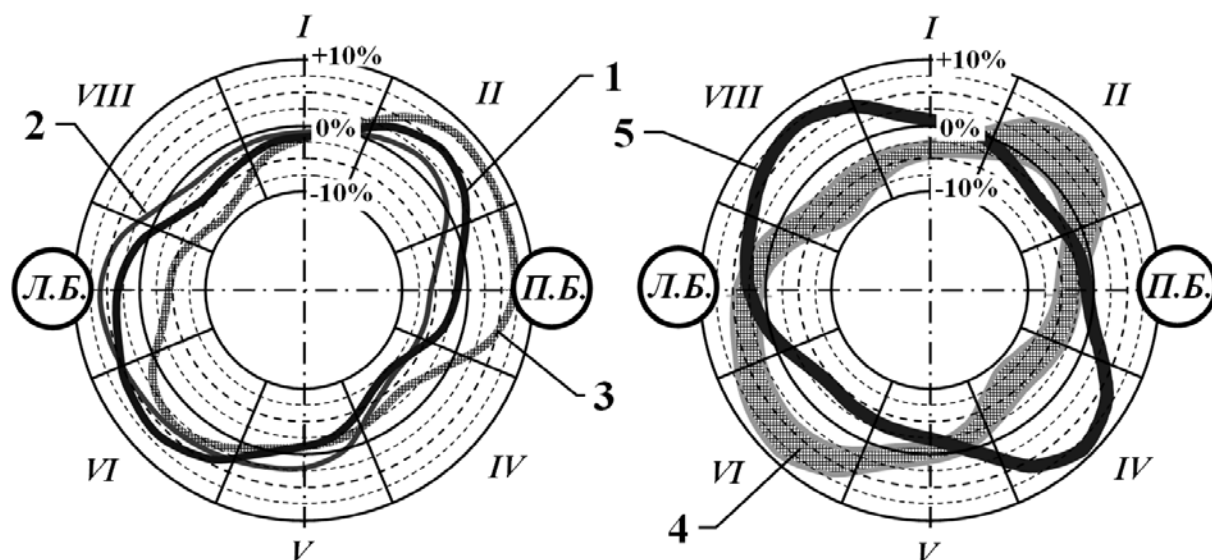


Рисунок 2 - Орієнтована окружна нерівномірність розподілу шихти на фізичній моделі колошника (I-VIII – номери секторів):

- 1 – вивантаження агломерату з правого бункера (П.Б.), обертання лотка за годинниковою стрілкою; 2 – теж саме для коксу; 3 – кокс, але з лівого бункера (Л.Б.); 4 – діапазон нерівномірності для правого бункера за годинниковою стрілкою; 5 – теж саме при обертанні лотка проти годинникової стрілки

Задуванню ДП з новим ЛЗП передували дослідження його характеристик на випробувальному стенді, зведеному на шихтовому дворі, а також дослідження розподілу шихти колошником в процесі завантаження шихти для задування. Такий підхід дозволив порівняти отримані результати і наочно продемонструвати технологічному персоналу можливості ЛЗП.

Робота доменної печі була освоєна в різних шихтових умовах. Особливість розподілу шихтових матеріалів низької якості (до 45 % фракції (0-5) мм в агломераті) в тому, що технологія будується на помірному розкритті периферії: частка CO_2 біля стін не вище 15 %, а температура – не нижче 400°C . Інакше сход шихти стає нерівним з підвисаннями, піч «втрачає дуття». Істотна розтяжка рудного гребеня можлива при роботі на більш якісному агломераті. В обох випадках в осевій зоні потрібно сформувати стійкий газовий потік.

Періодична (щотижня) зміна бункерів з коксом і агломератом була передбачена тимчасовою технологічною інструкцією. Як тільки з'явилася технічна можливість

поміняти різновид шихти в бункерах і напрям обертання лотка, то картина, яка спостерігається (рис.3), продемонструвала необхідність робити це в кожному циклі завантаження «через інтервал часу рівний 0,2-0,6 від часу стабілізації температури периферійних газів». На такий «спосіб ведення доменної плавки» отримано АС СРСР № 1715847 і патент України № 1589.

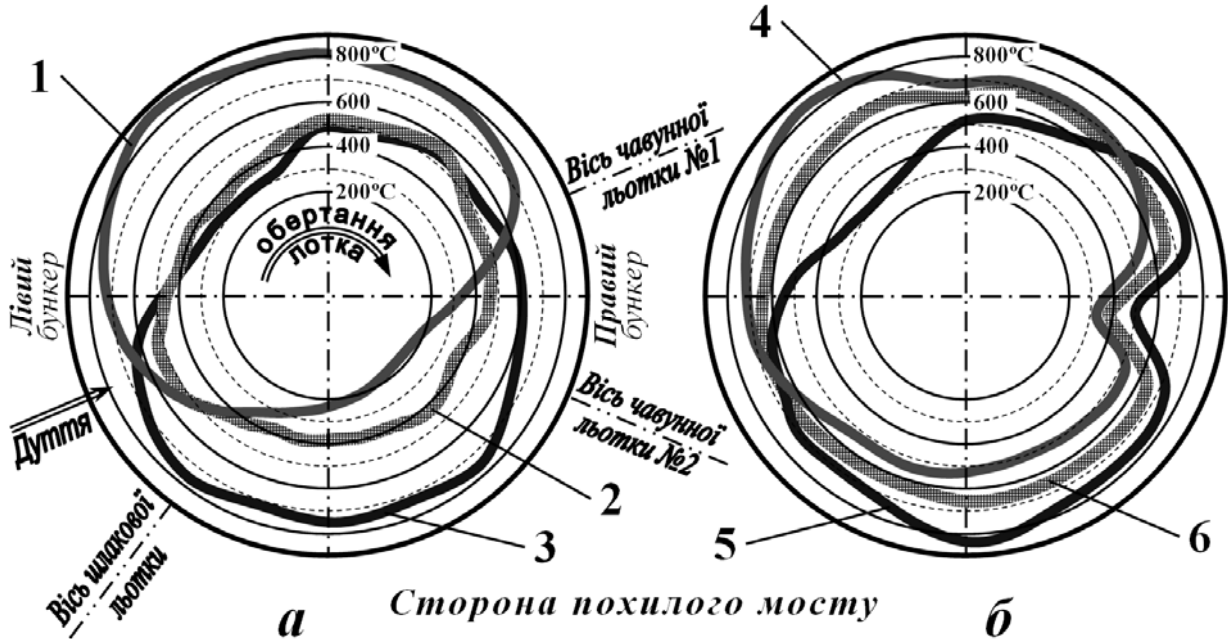


Рисунок 3 - Вплив зміни різновиду шихти в бункерах при обертанні лотка за годинниковою стрілкою (а) і напрями обертання лотка без зміни бункерів (б) на температуру периферії (за показаннями 24-х термопар на ДП-3): 1 – тривале завантаження агломерату (А) з правого бункера, коксу (К) – з лівого; 2 – через 40 хвилин після початку завантаження К – з правого, А – з лівого; 3 – через 2 години; 4 – тривале обертання лотка за годинниковою стрілкою без зміни бункерів (А – з правого, К – з лівого); 5 – через 4 години після зміни напрямку обертання (проти годинникової стрілки); 6 – завантаження протягом доби при періодичній зміні обертання (1,5 години)

Відмінність картини, яка спостерігалась, від теоретично очікуваної пояснюється особливостями розподілу шихти на ДП-3 і механізмом виникнення нерівномірності. При вузькому, але інтенсивному потоці газу уздовж стін печі, на температуру периферії сильно впливає зсув рудного гребеня від стінки або ширина горизонтального «майданчика» на профілі засипу. Сектор з високими температурами збігся з обмірюваним перед задуванням широким «майданчиком» агломерату і вузьким «майданчиком» коксу. Велика різниця в показаннях термопар на ДП-3 (до 500 °С) підкреслює вплив радіально-окружної нерівномірності, але при «зміні бункерів» значно зменшуються і інші види нерівномірності. Зменшення окружної нерівномірності викликало підвищення ступеню використання газу на 1 %.

Слід зазначити, що удосконалення технології доменної плавки щодо управління розподілом шихти «зверху» з використанням першого вітчизняного ЛЗП стосовно до шихтових умов роботи ДП-3, попри всі проблеми пов'язані з освоєнням

нового обладнання, забезпечило скорочення витрат коксу на 20 кг/т чавуну і збільшення виробництва чавуну на 5,2 %.

У н'ятому розділі «Розробка комп'ютерної інформаційної системи контролю розподілу газового потоку по радіусу колошника» встановлено, що для цього необхідно: підтвердити можливість використання температури газового потоку над рівнем засипу для управління завантаженням; обґрунтувати достовірність даних, отриманих від інформаційної системи; розробити методику надання цієї інформації технологу. Нова конструкція охолоджуваного термозонда (патент України 22809) розроблена для безперервного контролю температури по радіусу колошника і повністю відповідає вимогам, сформульованим у розділі 2. Вперше ця конструкція встановлена на ДП-5 «Запоріжсталі».

На двох доменних печах середнього об'єму зібрано та збережено комп'ютером щохвилинний масив даних за два роки роботи, отримані його статистичні характеристики. Встановлено, що з імовірністю 99 % температура вкладається в інтервал 120-700 °С; швидкість її зміни в часі без урахування впливу завантаження – менше 5 °С/хв. (85 %), максимальний інтервал – ±30 (96%); градієнт температур – не більше 5 °С/см (98 %).

Практичному використанню інформації про температуру може суттєво допомогти порівняння з традиційним відбором проб газу на CO₂. Спільна обробка проб газу (хімічний склад) і показань термозондів (його температури) вказує на те, що залежність: чим вище температура газу – тим менше CO₂ в пробі підтверджується, але коефіцієнт кореляції невисокий – 0,6 (рис. 4).

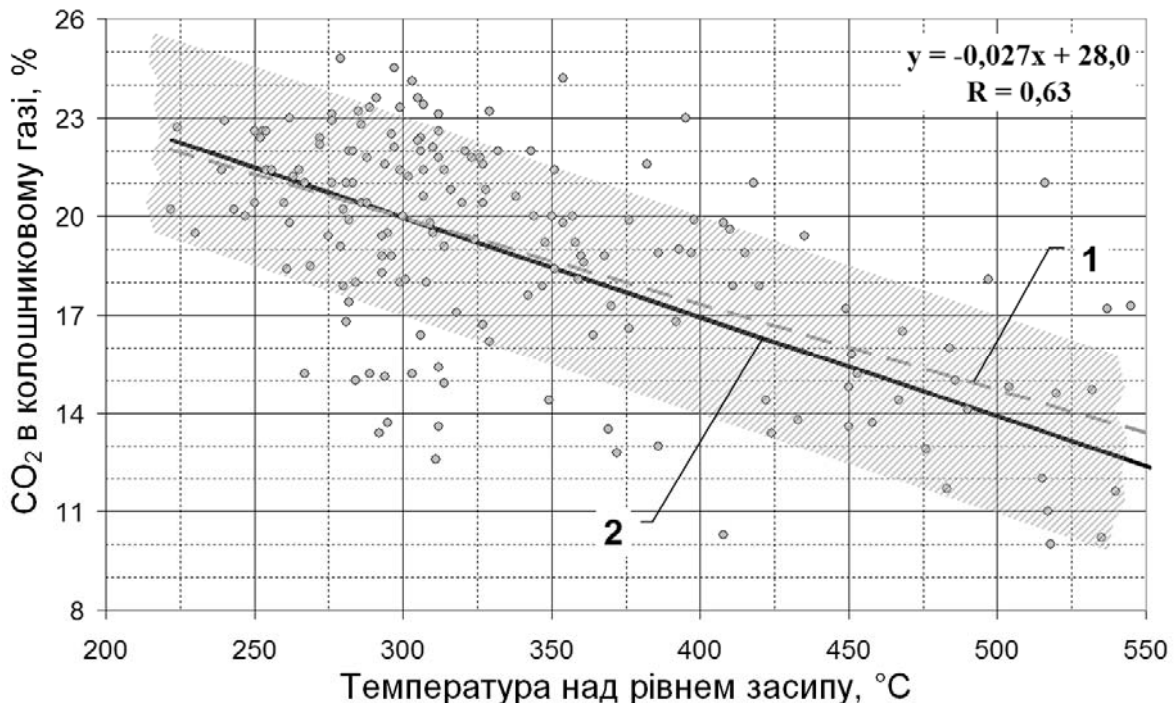


Рисунок 4 - Статистична залежність між CO₂ (%) і температурою (°С) радіального газу за результатами замірів на доменній печі:

- 1 – кореляційний зв'язок між вмістом CO₂ і температурою;
- 2 – залежність за запропонованою емпіричною формулою.

У статистичному аналізі використовувалися всі результати хімічного аналізу проб газу за двомісячний період роботи печі і середні значення температури за попередні дві години в тих же кільцевих зонах колошника. З фізико-хімічної точки зору вміст CO_2 в колошниковому газі не є функцією його температури, оскільки обидва ці параметри є результатом тепло-масообмінних процесів в шахті, але отриману емпіричну залежність ($+100\text{ }^\circ\text{C}$ це мінус 3% CO_2) або формулу $\% \text{CO}_2 = 23 + (200 - t)/33 \pm 3$ можна використовувати, враховуючи, що це кореляційна залежність з емпіричними коефіцієнтами.

Порівняння цих показників за характером кривої по радіусу печі в 75% випадків дозволяє зробити однакові висновки про розподіл газового потоку: збігається положення «гребеня», діаметр «осьової віддушину», а також розвантаження периферії і центру. Однак зафіксовані випадки, коли достовірність даних по CO_2 і температурі сумнівів не викликає, а характер кривих відрізняється істотно. Найчастіше це відбувається при різкій зміні розподілу, оскільки температура в кільцевій зоні реагує першою, рідше – розбіжність зберігається протягом тривалого часу і викликана технологічними причинами: інтенсивним відновленням шихти у верхніх горизонтах, за наявності газового потоку з високою температурою ($700\text{ }^\circ\text{C}$) і шихти з хорошою газопроникністю. За цих умов колошниковий газ на виході з шихти має високу температуру і порівняно високий вміст CO_2 .

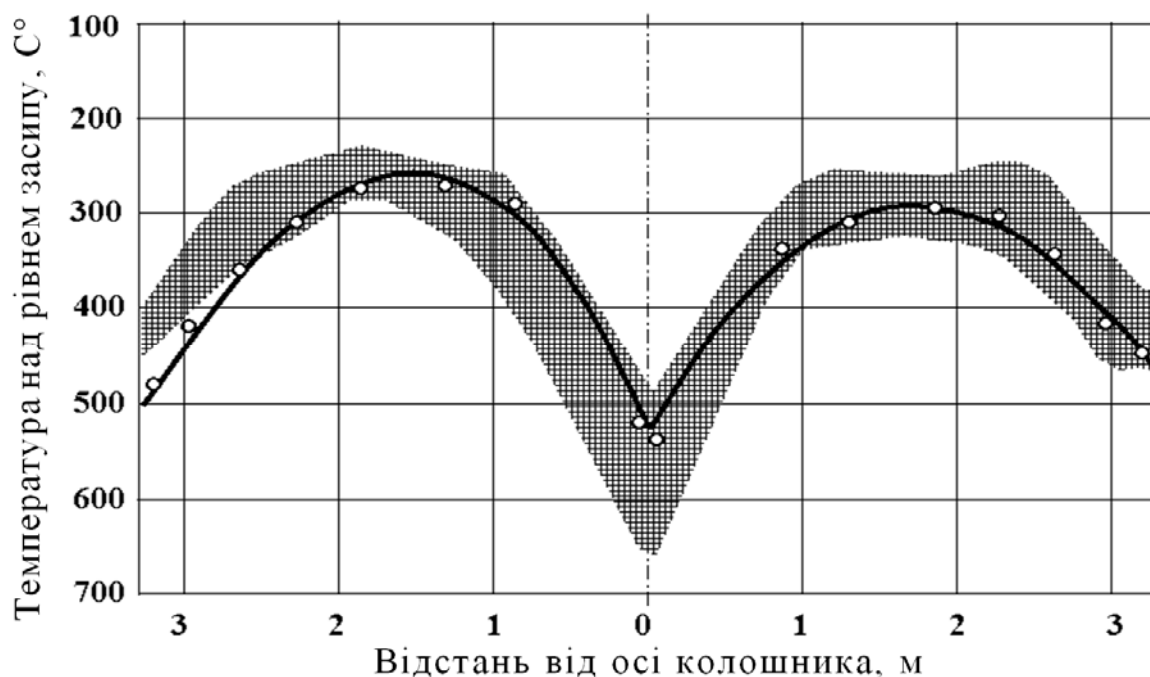


Рисунок 5 - Відеокадр, що відображає: поточне значення температури газу по діаметру колошника в точках виміру (точки); криву розподілу, що описує ці точки (лінія) і область змін температури за попередні дві години (штрихування фону)

Інформація про температуру характеризує розподіл на колошнику. Однак, на всіх печах зафіксовано також вплив періодичних технологічних операцій (завантаження шихти і випуск продуктів плавки) на температуру газу над рівнем засипу. Тому одночасне відображення на моніторі (рис. 5) кривої поточних значень і області їх змін за попередні 2 години, дозволило підвищити інформативність даних для опе-

ративного управління піччю. Якщо поточний графік виходить за межі цієї області, то на печі як мінімум відбувається щось незвичайне, оскільки інтервал часу вибраний виходячи зі звичайної періодичності технологічних операцій: 1 або 2 випуску і не менше 16 подач за 2 години.

З досвіду експлуатації, в шихтових умовах, характерних для доменних печей ВАТ «Запоріжсталь», температура над поверхнею засипу в районі захисних плит колошника повинна бути 300-400 °С, в гребені – 100-200 °С, а по осі – 500-600 °С, що відображено в технологічній інструкції.

У шостому розділі «Особливості управління завантаженням і розподілом шихти лотковим пристроєм» розглянуті головні відмінності запропонованої АСУ: 1) завдання всіх параметрів і установок режиму завантаження на відеокадрі «Матриця завантаження» з можливістю їх автоматичної корекції; 2) функція підтримки заданого часу вивантаження порції; 3) функція автоматизованого управління окружним розподілом відповідно до завдання технолога. Деякі способи управління піччю «зверху» реалізувати на ДП-3 «Азовсталі» в автоматичному режимі не вдалося через негнучку систему програмування. Тому планованій установці ЛЗП на ДП-5 «Запоріжсталі» передувала розробка САУ завантаженням і АСУ розподілом на базі промислових контролерів.

Передумови для управління окружним розподілом з'явилися як результат вивчення замикання витків і вивантаження сипучих шихтових матеріалів із бункера. Вплив «незамкнених» витків на окружний розподіл проілюстровано на рис. 6. На схемі (а) – час вивантаження кратний часу одного оберту лотка (ціле число витків – 3). Окружна нерівномірність з «ямою» в місці «замкнення» витків максимальна. На схемі (б) – кількість витків дробове число. Початковий і завершальний періоди перекривають один одного. Окружна нерівномірність мінімальна. Спосіб завантаження – «Замкнений виток». На схемі (в) – кількість витків також дробове число, але в місці перекриття повних витків – максимум.

Результати розподілу в трьох прикладах відрізняються тільки часом вивантаження шихти з бункера. Отже, управляючи часом вивантаження шихти з бункера, можна управляти її окружним розподілом: суттєво знизити нерівномірність, переходячи від розповсюдженої укладки за схемою (а) до укладки за схемою (б) з «замкненими витками»; або коригувати розподіл, укладаючи максимум (мінімум) порції в обраний сектор колошника за схемою (в).

Час вивантаження порції залежить від багатьох факторів, але керують ним, змінюючи кут розкриття шихтового затвора. Експериментально доведено, що регулювання часу вивантаження бункера, з достатньою для управління окружним розподілом точністю ($\pm 0,6$ с), завдання складне, але таке, що цілком піддається реалізації. Інші передумови для автоматизації управління окружним розподілом:

1. В лоткових пристроях немає накопичення шихти між бункером і поверхнею засипу. Шихта, яка вивантажилася з бункера і повернула з лотком за час руху на розрахунковий кут, укладається в певний сектор колошника.

2. В управлінні завантаженням використовується «початковий сектор» – це задане в САУ ЛЗП окружне положення лотка в момент початку відкриття шихтового затвора (таких положень шість: через 60°). Фактичний початок укладки шихти зміщується відносно заданого «початкового сектора» за напрямом обертання лотка.

3. Характер сегрегації шихти в бункерах і пошарове укладання на колошнику дозволяють отримати рівномірний розподіл фракцій по колу.

Використані раніше автоматичні системи не передбачали зміни самого максимуму порції, а тільки змінювали сектор, в який він вивантажується. Можливості ЛЗП ширші. Використовується як зміна ширини сектора з максимумом, так і величини цього максимуму. Розглянемо принцип компенсації нерівномірного розподілу температур периферії на трьох прикладах (рис. 7 а).

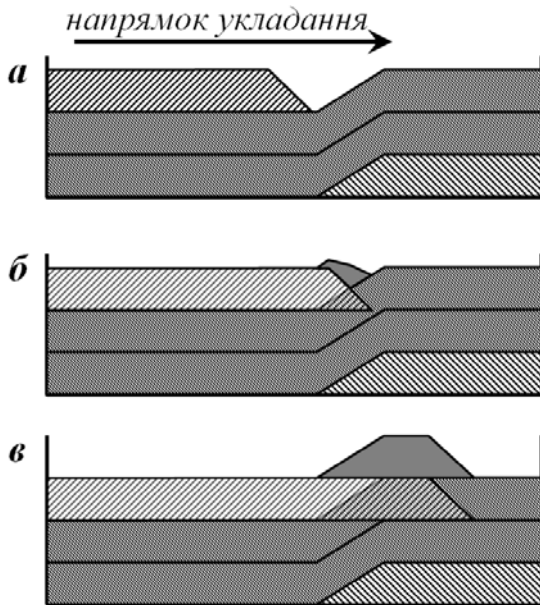


Рисунок 6 - Схеми укладання шарів шихти для трьох випадків замикання витків:
 а) ціле число витків укладання (рівно 3);
 б) «замкнуті» витки з перекриттям;
 в) перекриття з утворенням максимуму.

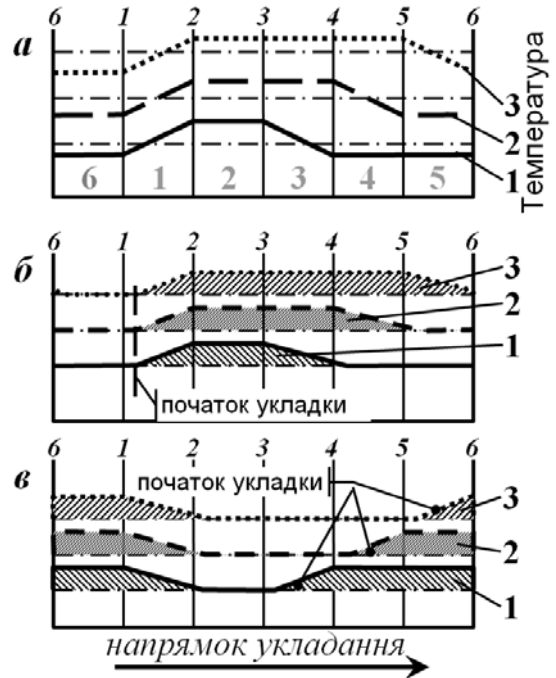


Рисунок 7- Корекція температури за оцінкою АОР (а – три варіанти результатів) із завантаженням максимуму порції:
 б) агломерату; в) коксу.

«Автоматизована оцінка розподілу (АОР)» дозволяє за показаннями термопар визначити вид окружної нерівномірності газового потоку, яку, з урахуванням можливостей ЛЗП, можна компенсувати найкращим чином порцією, яка буде завантажуватися. Результат АОР – визначений для кожного сектора вигляд: "холодний", "середній" або "гарячий". У прикладах "середній" – 1-й сектор, а "гарячих" секторів, відповідно: 1 (2-й сектор), 2 (2-й, 3-й) і 3 (2-й, 3-й, 4-й). Нерівномірність компенсується максимумом порцій: агломерату (б) і коксу (в). При цьому максимум агломерату укладається в "гарячі" сектори, а коксу – в "холодні".

У розробленій АСУ, як аксіоми, прийняті положення технологічних інструкцій про те, що «каналний хід» печі – це крайня ступінь розвитку окружної нерівномірності, а його ліквідацію потрібно починати з визначення та усунення причини. До того ж, методи ліквідації каналу «зверху» на різних заводах традиційно відрізняються. Виходячи з цього, в АСУ передбачені управляючі дії, спрямовані на усунення окружної нерівномірності розподілу температур на ранніх стадіях, а при серйозних розладах ходу корекція припиняється і подається сигнал технологу.

ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена актуальна науково-технічна задача теоретичного та експериментального обґрунтування нових технологічних прийомів управління розподілом шихти колошником ДП, яке базується на встановлених особливостях її руху по шихтовому тракту і укладання шихти ЛЗП, описаних математичною моделлю взаємного перекриття витків і властивістю симетрії у розподілі порції, а також на розробленій інформаційній системі для аналізу оперативних даних про розподіл температури газового потоку, що дозволило зменшити його окружну нерівномірність, підвищити ступінь використання газу і скоротити витрату коксу.

Основні наукові та практичні результати роботи.

1. Виконано аналіз сучасного рівня конструкцій завантажувальних пристроїв, способів завантаження доменної печі та розподілу шихти на колошнику за літературними даними, а також результатами фізичного та математичного моделювання. Порівняльний аналіз показав, що саме ЛЗП найкращим чином підходить як для оптимізації завантаження, так і для автоматизації управління розподілом, але ряд невирішених завдань не дозволяє повною мірою використовувати всі його переваги. А отже, актуальні дослідження руху сипучого тіла шихтовим трактом ЛЗП і укладки шихти на колошнику, а також розробка системи оперативного контролю розподілу газового потоку.

2. Для першого вітчизняного ЛЗП доменної печі об'ємом 1719 м³ експериментально визначені і теоретично обґрунтовані технологічні параметри. Робоча довжина лотка від осі обертання до носка дорівнює 2 м та розрахована, виходячи з фактичного рівня засипу, і дозволяє укласти шихту по всій площі колошника. Фіксовані кути нахилу лотка обрані таким чином, щоб завантажувати шихту в центр будь-якої з 10 рівновеликих зон, а точність їх відпрацювання гарантує відхилення потоку не більше 50 мм. Шихтові бункера обраної форми (Ø 3,3 м) можуть вивантажувати шихту з стійкою мінімальною витратою – 0,25 м³/с (0,2-0,9 м³/с), а точність регулювання секторного затвора (0,2°) і стабільність зсипання дають середньоквадратичне відхилення часу вивантаження – 0,6 секунди. Така точність і 6 початкових секторів (через 60°) дозволяють керувати окружним розподілом. Результати використані при розробці технологічних завдань (ТЛЗ 5.2-20-65-85, ТЛЗ 5.2-20-75-86) і відображені в технологічній та виробничо-технічній інструкції (ТІ 232-27-90, ВТІ 02-16-99).

3. Вперше встановлено і математично описано вплив взаємного перекриття початкової і кінцевої ділянок укладки порції шихти із змінною витратою на нерівномірність її розподілу по окружності колошника. Мінімальній нерівномірності відповідає укладання порції, при якій дробова частина числа витків має проміжне значення між величинами початкової і кінцевої ділянок завантаження і за результатами експериментів більше 0,2 і менше 0,4. При цьому нерівномірність розподілу порції зменшується в 2 рази, як за результатами розрахунку, так і за експериментальними даними. Рекомендований час вивантаження порції 47 с (6,3 витка) або 62 с (8,3 витка), що відповідає раціональному для печей середнього об'єму числу витків 6 або 8.

4. На підставі результатів вивчення замикання витків і вивантаження шихти з бункера запропонований метод корекції окружної нерівномірності розподілу газового потоку зміною режиму завантаження, а саме: початкового сектора і часу виван-

таження порції. Основні принципи керування окружним розподілом використані при розробці ТЛЗ (18.191.001.000.ТЛЗ), яке включено в робочу документацію «Автоматизована система управління безконусним завантажувальним пристроєм ДП-5 ВАТ «Запоріжсталь», виконану УкрДИПРОМЕЗ.

5. Вивчено та експериментально підтверджено основну причину виникнення орієнтованої окружної нерівномірності для ЛЗП з паралельними і симетрично розташованими бункерами, а саме – відхилення потоку шихти на розподільчий лоток від осі його обертання. Встановлено, що при зміні бункера, що вивантажується, або напрямку обертання лотка відбувається симетрична зміна окружного розподілу: осьова симетрія відносно осі печі – в першому випадку, і дзеркальна, відносно площини, що проходить через осі бункерів і вісь печі, у другому. Вперше результат технологічного аналізу показань периферійних термопар ДП зіставлений з теоретичними уявленнями про причини окружної нерівномірності та запропоновано спосіб її компенсації шляхом періодичної зміни різновиду шихти в бункерах (кокс ↔ агломерат) у циклі завантаження і/або напрямку обертання лотка, на який отримано АС СРСР № 1715847 і патент України на винахід № 1589. Практичне використання цього технологічного прийому дозволило істотно (з 500 °С до 200 °С) зменшити окружну нерівномірність розподілу температури газового потоку, що підвищило ступінь використання відновної здатності газу на 1 %.

6. Створено комп'ютерну інформаційну систему контролю розподілу температури по радіусу колошника, засновану на даних від стаціонарних охолоджуваних термозондів нової конструкції (патент України на винахід № 22809). Показано, що температуру над рівнем засипу можна використовувати для управління завантаженням як достовірну інформацію про технологічний процес, а її реакція на зміни у розподілі шихти і газового потоку визначає методику програмної обробки і візуалізації цієї інформації.

7. На двох доменних печах середнього об'єму зібраний і збережений комп'ютером щохвилинний масив даних за два роки роботи. Встановлено, що з імовірністю 99 % температура укладається в інтервал 120-700 °С; середня швидкість її зміни в часі без урахування впливу завантаження - менше 5 °С/хв. (85 %), максимальний інтервал – ±30 (96 %); градієнт температур – не більше 5 °С/см (98 %).

8. Виконана порівняльна оцінка частки CO_2 в пробах газу, відібраних по радіусу печі з верхніх горизонтів шахти традиційним методом, і температури газу в тих же кільцевих зонах колошника, але над рівнем засипу. Встановлено, що для коректного зіставлення з хімічним складом дані про температуру потрібно усереднювати за 2 години, що передують часу забору проби. За результатами досліджень збільшення температури на 100 °С відповідає зменшенню частки CO_2 на 3 %. Для доменних печей середнього об'єму, що працюють з помірно розкритою периферією, через підвищену частку дріб'язку в агломераті, запропонована емпірична формула перерахунку показань термозонда в криву розподілу вуглекислого газу: $\% \text{CO}_2 = 23 + (200 - t) / 33$, де $\% \text{CO}_2$ – частка CO_2 в радіальному колошниковому газі, %; t – середня температура за дві попередні години в тій самій кільцевій зоні колошника, °С (коефіцієнт кореляції 0,6; стандартне відхилення – 3 %).

9. Впроваджено вдосконалену технологію доменної плавки щодо управління розподілом шихти «зверху» з використанням першого вітчизняного ЛЗП стосовно до шихтових умов роботи ДП-3 ПАТ «Азовсталь». Це забезпечило скорочення витрат коксу на 20 кг/т чавуну і збільшення виробництва чавуну на 5,2 %. Отримано фактичний економічний ефект 574 тис. руб. (у цінах до 1991 р.). Частка здобувача становить 20 % або 114,8 тис. руб. Лоткові завантажувальні пристрої і технологічні прийоми завантаження з їх використанням на даний час працюють на ДП-3 і ДП-4 ПАТ «Азовсталь».

На шести доменних печах освоєна робота стаціонарних охолоджуваних термозондів (патент України 22809): ДП-3, 4 і 5 ВАТ «Запоріжсталь», ДП-3 ПАТ «Алчевський металургійний комбінат», ДП-3 ПАТ «АЗОВСТАЛЬ», ДП-5 ПАТ «ММК ім. Ілліча». Інформація про температуру над рівнем засипу дозволяє технологу-доменщику ефективно керувати розподілом газового потоку, що зменшує простой, викликані порушенням ходу плавки і знижує витрату коксу.

Результати досліджень розподілу шихти на колошнику сучасним завантажувальним пристроєм використані в навчальному процесі та науково-методичній роботі ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» при підготовці методичних вказівок до лабораторних робіт з курсу «Металургія чавуну».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

1. Брусов, А.Л. Особенности использования информации о температуре газа по радиусу колошника для управления доменной печью / А.Л. Брусов // *Металл и литье Украины*. – 2012. – №11 (234). – С.10-15.
2. Брусов, А.Л. Анализ причин ориентированной неравномерности распределения шихты лотковым загрузочным устройством / А.Л. Брусов // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2011. – №3 (25). – С.4-9.
3. Брусов, А.Л. Возможность автоматизированного управления окружным распределением лотковым загрузочным устройством / А.Л. Брусов // *Наукові праці Донец. нац. тех. ун-т. (Сер.: металургія)*. – 2010. – Вип. 12 (177). – С.72-82.
4. Брусов, А.Л. Влияние частоты вращения распределительного элемента на окружное распределение шихты / А.Л. Брусов, А.Ф. Рыбцов, А.А. Бачинин, Е.М. Танчик, В.Н. Андронов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1987. – №9. – С. 19-22.
5. Бачинин, А.А. Исследование процесса загрузки и выгрузки шихтовых бункеров бесконусных загрузочных устройств доменных печей / А.А. Бачинин, А.Л. Брусов // *Сталь*. – 1989. – №7. – С. 10-12.
(Bachinin, A.A. Investigation of charging and discharging of charge hoppers in bell-less blast furnace charging gear / A.A. Bachinin, A.L. Brusov // *Steel in the USSR*. – 1989. – №19 (7). – pp. 279-280 (Scopus)).
6. Бачинин, А.А. Результаты стендовых исследований и освоения новых загрузочных устройств / А.А. Бачинин, Н.Г. Баланова, А.Л. Брусов, Г.Б. Рабинович, А.А. Третьяк // *Сталь*. – 1992. – №9. – С. 13-14.
(Bachinin, A.A. Results of bench tests and mastering of new charging devices / A.A. Bachinin, N.G. Balanova, A.L. Brusov, G.B. Rabinovich, A.A. Tret'yak // *Stal*. – 1992. – N 9. – pp. 13-14 (Scopus)).

7. Брусов, Л.П. Исследование параметров газа и распределения шихты на колошнике доменной печи с помощью зонда / Л.П. Брусов, В.П. Лозовой, Е.В. Свободенюк, А.Л. Брусов, А.Я. Васькевич, В.А. Гордиенко // Сталь. – 1992. – №8. – С. 7-10.
8. Бачинин, А.А. Исследование эксплуатационных параметров бесконусного загрузочного устройства конструкции типа воронка-склиз / А.А. Бачинин, Л.Д. Фомин, Е.М. Танчик, А.Л. Брусов, А.А. Руденко, Б.Ф. Мардер // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 1990. – №4. – С. 13-15.
9. Хрущев, Е.И. Опыт эксплуатации радиального распределителя шихты загрузочного устройства на доменных печах металлургического комбината им. Ильича / Е.И. Хрущев, А.А. Малимон, С.В. Ботман, Н.Г. Баланова, А.Л. Брусов // Сталь. – 1997. – №2. – С. 7-9.
(Khrushchev, E.I. Experience of running the charge distributor of the charging unit at the blast furnace of the Mariupol'skiy Metallurgical Works / E.I. Khrushchev, A.A. Malimon, S.V. Botman, N.G. Balanova, A.L. Brusov // Stal. – 1997. – N 2. – pp. 7-9 (Scopus)).

Опубліковані роботи, які додатково відображають наукові результати дисертації.

10. А.с. 1715847 СССР, МКИ С21 В7/20. Способ ведения доменной плавки / А.Ф. Рыбцов, В.С. Поляничко, Е.И. Четыркин, А.А. Бачинин, А.Г. Попов, А.Л. Брусов, Е.М. Танчик, О.Л. Вересин (СССР). – № 4674328/02; заявл. 27.01.89; опубл. 29.02.92, Бюл. № 8, ил.
11. Патент 1589 Україна, МКИ С21 В7/20. Спосіб ведення доменної плавки / О.Ф. Рибцов, В.С. Поляничко, Є.І. Четиркін, А.О. Бачинін, О.Г. Попов, А.Л. Брусов, Є.М. Танчик, О.Л. Вересін.; Донецький наук.-досл. ін-т. чорн. металургії. – № 4674328/SU; заявл. 15.10.93; опубл. 25.10.94, Бюл. №3, іл.
12. Патент 22809 Україна, МКИ С21 В7/24. Пристрій для термінового контролю температури по радіусу колошника доменної печі / І.В. Підгорний, Н.Г. Баланова, Б.Є. Бориславський, А.Л. Брусов, О.С. Гусаров, І.І. Дишлевич, В.В. Коваленко, В.І. Набока.; Запорізький мет. комб. «Запоріжсталь». – № 95083789; заявл. 14.08.95; опубл. 30.06.98, Бюл. №3, іл.
13. А.с. 1420026 СССР, МКИ4 С21 В7/20. Распределитель шихты загрузочного устройства доменной печи / А.Ф. Рыбцов, О.Л. Вересин, А.Л. Брусов, Е.М. Танчик, В.Д. Гладуш, Э.С. Орлов, И.И. Дышлевич (СССР). – № 4133816/23-02; заявл. 15.10.86; опубл. 30.08.88, Бюл. № 32, ил.
14. А.с. 1514793 СССР, МКИ4 С21 В7/20. Распределитель шихты загрузочного устройства доменной печи / А.Ф. Рыбцов, О.Л. Вересин, А.Л. Брусов, Е.М. Танчик, А.П. Кравченко, В.И. Апостолов, М.М. Пеклич (СССР). – № 425949/23-02; заявл. 10.06.87; опубл. 15.10.89, Бюл. № 38, ил.
15. Брусов, А.Л. Теоретические и экспериментальные предпосылки для управления распределением по окружности лотковым загрузочным устройством / А.Л. Брусов // Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах: материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф. 7-9 сентября 2010 г. Мариуполь: ПГТУ, 2010 – С. 72-77.
16. Брусов, А.Л. Температура и химический состав колошникового газа как характеристики распределения газового потока в доменной печи / А.Л. Брусов, С.Л. Яро-

- шевский // Творческое наследие Б.И. Китаева: труды междунар. науч.-практ. конф. 11-14 февраля 2009 г. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 274-279.
17. Брусов, А.Л. Работа стационарных охлаждаемых термозондов и компьютерной информационной системы для контроля за распределением температуры по диаметру колошника на доменных печах «Запорожстали» / А.Л. Брусов, Н.Г. Баланова, Б.Е. Бориславский, В.И. Набока, А.А. Ермоленко, Н.В. Крутас, А.П. Фоменко // Производство чугуна на рубеже столетий: труды V междунар. конгр. доменщиков. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – С. 405-407.
18. Снижение окружной неравномерности при работе БЗУ / Б.Е. Бориславский, А.Л. Брусов, М.Н. Горбачев, С.Б. Лозовой // Тезисы докладов ВНТК молодых ученых, инженеров и рабочих: “Создание и освоение экологически чистых, ресурсосберегающих технологий в черной металлургии”, г. Донецк, 22-24 мая 1991 г. – Донецк: Донничермет. – 1991. – С. 10.

Особистий внесок здобувача в роботах, написаних у співавторстві: [4] – встановлена залежність і розроблено математичну модель, що описує вплив числа витків порції, що завантажується, на нерівномірність розподілу шихти; [5] – розроблена методика і виконані досліди по сегрегації агломерату і поведінці обкотишів при вивантаженні з бункера; [6] – досліджена працездатність і технологічні можливості вітчизняного ЛЗП на стенді в натуральну величину; [7] – запропоновано зміни в конструкцію універсального рухомого зонда і методика розрахунку швидкості газового потоку; [8] – розроблена методика вимірювання траєкторії шихти, одночасно на двох рівнях; [9] – виявлено вплив ексцентриситету і перекоосу РРШ на радіально-окружний розподіл; [10, 11] – запропоновано використовувати періодичну зміну шихти в бункерах ЛЗП або напрямок обертання лотка залежно від показань периферійних термопар; [12] – запропоновано використовувати в конструкції термозонда захисний козирок, який зменшує удар шихти і деформацію профілю засипу; запропоновано використовувати ребро-стабілізатор [13] і розташування носка обертового лотка з протилежного боку від вивантажувального отвору [14] для зменшення окружної нерівномірності розподілу шихти; [16] – виявлено особливості основних характеристик радіального газорозподілу: хімічного складу і температури; [17] – розроблено методику контролю радіального розподілу за температурою з застосуванням комп'ютера; [18] – виконано технологічний аналіз перших результатів використання періодичного реверсу обертання лотка.

АНОТАЦІЯ

Брусов, А. Л. Розвиток теорії і технології розподілу шихти на колошнику доменної печі лотковим завантажувальним пристроєм. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02. – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів. – Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2014.

У дисертації вирішена важлива науково-технічна задача теоретичного та експериментального обґрунтування нових технологічних прийомів управління розподі-

лом шихти колошником доменної печі. Прийоми базуються на встановлених особливостях формування завантажувальним пристроєм з обертовим лотком шару сипучих матеріалів. Результати досліджень були використані при освоєнні технології доменної плавки з цим пристроєм на металургійному комбінаті «Азовсталь».

Створено комп'ютерну інформаційну систему для контролю температури газу над рівнем засипу, яка отримує дані від стаціонарних охолоджуваних термозондів нової конструкції. Шість доменних печей в Україні були обладнані такими пристроями. Показано, що температура над рівнем засипу є надійним показником технологічного процесу, а інформацію про неї можна використовувати для управління завантаженням.

Ключові слова: колошник доменної печі, завантажувальний пристрій з обертовим лотком, профіль засипу, шихтовий бункер, автоматизована оцінка окружного розподілу, температура газового потоку, термозонда, що охолоджується.

АННОТАЦИЯ

Брусов, А. Л. Развитие теории и технологии распределения шихты на колошнике доменной печи лотковым загрузочным устройством. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02. – Металлургия чёрных и цветных металлов и специальных сплавов. – Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2014.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача теоретического и экспериментального обоснования новых технологических приемов управления распределением шихты на колошнике доменной печи, которое базируется на установленных особенностях её движения по шихтовому тракту и укладки шихты лотковым загрузочным устройством, описанных математической моделью взаимного перекрытия витков и свойством симметрии в распределении порций, а также на разработанной информационной системе для анализа оперативных данных о распределении температуры газового потока, что позволило уменьшить его окружную неравномерность, повысить степень использования газа и сократить расход кокса.

Для первого отечественного лоткового загрузочного устройства, которое установлено на ДП-3 ПАО «Азовсталь», экспериментально определены и теоретически обоснованы следующие технологические параметры. Рабочая длина лотка от оси вращения до носка равная 2 м позволяет уложить шихту по всей площади колошника. Фиксированные углы наклона лотка выбраны так, чтобы загружать шихту в центр любой из 10 равновеликих зон, а точность их отработки гарантирует отклонение потока не более 50 мм. Шихтовые бункера выбранной формы (Ø 3,3 м) могут выгружать шихту с устойчивым минимальным расходом – 0,25 м³/с (0,2-0,9 м³/с), а точность регулировки секторного затвора (0,2°) и стабильность ссыпания дают среднеквадратичное отклонение времени выгрузки – 0,6 секунд.

Изучены и экспериментально подтверждены основные причины возникновения окружной неравномерности для ЛЗУ с параллельными бункерами: изменение расхода в начале и конце выгрузки порции, а также отклонение потока шихты от оси враще-

ния лотка. Установлено, что при заданной целой части числа витков, минимальной окружной неравномерности соответствует загрузка порции, при которой дробная часть числа витков имеет промежуточное значение между величинами начального и конечного участков загрузки с изменяющимся расходом (больше 0,2 и меньше 0,4). Установлено также, что при смене бункера, который выгружается, или направления вращения лотка происходит симметричное изменение окружного распределения: осевая симметрия относительно оси печи – в первом случае, и зеркальная, относительно плоскости проходящей через оси бункеров, во втором. Выявленные закономерности позволили разработать следующие способы (приемы) загрузки:

- уменьшить окружную неравномерность в 2 раза, выполнив коррекцию времени выгрузки порции, так чтобы дробная часть числа витков равнялась $0,3 \pm 0,1$;
- автоматизировать управление окружным распределением путем изменения режима загрузки, а именно, начального сектора и времени выгрузки порции;
- компенсировать неравномерность путем периодической смены вида шихты в бункерах и/или направления вращения лотка в цикле загрузки.

Создана компьютерная информационная система контроля распределения температуры по радиусу колошника над уровнем засыпи, основанная на данных стационарных охлаждаемых термозондов новой конструкции. Установлено, что с вероятностью 99 % температура укладывается в интервал 120-700 °С; средняя скорость её изменения во времени без учета влияния загрузки до 5 °С/мин (85 %), максимальный интервал – ± 30 (96 %); градиент температур – не более 5 °С/см (98 %).

Выполнена сравнительная оценка доли CO_2 в пробах газа, отобранных по радиусу печи из верхних горизонтов шахты традиционным методом, и температуры газа в тех же кольцевых зонах колошника, но над уровнем засыпи. Показано, что для корректного сопоставления с химическим составом данные о температуре газа нужно усреднять за 2 часа предшествующие времени забора пробы. По результатам исследований увеличение температуры на 100°С соответствует уменьшению CO_2 на 3 %. Предложена эмпирическая формула пересчета показаний термозонда в кривую распределения углекислого газа (коэффициент корреляции 0,6; стандартное отклонение – 3 %): $\% \text{CO}_2 = 23 + (200 - t)/33$, де $\% \text{CO}_2$ – доля CO_2 в радиальном колошниковом газе, %; t – средняя температура за два предыдущих часа в той же кольцевой зоне колошника, °С.

Показано, что температуру над уровнем засыпи можно использовать для управления загрузкой как достоверную информацию о технологическом процессе, а её реакция на изменения в распределении шихты и газового потока определяет методику программной обработки и визуализации этой информации. Одновременное отображение на мониторе кривой текущих значений и области их изменений (за 2 часа) позволило технологу использовать температуру для оперативного управления печью.

Предпосылки для управления окружным распределением появились как результат изучения замыкания витков и выгрузки сыпучих шихтовых материалов из бункера. Экспериментально доказано, что регулировка времени выгрузки бункера, с достаточной для управления окружным распределением точностью ($\pm 0,6$ с), задача сложная, но вполне реализуемая. Управляя временем выгрузки шихты из бункера и

изменяя начальный сектор, можно управлять окружным распределением, укладывая максимум (минимум) порции в выбранный сектор колошника.

Внедрена усовершенствованная технология доменной плавки в части управления распределением шихты «сверху» с использованием первого отечественного ЛЗУ применительно к шихтовым условиям работы ДП-3 ПАО «Азовсталь». Это обеспечило сокращение расхода кокса на 20 кг/т чугуна и увеличение производства чугуна на 5,2 %. Получен фактический экономический эффект 574 тыс. руб. (в ценах до 1991 г.). Доля соискателя составляет 20 % или 114,8 тыс. руб. Лотковые загрузочные устройства и технологические приемы загрузки с их использованием по настоящее время работают на ДП-3 и ДП-4 ПАО «Азовсталь».

Ключевые слова: колошник доменной печи, лотковое загрузочное устройство, профиль засыпи, шихтовый бункер, автоматизированная оценка окружного распределения, температура газового потока, охлаждаемый термозонд.

ABSTRACT

Brusov, A. L. The development of the theory and technology of the burden distribution on the blast furnace top by charging device with a rotating chute. – As the manuscript.

The Ph.D. thesis on specialty 05.16.02. – Metallurgy of ferrous and nonferrous metals and special alloys. – State institute of higher education "Donetsk National Technical University", Donetsk, 2014.

In this thesis, the scientific and technical task of theoretical and experimental support for the new technological methods for controlling the distribution of burden on the blast furnace top has been solved. The techniques are based on the established characteristics of the formation of the layer of loose material by the charging device with rotating chute. The results of this study have been used during the implementation of the blast furnace technology with this device at the blast furnace #3 of "Azovstal" steelworks.

A computer information system was developed for controlling the gas temperature above the stockline. This system receives its data from the cooled stationary thermal probes of a new design. Six blast furnaces throughout Ukraine were equipped with such thermal probes. It was shown that the temperature above the stockline is a reliable indicator of the technological process, and the temperature data can be used for controlling the loading.

Keywords: blast furnace top, charging device with a rotating chute, profile grist hopper leads charge, automated appraisal of district distribution, the temperature of the gas stream, cooled thermal probe.

Підписано до друку 07.05.2014 р.
Формат 60x84/16. Папір офсетний.
Обл.-вид. арк. 0,9. Тираж 100 прим.
Замовлення № 475.

Надруковано у ТОВ “Вега-Принт”.
83048, м. Донецьк, вул. Університетська, 78.
Тел. (062) 311-62-51.