



Юрій Станіславович Семенов

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, лауреат Премії Президента України для молодих вчених 2010 р., вчене звання – старший науковий співробітник. Автор понад 100 наукових робіт, у т.ч. 1 монографія, 7 патентів України, 23 публікації у бібліографічній та реферативній базі даних «Scopus». Напрями наукової діяльності: управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах, інформаційно-управляючі системи доменної плавки, обладнання, технологія і автоматизація доменного виробництва, завантаження доменних печей.



Євген Ігорович Шумельчик

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, лауреат Премії Президента України для молодих вчених 2018 р. Автор понад 70 наукових робіт, у т.ч. 3 патенти України, 14 публікацій у бібліографічній та реферативній базі даних «Scopus». Напрями наукової діяльності: математичне моделювання технологічних процесів та розробка програмного забезпечення, управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах, технологія і автоматизація доменного виробництва, завантаження доменних печей.



Віктор Володимирович Горупаха

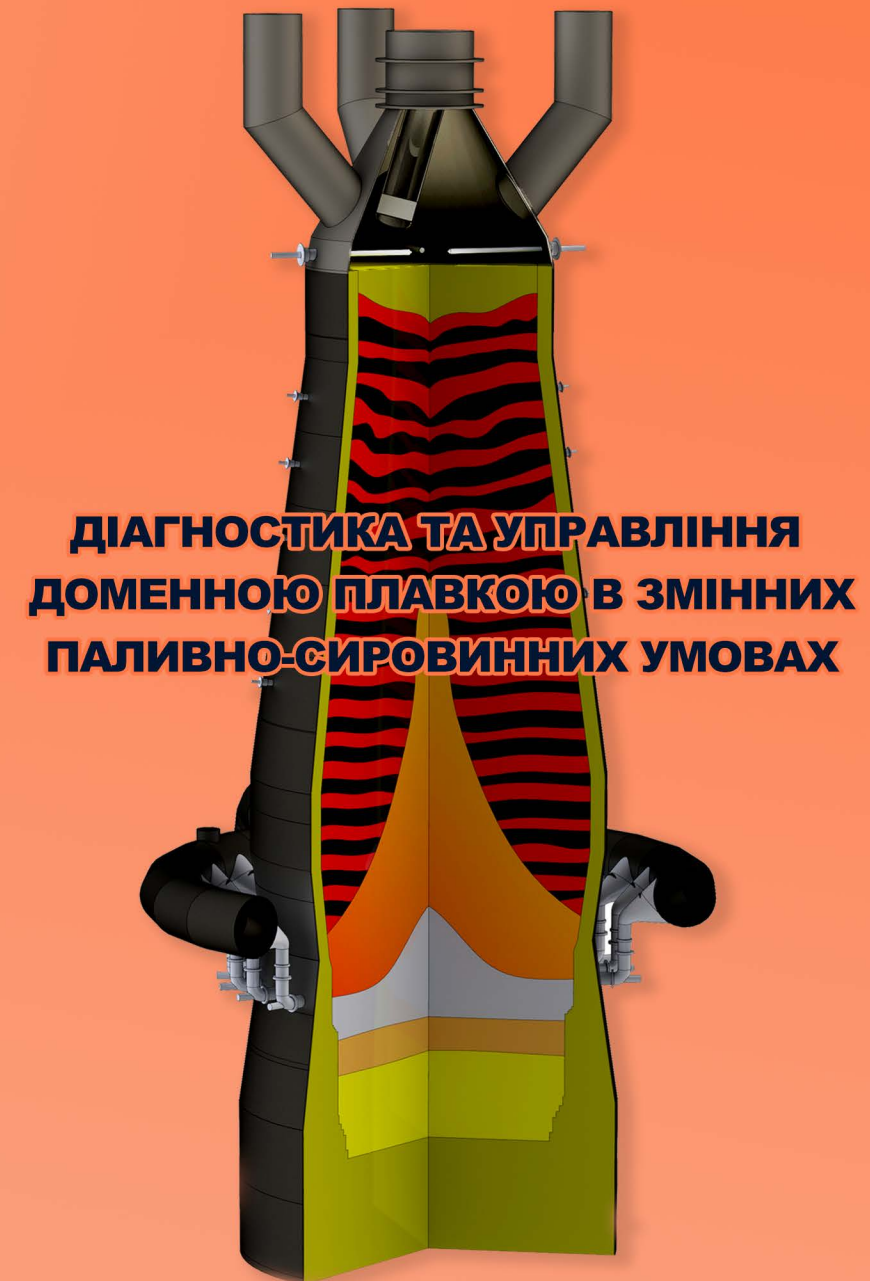
науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, лауреат Премії Президента України для молодих вчених 2018 р. Автор понад 30 наукових робіт, у т.ч. 8 публікацій у бібліографічній та реферативній базі даних «Scopus». Напрями наукової діяльності: розробка методів виводу доменних печей на оптимальні показники із нестаціонарних режимів роботи, управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах, управління розподілом паливних добавок до дуття по повітряним фурмам.



ДІАГНОСТИКА ТА УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ В ЗМІННИХ ПАЛИВНО-СИРОВИННИХ УМОВАХ

Ю.С. СЕМЕНОВ
Є.І. ШУМЕЛЬЧИК
В.В. ГОРУПАХА

Ю.С. СЕМЕНОВ, Є.І. ШУМЕЛЬЧИК, В.В. ГОРУПАХА



**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ ІМ. З.І. НЕКРАСОВА**

Ю.С. СЕМЕНОВ, Є.І. ШУМЕЛЬЧИК, В.В. ГОРУПАХА

**ДІАГНОСТИКА ТА УПРАВЛІННЯ
ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ В ЗМІННИХ
ПАЛИВНО-СИРОВИННИХ УМОВАХ**

**Дніпро
2018**

Р е ц е н з е н т и:

доктор технічних наук, професор
Аркадій Костянтинович ТАРАКАНОВ,
Національна металургійна академія України,
завідувач кафедри металургії чавуну;

доктор технічних наук, професор
Володимир Васильович БОЧКА,
Національна металургійна академія України, кафедра металургії чавуну.

С30 Семенов Ю.С., Шумельчик Є.І., Горупаха В.В. Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. – Дніпро: Домінанта Прінт, 2018. – 260 с.

У книзі представлено результати досліджень на доменній печі, обладнаній сучасним безконусним завантажувальним пристроєм, після її реконструкції, а саме: дослідження перед задувкою печі, особливості вибору задувочної шихти, налаштування параметрів роботи завантажувального пристрою. Представлено результати створення та реалізації модельної системи для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження, використання модельної системи націлене також на навчання технологічного персоналу в умовах освоєння нового завантажувального пристрою. Розроблено та реалізовано новий підхід до вибору енергоефективних режимів завантаження при використанні багатокомпонентної шихти змінної якості, а також в перехідних дутцевих режимах і в умовах відсутності природного газу і пиловугільного палива при роботі печі зі збільшеною кількістю водяної пари в дутті. Використання представлених у книзі режимів завантаження при освоєнні пиловугільного палива дозволили забезпечити експлуатаційну стійкість системи охолодження і безаварійну роботу досліджуваної доменної печі. Представлено результати досліджень по використанню інформації засобів контролю розподілу температур газів у колошниковому просторі для прийняття обґрунтованих рішень з управління завантаженням печі шихтовими матеріалами. Представлено результати досліджень впливу технологічних факторів на характер зміни температур футерівки по висоті печі протягом п'яти років її експлуатації в різних технологічних умовах, з визначенням граничних значень температур, що дозволяють діагностувати стан футерівки: її знос, або формування захисного гарнісажу. У книзі представлені результати задувки доменних печей після їх тривалої зупинки із застосуванням нових удосконалених підходів, які дозволили безаварійно вивести печі на робочі показники.

Для вчених-металургів і широкого кола інженерно-технічних працівників металургійної промисловості, аспірантів, докторантів, а також викладачів і студентів металургійних ВНЗ.

Рекомендовано до друку вченою радою
Інституту чорної металургії
ім. З.І. Некрасова НАН України,
протокол №10 від 29.11.2018 р.

ISBN 978-617-7371-45-7

© Семенов Ю. С.,
Шумельчик Є. І.,
Горупаха В. В., 2018 р.

*Книга видана до 100-річчя
Національної академії наук України
та присвячується одному
з найстаріших металургійних
підприємств України –
Снакієвському металургійному заводу
(заснований у 1897 р.),
де були отримані наведені у книзі
результати досліджень
у період 2011 – 2016 рр.
Сподіваємося, що ця книга
буде цікавою та корисною
як фахівцям-практикам
доменного виробництва,
так і вченим металургам.*

ВСТУП

Доменне виробництво України в XXI столітті, в порівнянні з провідними світовими виробниками чавуну: Китаєм, Японією та Індією, знаходиться в складному становищі – в умовах постійного зниження собівартості виплавки чавуну без необхідного обсягу інвестицій, спрямованого на модернізацію та реалізацію довгострокових інноваційних проєктів, що дозволили б зайняти більш високі позиції в світовому рейтингу. Зниження собівартості виробництва чавуну здійснюється шляхом використання низькоякісних залізорудної сировини і коксу, а також при практично повній відмові від коштовного природного газу з переходом на технологію вдування пиловугільного палива (ПВП) [1–9]. В окремі періоди роботи доменних печей, у випадках зниження інтенсивності плавки з тих чи інших, часом кон'юнктурних, причин, переходять на технологію без природного газу із зволженим дуттям, яка сприяє суттєвій витраті коксу на виплавку чавуну.

З метою виходу на прийнятні техніко-економічні показники плавки в такій ситуації актуальною стає розробка нових ефективних способів управління процесами доменної плавки в сформованих змінних шихтових і паливних умовах, а також в перехідні періоди роботи. Необхідною умовою

розробки нових способів управління є оснащення доменних печей сучасними засобами контролю процесів, на підставі інформації яких встановлюються нові залежності і зв'язки, що пояснюють протікання в об'ємі доменної печі різних процесів.

Представлені в даній книзі дослідження і розробки виконані на доменній печі №3 (далі по тексту ДП №3 або ДП з БЗП) Єнакієвського металургійного заводу (див. рисунок) протягом періоду її роботи після реконструкції: з жовтня 2011 по грудень 2016 р., деякі розглянуті особливості технології плавки стосуються також іншої доменної печі заводу – ДП №5, введеної в експлуатацію в червні 2007 р. і яка поступається ДП №3 за можливостями управління розподілом шихтових матеріалів в печі.

Вибір ДП №3 в якості основного об'єкта досліджень обумовлений застосуванням на ній технології зі змінним якісним і кількісним складом шихтових матеріалів в різних газо-дуттевих і паливних режимах роботи. Так, в досліджуваних періодах роботи ДП №3 і ДП №5 були використані різні паливні добавки до дуття в широких діапазонах їх зміни. На доменних печах використовували технології: з природним газом в дутті, без паливних добавок (т.зв. технологія на «безгазовій шихті») зі зволоженням дуттям, технологію спільної подачі природного газу і пиловугільного палива на початкових етапах освоєння ПВП, а також з витратами ПВП до 130 кг/т чавуну. Склад шихтових матеріалів характеризувався багатокомпонентністю і змінною якістю. Так, наприклад, вміст окатишів в суміші з агломератом змінювався від 10 до 90%, агломерат використовувався як виробництва місцевої аглофабрики зі значною кількістю в ньому вторинних ресурсів, так і привізний. У складі шихти також використовували різноманітні добавки: залізну руду, вапняк, конвертерний шлак, брикети з відсіву окатишів, марганцевмісні добавки, що забезпечують промивання горна, інші металодобавки. Якість коксу при цьому змінювалась в широкому діапазоні, використовували кокс як місцевого виробництва, так і привізний від широкого спектра постачальників.

Робота ДП №3 в таких умовах вимагала постійного коригування технології ведення доменної плавки: зміни режимів завантаження, забезпечення промивань горна для поновлення коксової насадки та коригування параметрів

дугтового режиму. ДП №3 за рівнем оснащення сучасними засобами контролю відповідає світовим стандартам, що дозволило з використанням їх інформації розробити нові методи контролю і управління доменної плавкою. Оснащення ДП №3 сучасним лотковим безконусним завантажувальним пристроєм (БЗП) фірми «Paul Wurth» (Люксембург) дозволило використовувати на печі різні варіанти режиму завантаження, спрямовані на підвищення техніко-економічних показників плавки в змінних умовах виробництва. БЗП встановлене на ДП №3 по ряду основних параметрів і конструктивних особливостей не має аналогів в Україні.

В останній час доменне виробництво України, як взагалі вся металургійна галузь, переживає важкі часи. Через брак сировини доменні цехи часто тривалий час простоюють. У зв'язку з цим, доменні печі зупиняють на термін, що перевищує допустимий, відповідно до вимог технологічних інструкцій ведення доменної плавки. У даній книзі представлені результати задувок доменних печей після їх тривалої зупинки із застосуванням нових удосконалених підходів, які дозволили безаварійно вивести печі на робочі показники. Цей досвід, хоча і змушений, однак, на жаль, є актуальним для сучасних реалій виробництва чавуну в Україні.

Представлені в цій книзі розробки і результати досліджень були покладені в основу наукової роботи авторів «Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та управління доменною плавкою», яка була удостоєна премії Президента України для молодих вчених 2018 р. (Указ Президента України №419/2018 від 07.12.2018 р.).

Особливу подяку автори висловлюють колегам Єнакієвського металургійного заводу періоду 2011–2016 рр.: к.т.н., начальнику доменного цеху, лауреату Державної премії України в галузі науки і техніки 2012 р. Олександрові Михайловичу Кузнєцову, начальнику аглодоменного відділу – головному спеціалісту з аглодоменного виробництва Олександрові В'ячеславовичу Зубенко, генеральному директору Олександрові Леонідовичу Подкоритову та директору з технології та якості Ігореві Юрійовичу Семіону за всебічну підтримку при впровадженні результатів досліджень.

Автори висловлюють вдячність за співпрацю при виконанні досліджень, викладених в книзі, науковим

співробітникам Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України: к.т.н., с.н.с. Олександр Станіславовичу Нестерову, к.т.н., с.н.с. Миколі Михайловичу Можаренку та с.н.с. Миколі Григоровичу Іванчі.

Автори вважають своїм обов'язком також відзначити внесок в освоєння нових підходів до діагностики та управління плавкою сучасної доменної печі колег Єнакієвського металургійного заводу періоду 2011–2016 рр.: Олександра Геннадійовича Коваленко, Євгена Миколайовича Димченко, к.т.н. Андрія Юрійовича Оробцева, Абдулу Саїдовіча Хайбулаєва, Миколу Михайловича Саприкіна, Сергія Вікторовича Овчаренко, Станіслава Володимировича Бурменко і Євгена Володимировича Білих.



Доменна піч №3 Єнакієвського металургійного заводу

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

А – агломерат,
АСУ – автоматизована система управління,
БЗП – безконусний завантажувальний пристрій,
ЗВМ – залізовмісні матеріали,
ЗРЧ – залізородна частина шихти,
ДП – доменна піч,
ІЧМ – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України,
К – кокс,
КВКО – коефіцієнт використання корисного об'єму,
КЗП – конусний завантажувальний пристрій,
О – окатиші,
ОРШ – окружний розподіл шихти,
ПВП – пиловугільне паливо,
ПГ – природний газ,
ПФ – периферійна зона,
п/ф – повітряна фурма,
РН – рудне навантаження,
Ш – шлак конвертерного виробництва,
ШМ – шихтові матеріали.

ГЛАВА 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДІАГНОСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ

1.1. Узагальнення результатів попередніх розробок по способам управління завантаженням доменної печі

1.1.1. Управління радіальним розподілом шихтових матеріалів

Оснащення доменних печей БЗП дозволило розширити можливості управління розподілом шихтових матеріалів по радіусу колошника. Цьому питанню присвячена значна кількість розробок, в першу чергу, виконаних під керівництвом академіка НАН України В.І. Большакова [10, 11]. Зокрема, для забезпечення ефективності використання відновлювальної та теплової енергії газів в печі, а також заданої інтенсивності процесу плавки були розроблені технологічні вимоги до радіального розподілу шихтових матеріалів, оцінюваного за показником рудних навантажень і об'ємів матеріалів в кільцевих рівних по площі зонах колошника.

Розподільники БЗП потенційно можуть забезпечувати близький до заданого розподіл рудних навантажень в кожній парі порцій залізовмісних матеріалів і коксу (подачі), однак такий спосіб управління вимагає складних алгоритмів і високої мобільності системи управління. Тому на практиці застосовується спосіб, коли задана залежність розподілу рудних навантажень по радіусу реалізується в рамках циклу завантаження, що представляє собою систематично повторювану сукупність порцій шихтових матеріалів, які завантажуються в певній послідовності і за заданими траєкторіями для забезпечення нормального ходу доменної плавки по всьому перерізу печі.

Вперше раціональні залежності розподілу рудних навантажень для доменних печей різних об'ємів були розроблені В.І. Большаковим спільно з В.Л. Покришкіним, Ф.М. Шугиловим, С.Т. Шуліко та ін. на підставі узагальнення досвіду і результатів досліджень на ряді металургійних

комбінатів [10–13]. Відповідно до розроблених технологічних вимог:

1. Розподіл рудних навантажень повинен формуватися в рамках циклу завантаження і змінюватися від величини, близької до нуля в центрі, до максимального значення 5–7% на відстані 0,8 радіуса від центру і зменшуватися до периферії на 15–20%.

2. Розподіл об'ємів шихтових матеріалів за цикл має забезпечувати формування заданого профілю засипу з урахуванням розподілу швидкостей сходу і фізико-механічних властивостей шихти. Зміна профілю засипу в межах циклу повинна мінімізувати течію шихтових матеріалів по поверхні засипу.

3. Газопроникність стовпа шихтових матеріалів повинна бути максимальною в центрі печі, зменшуватися в середній зоні і на периферії досягати помірної величини, її розподіл по радіусу печі дозволяє управляти формуванням зони плавлення.

4. Основну масу (до 85%) окатишів зниженої основності (CaO/SiO_2) необхідно укладати в середній зоні колошника шириною $\sim 0,5$ радіуса. Розподіл окатишів по радіусу печі може використовуватися для управління формою зони плавлення і для промивання горна.

Однією з умов забезпечення стабільного розподілу шихтових матеріалів БЗП є обґрунтований вибір тривалості вивантаження порцій шихти в піч. Ця тривалість визначається ступенем розкриття шихтового затвору, яка призначається окремо для порцій залізовмісних матеріалів і коксу. При зайвому збільшенні часу розвантаження бункерів (бункера) БЗП зменшується його пропускна здатність, а при зменшенні тривалості вивантаження матеріалів може відбуватися перекидання частини матеріалів через борт лотка, що призводить до неконтрольованого порушення розподілу шихти на колошнику, особливо в периферійних зонах печі. Величина розкриття шихтових затворів призначається за результатами передпускових досліджень [10, 11].

В процесі освоєння лоткових БЗП на ДП, при відсутності прямих методів контролю профілю засипу і розподілу швидкостей сходу шихти по радіусу, розподіл шихтових матеріалів на колошнику оцінюють з використанням математичного моделювання. Реальний розподіл шихтових

матеріалів на колошнику істотно залежить від траєкторій руху шихти (кутових позицій лотка) програми завантаження, а також рівня засипу і профілю поверхні, на яку необхідно завантажити. При завантаженні лотковим БЗП головним засобом управління є зміна траєкторій руху шихти.

Зсув уздовж радіуса колошника точок перетину траєкторій з поверхнею засипу шихти відбувається при зміні рівня засипу [14–16]. Зниження рівня засипу призводить до зміщення всіх кільцевих зон, відповідних траєкторіям кожного кутового положення, до периферії печі. Тому при зміні рівня засипу в автоматичному режимі змінюються кути нахилу лотка для його робочих кутових положень, що забезпечує сталість розташування точок перетину траєкторій з поверхнею шихти у відповідних кутовим положенням рівновеликих кільцевих зонах печі.

Застосування БЗП, яке забезпечує пряме управління розподілом шихти шляхом подачі необхідних об'ємів шихтових матеріалів в задані кільцеві зони, дозволило здійснити раціональні режими управління радіальним розподілом шихти, що в свою чергу дозволило підвищити ефективність доменної плавки [10]. В сучасних умовах при погіршенні якості шихтових матеріалів із багатокомпонентним їх складом та при використанні альтернативних видів палива необхідна розробка нових підходів з управління розподілом шихтових матеріалів із застосуванням БЗП, оскільки попередні розробки були здійснені для умов використання якісної шихти та природного газу в дутті.

Однією з найбільш актуальних проблем, з якою стикаються технологи-доменщики останнім часом, є багатокомпонентність шихти, викликана, в основному, виснаженням природних мінеральних ресурсів і, пов'язаним з цим, погіршенням якості сировини і палива. Крім різних паливних, залізовмісних, флюсуючих, гарнісажеутворюючих і промивних добавок, до складу шихти доменних печей можуть входити по два і більш видів коксу і залізородних матеріалів.

Ефективне застосування багатокомпонентної шихти в доменному виробництві можливо тільки на основі використання науково-обґрунтованої технології завантаження багатокомпонентних змішаних порцій, що включає розробку технологічних вимог до розподілу компонентів шихти на колошнику, способів формування багатокомпонентних

змішаних порцій шихти і методик визначення параметрів їх формування, комплексу перспективних технологічних прийомів завантаження багатокомпонентної шихти. Вирішенню зазначених задач присвячений ряд розробок ІЧМ [17–19], які дозволили забезпечити підвищення економічності і стабілізацію ходу доменної плавки в нестабільних шихтових умовах на ряді металургійних підприємств.

В складі доменної шихти використовують кокс, коксовий горіх, агломерат, окатиші, брикети із різним компонентним складом [20, 21], які використовують як для промивань горна печі, так і для утилізації дрібних фракцій шихти, конвертерний шлак, вапняк, залізну руду, інши залізовмісні та паливні добавки. Нівелювання негативних наслідків проблеми багатокомпонентної шихти для доменної плавки може бути досягнуто при наявності засобів і методів контролю розподілу всіх компонентів, а також технологічних прийомів і способів їх завантаження з урахуванням властивостей і особливостей поведінки в процесі доменної плавки. До недавнього часу інструментальних засобів, що забезпечують контроль і визначення характеристик розподілу кожного з компонентів шихти на колошнику, не існувало. У зв'язку з цим, для вирішення зазначеної задачі в ІЧМ була розроблена комплексна математична модель формування багатокомпонентних порцій шихтових матеріалів, їх завантаження в бункер БЗП, вивантаження з бункера і розподілу на поверхні засипу [22].

1.1.2. Управління окружним розподілом шихтових матеріалів

Рівномірний хід доменної плавки по окружності печі дозволяє забезпечити високі показники за ступенем використання відновлювальної здатності газів і зменшити витрату енергоносіїв [10, 11, 23, 24]. Порушення роботи печі по окружності призводить до зменшення ступеня використання газів на 3–5% і збільшення витрати коксу на 5–15 кг/т чавуну, а стабільний перебіг поверхні засипу більш, ніж на 0,5 м – до порушення радіального розподілу шихти. Вивченню нерівномірності окружного розподілу шихти і газів в доменних печах присвячена велика кількість досліджень і розробок [10, 25–40]. З урахуванням отриманих в них

результатів в узагальненому поданні В.І. Большаковим в роботі [10] сформульовані основні положення управління окружним розподілом шихти на колошнику ДП, обладнаних завантажувальними пристроями з обертовими розподільниками шихти.

Розподільники БЗП мають широкі можливості управління як радіальним, так і окружним розподілом шихти. У Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ) розроблений ряд прийомів управління окружним розподілом шихти і газів, широко застосовуваних на печах, оснащених БЗП [11, 26]. Так, на доменних печах, обладнаних двобункерним БЗП, використовують такі прийоми управління окружним розподілом шихтових матеріалів як: зміна виду матеріалу в бункерах завантажувального пристрою, зміна напрямку обертання лоткового розподільника шихти, а також попарне зміщення по окружності колошника початку відкривання шихтових затворів бункерів БЗП при завантаженні в піч кожної порції або подачі, для скорочення назване «переступанням» [10]. Для однократних БЗП ефективно застосування тільки останнього прийому.

Для ефективного управління окружним розподілом шихти і газів в доменній печі «зверху» необхідно контролювати форму профілю засипу шихти на колошнику за допомогою вимірювальних пристроїв, інформація яких дозволяє розширити можливості управління розподілом шихти [11]. Для використання інформації цих пристроїв для управління окружним розподілом, контроль поверхні засипу шихти по окружності печі необхідно здійснювати безперервно, як мінімум в чотирьох секторах в периферійній зоні перерізу колошника. На основі інформації про розподіл рівнів засипу і швидкостей опускання шихти по окружності колошника, отриманої за допомогою стаціонарної системи вимірювання профілю поверхні засипу шихти, розробляються прийоми управління окружним розподілом, які повинні перешкоджати виникненню стабільних (системних) перекосів по окружності печі. На підставі викладеного при участі авторів даної книги було розроблено і в 2009 р. випробувано в складі АСУ ДП №9 комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг» спосіб управління окружним розподілом шихтових матеріалів з використанням інформації системи вимірювання поверхні засипу шихти [41].

Управління «знизу» здійснюють, як правило, зміною розташування закритих повітряних фурм в заданих секторах і (або) зміною витрати дуттєвих паливних добавок на окремі фурми, відомі також прийоми використання фурм різного діаметру. Для ефективності такого управління необхідно створення систем моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності доменної печі.

Таким чином, для кожної конкретної доменної печі характерно індивідуальне співвідношення впливу різних чинників, що створюють окружну нерівномірність. Обґрунтування вибору способу ефективного управління окружним розподілом шихти і газів може бути виконано тільки на основі безперервного контролю поверхні засипу шихти і температур футерівки по висоті і окружності доменної печі.

1.1.3. Використання засобів контролю процесів доменної плавки для управління розподілом шихтових матеріалів в печі

У літературних джерелах практично відсутня інформація про використання сучасних засобів контролю, зокрема таких як профілеміри, зонди з відбором проб газу або термозонди для обґрунтованого управління завантаженням доменної печі. У більшості робіт дослідники постулюють лише необхідність використання інформації засобів контролю для управління завантаженням. При цьому, за рідкісним винятком, відсутні відомості про кількісні показники, які можуть бути отримані з їх допомогою, а також технологічні умови доменної плавки, особливо в перехідних режимах, при яких інформація засобів контролю має різний характер своєї зміни.

Відомими дослідженнями в цій галузі є розробки ІЧМ по використанню інформації радіолокаційної системи вимірювання поверхні засипу шихти для управління окружним розподілом шихти і розмірами осьової коксової віддушини [41–43]. Також в ІЧМ були виконані дослідження динаміки зміни хімічного складу газу по радіусу печі під захисними плитами колошника при зміні розподілу шихтових матеріалів в печі [44]. Зазначені розробки з різних, в більшості випадків, кон'юктурних причин не отримали широкого застосування,

оскільки вимагали виконання значного комплексу дослідницьких робіт з подальшою практичною реалізацією результатів.

Таким чином, розробка кількісних показників оцінки ефективності застосовуваних на ДП режимів завантаження з використанням інформації сучасних засобів контролю в перехідних і нестабільних режимах роботи доменної печі і подальша реалізація розробок в АСУ в якості систем, що служать для підтримки прийняття рішень з управління завантаженням є актуальною задачею.

1.2. Аналіз досвіду використання засобів контролю процесів для вдосконалення технології доменної плавки

1.2.1. Використання зондів з відбором проб газу

Деякі доменні печі на пострадянському просторі і в зарубіжних країнах оснащуються системою зондів з відбором проб газу для контролю розподілу хімічного складу газів під поверхнею засипу, а іноді і одночасно з визначенням температур в точках контролю. У більшості випадків, хімічний аналіз проб газів виконується після їх відбору в декількох точках радіусу шляхом ручного аналізу в заводській лабораторії. Цей процес вимагає значних витрат часу і тому такий аналіз зазвичай виконується один раз на добу. На деяких доменних печах вимірювання хімічного складу газів виконуються автоматизованими газоаналізаторами, що зменшує трудомісткість і збільшує оперативність отримання інформації [45]. Такими автоматизованими установками газового аналізу по радіусу колошника і загального газу перед газоочищенням оснащені лише три ДП в Україні, а також ряд зарубіжних печей. За допомогою систем газового аналізу можлива безперервна оцінка зміни дуже важливого показника для оцінки ефективності застосовуваних режимів завантаження – ступеня використання відновної здатності газів по радіусу печі.

Головним недоліком зондів з відбором проб газу з ручним хімічним аналізом є велика дискретність отримання інформації, це може негативно відбиватися на прийнятті в

подальшому рішення по управлінню процесом в результаті оцінки отриманого аналізу газів, оскільки велика ймовірність надходження недостовірної інформації, як з огляду на неточності хімічного аналізу, так і зондування шихтових матеріалів без дотримання регламенту з відбором проб в різнорідних шарах стовпа шихти. Дотримання регламенту відбору проб газу, який передбачає введення в стовп шихти зонда з чіткою прив'язкою до режиму завантаження, також не гарантує однотипності зондування, в наслідок практично неможливого урахування реальної швидкості сходу шихти. Цей недолік нівелюється безперервним визначенням хімічного аналізу газів автоматизованими установками, проте зважаючи на їх дорожнечу, вони не отримали широкого застосування на доменних печах в Україні.

У зв'язку з чим, в даний час на більшості ДП встановлюють системи стаціонарних термозондів, що дозволяють отримувати інформацію про зміну температури газів над поверхнею шихти в безперервному режимі і в різних перерізах печі. Більш того, на двох реконструйованих у 2014 і 2016 рр. доменних печах в Україні встановлено термозонди зарубіжного виробництва з можливістю одночасного безперервного визначення хімічного аналізу газів в точках контролю.

1.2.2. Використання стаціонарних термозондів, встановлених над поверхнею засипу шихти

В останні роки для оцінки розподілу температури газового потоку все ширше застосовуються термозонди, які встановлюють над поверхнею засипу шихти в ДП по одному або декільком радіусам колошника [46–51]. Важливою перевагою термозондів є безперервний вимір розподілу температури газів, що дозволяє використовувати отриману з їх допомогою інформацію для оцінки та коригування режиму завантаження ДП, а недоліком – зміна показань при зміні рівня засипу внаслідок перемішування і відхилення газового потоку. На відміну від ДП з БЗП, рівень засипу є одним з інструментів управління розподілом шихтових матеріалів на колошнику доменних печей, обладнаних конусними завантажувальними пристроями (КЗП), отже, це свідчить про більшу ефективність застосування термозондів для управління радіальним

розподілом шихтових матеріалів на ДП, обладнаних БЗП. Для отримання достовірних і стабільних показань термозонди, як правило, встановлюють на відстані $\sim 0,50$ м від поверхні засипу [46].

Об'єктами досліджень в книзі є ДП корисним об'ємом 1719 м^3 , обладнана БЗП (ДП з БЗП), і ДП корисним об'ємом 1513 м^3 , обладнана типовим конусним завантажувальним пристроєм (ДП з КЗП), які оснащені чотирма охолоджуваними азотом термозондами українського виробництва. Однією з позитивних конструктивних особливостей цих термозондів, на відміну від конструкцій більшості термозондів іноземного виробництва, є можливість об'єктивного контролю ступеня розвитку периферійного газового потоку – відстань від стінки колошника до крайньої периферійної термопари становить 50 мм, а відстань до другої термопари пристінної зони – 310 мм.

У деяких публікаціях зустрічаються суперечливі відомості про вплив охолодження термозондів на їх показання [47–50]. Так, виконані дослідження [47] щодо впливу охолодження термозондів на їх показання шляхом періодичного відключення подачі азоту показали відсутність суттєвих спотворень показань термопар, що суперечить висновкам, викладеним в роботі [48, 49]. Однак, згідно з дослідженнями [50], охолодження конструкції термозондів впливає тільки на показання крайньої пристінної термопари за рахунок відводу азоту. Дане твердження вимагає проведення додаткових експериментальних досліджень, спрямованих на короткочасне відключення холодоагенту. Для об'єктивної оцінки температури периферійного газового потоку можливо використовувати середні значення двох крайніх термопар пристінної зони ДП. Разом з тим, використання охолодження конструкцій термозондів особливо необхідно при роботі ДП на гарячому агломераті, коли виключена можливість стійкої і тривалої працездатності термозондів без охолодження.

За результатами досліджень, виконаних на ДП обладнаних термозондами, що мають прямокутний поперечний переріз більше 200 мм встановлено, що в цих випадках при розподілі шихти лотковим БЗП відбувається спотворення потоку шихти при його контакті з термозондами, що призводить до утворення в печі окружної нерівномірності шихти [52, 53]. При контакті з термозондами потоку шихти в

секторах печі під зондами утворюються поглиблення більше 0,5 м, що, в свою чергу, призводить до нерівномірного розподілу шихти і газів по окружності печі. Термозонди, встановлені на доменних печах, що обрані в книзі в якості об'єктів досліджень, характеризуються меншою шириною і є прийнятними для контролю температури поверхні шихти без спотворення потоку матеріалів, що вивантажуються в піч [52, 53], це є головною позитивною конструктивною особливістю даних термозондів.

У більшості публікацій, присвячених контролю температур газового потоку над поверхнею шихти в доменній печі, наводиться опис конструктивних особливостей різних термозондів, особливостей їх охолодження і постулюється необхідність безперервного контролю температур технологічним персоналом. При цьому, в літературних даних відсутні відомості про дослідження впливу технологічних факторів на характер зміни температур газового потоку над поверхнею засипу шихти, а також про способи управління розподілом шихтових матеріалів з використанням інформації термозондів. Широке застосування в даний час на ДП термозондів зумовило актуальність виконання досліджень, запропонованих в книзі.

1.2.3. Використання інформації термопар периферійного і колошникового газів, засобів контролю поверхні засипу шихти

Для оцінки ефективності застосовуваних на доменних печах режимів завантаження традиційно протягом багатьох років використовують інформацію термопар, які вимірюють температуру периферійного газового потоку в печі під захисними плитами колошника, а також термопар колошникового газу, встановлених у газовідводах. Ця інформація є первинною для оператора-технолога при оцінці газодинамічних процесів в печі. Однак її об'єм є недостатнім для отримання повної інформації про процеси, які протікають в сухій зоні стовпа шихти.

Розширити можливості контролю процесів плавки дозволяє установка на доменних печах систем вимірювання профілю поверхні засипу шихти, заснованих на методі багатоточкового вимірювання і які використовують

радіолокаційний спосіб контролю [42]. В Україні такі системи встановлені на двох доменних печах – ДП №8 (з 2008 р.) і ДП №9 (з 2003 р.) комбінату «АрселорМіттал Кривий Ріг», вони включають комплект високочастотних (37,5 ГГц) радіолокаційних рівнемірів, що використовують принцип частотної модуляції сигналу. Висока частота цих рівнемірів дозволяє забезпечити мінімальну ширину діаграми їх спрямованості і, тим самим, збільшити точність вимірюваної відстані до поверхні засипу шихти, яка в доменній печі характеризується нерівністю і значною нестабільністю, викликаною особливостями взаємодії шихти і газового потоку. Також дані вимірювачі зважаючи на свої технічні характеристики надійно працюють в умовах пилогазового середовища при високих температурах, що властиво доменній плавці [54]. Вимірювачі, що входять в систему, контролюють рівні шихти в різних перерізах поверхні засипу. Використання в АСУ систем дозволяє отримувати інформацію про зміну профілів поверхні засипу шихтових матеріалів в різних перерізах – якісного показника ефективності застосовуваних режимів завантаження печі і швидкостей сходу шихти – інтегрального показника газодинамічного режиму. В останні роки з використанням інформації радіолокаційних систем розробляються інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень з управління доменної плавкою [55]. В майбутньому повний перехід на безконтактний спосіб вимірювання поверхні засипу шихти є безальтернативним. Це дозволить підвищити як пропускну здатність системи завантаження доменної печі шихтовими матеріалами, так і отримати багато нової інформації про стан процесів.

1.2.4. Використання інформації термопар футерівки доменної печі

Здійснювати установку значної кількості термопар в футерівку по висоті і окружності доменних печей України та пострадянського простору, зокрема, в зонах розпару і заплечиків, почали тільки в недавній час. До цього, як правило, встановлювали термопари тільки на одному або двох горизонтах верху шахти, а також в кожусі печі. У деяких іноземних публікаціях [56, 57] наводяться відомості про особливості зміни температур футерівки по висоті доменної

печі в деяких різних технологічних умовах. Спеціалістами ІЧМ в останні роки розроблено та реалізовано на металургійному комбінаті «Запоріжсталь» системи контролю розпалу футерівки шахти доменної печі з використанням інформації термопар [58, 59]. Безперервний контроль температур футерівки протягом тривалого періоду експлуатації печі дозволяє визначити технологічні чинники, що впливають на динаміку зміни температур, а також відкриває можливість для розробки з використанням інформації термопар нових систем діагностики та показників оцінки газодинамічного режиму доменної плавки [60].

1.3. Аналіз досвіду ведення технології доменної плавки в змінних паливних умовах

1.3.1. Особливості технології доменної плавки з використанням природного газу, пиловугільного палива і без паливних дуттєвих добавок зі зволоженням дуттям¹

Перші пропозиції про використання у доменній плавці газоподібних і рідких вуглеводів були висловлені ще у ХІХ столітті. Вдування у доменну піч природного газу, а також мазути і нафти у фурми було запропоноване Барнетом у 1838 р. [61]. Однак, спроби здійснити ці пропозиції не мали успіху. Вперше у світовій практиці природний газ було успішно застосовано у доменній печі на Дніпропетровському металургійному заводі у жовтні 1957 р., дослідження в період освоєння цієї технології виконувалися під керівництвом директора ІЧМ, проф. З.І. Некрасова. Далі в 1958–1959 рр. проводилось промислове освоєння технології доменної плавки з вдуванням природного газу в поєднанні з киснем і додатковим нагріванням дуття на доменних печях Придніпров'я (Україна) [61, 62].

Безсумнівною перевагою природного газу перед іншими заміниками коксу є відсутність сірки. Завдяки цьому

¹ Автори вдячні к.т.н., с.н.с. М.М. Можаренко за участь у виконанні досліджень

зменшується надходження сірки в піч, і створюються умови для поліпшення якості чавуну [63]. Іншою позитивною особливістю природного газу служить значна участь H_2 в непрямому відновленні оксидів шихти. Внаслідок цього зменшується частка прямого відновлення, до фурм більше доходить вуглецю коксу. Але така зміна доменного процесу не компенсує повністю двох недоліків природного газу: малого виділення тепла в горні і високого виходу продуктів горіння. Останній недолік зменшують використанням природного газу в поєднанні зі збагаченням дуття киснем. Але цей захід є вимушеним, він значно підвищує вартість дуття і знижує надходження тепла з дуттям через зменшення в ньому вмісту азоту [63]. Коефіцієнт заміни коксу природним газом при малій витраті останнього ($40\text{--}60\text{ м}^3$) становить $0,8\text{--}0,9\text{ кг/м}^3$. Зі збільшенням кількості природного газу до $100\text{--}120\text{ м}^3$ він знижується до $0,4\text{--}0,5\text{ кг/м}^3$. З підвищенням кількості природного газу мінімальна витрата коксу досягається при меншому відношенні природного газу і кисню, тобто в умовах зростання витрат кисню [64, 65].

Для доменного виробництва України технологія доменної плавки з використанням природного газу в останні роки перестала бути актуальною в зв'язку з його дорожнечою. Станом на 2018 р. практично всі доменні печі України частково або повністю відмовилися від використання в дутті природного газу, його використовують в доменній плавці в малих кількостях, а також на доменних повітрянагрівачах для збільшення теплотворної здатності палива (доменного газу) і зрідка в роздувочних періодах. Відмова від природного газу супроводжується переходом на технологію вдування пиловугільного палива [1–8].

На деяких підприємствах при відсутності установок із вдування ПВП застосовують технологію доменної плавки без використання паливних дуттєвих добавок зі зволоженням дуття. Така технологія на постійній основі використовується в доменному цеху ПрАТ «Дніпровський металургійний завод» (м. Дніпро), а також використовувалася у 2015 – початок 2016 рр. на Єнакієвському металургійному заводі. При використанні цієї технології додаткове зволоження дуття шляхом подачі в нього пари необхідно в якості компенсатора для підтримки заданого рівня теоретичної температури горіння в фурменій зоні. Дана технологія веде до істотної

перевитрати коксу і може бути застосована на печах невеликого об'єму або епізодично [9].

Аналіз розвитку вугледобувної та металургійної промисловості в світі свідчить, що в перспективі, в найближчі 20–30 років, технологія заміни частини коксу ПВП в доменній плавці залишиться найбільш пріоритетною і ефективною. Актуальність такої технології для України останнім часом значно зросла, що зумовлено високим рівнем витрат коксу – до 550 кг/т чавуну і більше, швидко зростаючою тенденцією підвищення вартості природного газу. У той же час економічне становище металургійних підприємств таке, що тільки різке зниження витрат енергоресурсів і, головним чином, коксу до 300–350 кг/т чавуну за рахунок масового використання ПВП забезпечить їм необхідний рівень рентабельності і конкурентоспроможності [9].

На металургійних підприємствах Європи, Японії, Китаю і США експлуатаційною нормою є вдування 160–180 кг/т чавуну ПВП при витратах коксу 320–340 кг/т, а на ряді сучасних доменних печей витрата ПВП досягла 240–260 кг/т чавуну при витраті коксу 250–300 кг/т чавуну. Станом на 2007 р. в більш ніж у 25 країнах з найбільш розвинутою металургією було виплавлено близько 350 млн. т чавуну ($\approx 50\%$ річної виплавки в світі) із застосуванням ПВП, витрата якого змінювалась від 100 до 290 кг/т чавуну. Частка заміни коксу ПВП складала від 20% до 45%. У 2007 р. в світі для виробництва ПВП для доменних печей використовувалося більше 500 млн. т вугілля практично всіх відомих марок: *A*, *G*, *T* та ін. З широким діапазоном зміни вмісту «летючих» (непов'язаних газів) (від 6,5% до 36,2%) і золи (2,2–17,5%). Незважаючи на настільки широкий діапазон по зольності, в світі чітко простежується обмеження застосування ПВП з вмістом золи більше 10% і сірки більше 1%.

Технологія доменної плавки з вдуванням в горн ПВП отримала загальне визнання в усьому світі. Накопичений досвід свідчить про достатню її гнучкість в різних паливно-сировинних умовах:

1. Залізовмісна шихта може мати до 100% високоофлюсованих окатишів з масовим вмістом в них *MgO* до 1,6%.
2. Допускається використання коксового «горішка» до 120 кг/т чавуну з використанням спеціально

- розроблених програм завантаження з подачею в центр великих, відсортованих фракцій коксу.
3. Завантаження в піч на периферію дрібних фракцій агломерату в кількості 10–20% від маси порції агломерату, що позитивно позначається на газорозподілі, рівні теплових навантажень на холодильники і стані робочого профілю печі. В умовах України, зважаючи на низьку якість залізовмісних матеріалів, витрата дрібних фракцій агломерату для цих цілей не повинна перевищувати 7–8%.
 4. Вибір рівня збагачення дуття киснем від 23% до 35%.
 5. Використання вугілля з вмістом «летючих» речовин від 9% до 37% і золи – від 5% до 12%.
 6. У сумішах ПВП з газового швидкозаймистого і висококалорійного вугілля вміст перших може змінюватися від 0% до 60%, що значно впливає на умови спалювання сумішей ПВП.
 7. Повнота і висока ефективність спалювання ПВП забезпечується при різних поєднаннях його фракційного складу, конструктивних рішеннях подачі кисню в зону горіння і створення відповідних кінетичних умов допалювання їх в горні при неодмінному забезпеченні необхідної якості шихтових матеріалів.
 8. Високі економічні показники технології вдування ПВП досягаються як при гранульованих, так і пилоподібних вугіллях.
 9. Якість залізрудних матеріалів і коксу при їх поставках на металургійні підприємства оцінюється за загальноприйнятими показниками. При необхідності підвищення якості коксу по гарячій міцності (*CSR*) і реакційній здатності (*CRI*), а також багатства залізрудної шихти по відношенню Fe/SiO_2 імпортуються висококалорійні вугілля і залізрудні компоненти.
 10. Регулювання теоретичної температури горіння в межах 2000–2400 °С при застосуванні ПВП здійснюється шляхом збільшення або зменшення витрати кисню.
 11. Високі техніко-економічні показники на різних металургійних заводах досягалися при різній товщині

шарів залізовмісних матеріалів і коксу при їх завантаженні на поверхню засипу [9, 53].

Технологічні переваги вдування ПВП перед іншими паливами зумовлюються співвідношеннями вмісту вуглецю до водню в їх робочій масі і величиною теплоти, що виділяється в горні при горінні палива до CO і H_2 (табл. 1.1).

Таблиця 1.1. Ефективність природного газу і вугілля різних марок при вдування їх в горн доменної печі

Показники	Паливо					
	Кокс	Природний газ	Вугілля			
			Антрацит	Жирний	Газовий	Полум'яний
Теплота, що виділяється в горні, ккал/кг	8359	2333	7508	6788	6541	5313
Коефіцієнт заміни коксу, кг/кг коксу	–	1,20	1,05	1,06	1,06	1,00
Відношення C/H	170,0	3,0	22,6	20,3	17,0	16,3
Вихід продуктів горіння, м ³ /кг	1,68	4,20	1,92	2,01	2,06	1,97

Аналіз наведених даних показує, що при вдуванні різного вугілля в горні виділяється значно більше теплоти в порівнянні з природним газом. Це говорить про необхідність значно меншої температурно-теплової компенсації при вдуванні ПВП в порівнянні з природним газом. Це також підтверджується і питомим виходом продуктів горіння. Таким чином, вдування ПВП, є технологічно більш переважним видом палива.

Досвід експлуатації доменних печей з використанням в якості паливної добавки ПВП з великими витратами (150–200 кг/т чавуну) показує, що перехід на таку технологію вимагає виконання ряду підготовчих заходів:

1. Оснащення доменних печей безконусним завантажувальним пристроєм, що забезпечує розподіл шихти по всьому радіусу поверхні засипу [1, 8, 53, 66];
2. Забезпечення відсіву дрібних фракцій з залізовмісних матеріалів і коксу, а також поділ відсіву, як мінімум, на дві фракції з наступним роздільним завантаженням їх у піч;
3. Забезпечення позапічного знесірчування чавуну при використанні високосірчаного ПВП;
4. Підвищення вмісту заліза в металошихті. Цей захід є обов'язковим тому, що на кожні 100 кг/т чавуну ПВП вихід шлаку повинен знижуватися на 40–50 кг/т чавуну. На окремих печах для цієї мети вводять залізо прямого відновлення;
5. Забезпечення необхідної якості коксу шляхом зміни марочного складу вугільної шихти і прийняття технологічних заходів щодо зниження реакційної здатності і підвищення гарячої міцності.

За оцінкою Американського Інституту чавуну і сталі погіршення показників якості коксу на 1% від оптимальних значень призводить до збільшення витрати коксу (у кг/т чавуну) в пропорціях, наведених в табл. 1.2.

При вдуванні ПВП велике значення надається і рівню показників холодної міцності коксу. Як правило, показники холодної міцності коксу, що надходить на доменні печі з технологією вдування в горн ПВП, збільшуються від номінальної величини на 1,5–2,0%.

Таблиця 1.2. Вплив змін показників якості коксу на його витрата

Зміна показників якості коксу	Збільшення витрати коксу, кг/т чавуну
збільшення вологості коксу при температурі колошника менше 110 °С	2,5
збільшення вмісту золи	10,0
збільшення вмісту сірки на 0,1 %	5,0
зменшення показника гарячої міцності коксу (CSR) при його значеннях:	
> 58 %	0,75
< 58 %	1,50

Важливий вплив на ефективність технології чинить і якість вугілля. Особливо важливими є вміст золи, від якого залежить коефіцієнт заміни коксу, і вміст сірки, з огляду на те, що прихід її в піч може потребувати розвитку проміжної технологічної ланки – позапічної обробки чавуну з видаленням сірки. Збільшення ж кількості шлаку і підвищення його основності в доменній плавці при вдуванні великої кількості ПВП неможливо без порушення рівності ходу печі. Для попередження заростання фурм температура плавлення золи ПВП повинна бути не нижче 1400 °С.

При вдуванні великих кількостей вугільного пилу досягається, звісно, і значне зниження витрати коксу, однак, при цьому з'являється цілий ряд негативних явищ:

1. Зменшення товщини шару коксу при розподілі матеріалів на поверхні засипу погіршує газопроникність коксового вікна в зоні в'язко-пластичного стану;
2. Знижується газопроникність стовпа шихти в печі в цілому;
3. Збільшується час перебування коксу в робочому просторі печі, що призводить до руйнування коксу, накопичення його дрібних фракцій;
4. Збільшення кількості коксового дріб'язку і незгорілих частинок ПВП у металоприймачі печі, що призводить до погіршення дренажу шлаку;
5. Скорочується зона циркуляції коксу, що викликає погіршення ходу печі і сприяє розвитку периферійного газорозподілу;
6. Високе рудне навантаження обумовлює ущільнення стовпа шихти, що при зупинці печі ускладнює її наступний пуск;
7. Збільшується винос пилу і частка вуглецю в ній.

Труднощі в роботі печі, обумовлені застосуванням великих витрат пилу, створюють умови для зниження відносної продуктивності доменної печі. Основний вплив на зниження продуктивності надає вимушене зниження витрати кисню в дугті через різке зростання теоретичної температури горіння [9].

Таким чином, вдування ПВП в зарубіжній практиці вже при витратах 150–160 кг/т чавуну при стартовій задовільній якості залізовмісних матеріалів і коксу вимагало

раціонального підбору складу шихти, особливо частки окатишів підвищеної якості. При цьому з ростом частки окатишів в шихті і кількості незгорілих частинок ПВП зростає в'язкість кінцевого шлаку.

При постановці мети – забезпечити вдування великої кількості ПВП, практикою однозначно показано, що для цього необхідно виконати заходи щодо підвищення якості залізородних матеріалів і коксу. Необхідні сучасні якісні показники коксу і агломерату представлені в табл. 1.3 і 1.4.

Таблиця 1.3. Сучасні показники якості коксу, що забезпечують вдування в горн великих кількостей ПВП

Показники якості	Необхідний рівень
Показник міцності M25, %	≥ 87,0
Показник міцності M40, %	≥ 87,0
Показник стирання M10, %	≤ 5,5
Вміст фракції +80 мм, %	≤ 5,0
Вміст фракції –40 мм, %	≤ 10,0
Вологість, %	≤ 0,5
Міцність після обробки CO ₂ (стандарт ISO) CSR, %	≥ 67,0
Реакційна здатність по ГОСТ 10089-89, од.	18–20
Реакційна здатність по ISO CSI, %	23–26
Зольність, %	9–10

Виходячи із сучасних вимог доменної плавки, стабільність коксу повинна відповідати наступним показникам:

1. Міцність за діючим стандартом:
 - ✓ показник M25: ± 1,0 %;
 - ✓ показник M10: ± 0,5 %;
 - ✓ по залишку в барабані Сундгрена: ± 5,0 кг;
 - ✓ по провалу в барабані Сундгрена: ± 2,0 кг;
 - ✓ по гарячій міцності CSR: ± 1,0 %;
 - ✓ по реакційній здатності CRI: ± 1,0 %;
2. Вміст води: ± 0,2 %;
3. Вміст нелетючого вуглецю: ± 0,5 %;
4. Вміст сірки: ± 0,05 %;
5. Вміст летючих: ± 0,1 %;

6. Вміст в золі:

✓ Fe_xO_y	$\pm 0,2 \%$;
✓ O_2	$\pm 1,0 \%$;
✓ O_3	$\pm 0,5 \%$;
✓ CaO	$\pm 0,2 \%$;
✓ MgO	$\pm 0,1 \%$;
✓ S	$\pm 0,1 \%$.

Таблиця 1.4. Сучасні показники якості агломерату, що забезпечують вдування в горн великих кількостей ПВП

Показники якості	Необхідний рівень
Припустиме відхилення вмісту заліза від середнього, %	$\pm 0,5$
Допустиме відхилення від середнього по основності, од.	$\pm 0,05$
Допустиме відхилення від середнього вмісту FeO , %	$\pm 1,0$
Вміст фракції «-5» мм в скіповому агломераті	$\leq 5,0$
Вихід фракції «+5» мм при випробуваннях на міцність по ГОСТ 15137-77, %	$\geq 80,0$
Вихід фракції «+5» мм після відновлення по ГОСТ 19575-84, %	$\geq 50,0$
Вихід фракції «-0,5» мм при випробуваннях на стирання по ГОСТ 15137-77, %	$\leq 4,0$
Вихід фракції «-0,5» мм після відновлення по ГОСТ 19575-84, %	$\leq 5,0$
Перепад тиску газу в шарі при відновленні по ГОСТ 21707-76, Па (мм.вод.ст)	$\leq 147 (15)$

Практика експлуатації доменних печей з високою витратою ПВП показує, що максимальний ступінь спалювання частинок ПВП в окислювальній зоні забезпечується високою температурою дуття і раціональним співвідношенням вмісту O_2 в дутті і кількості палива по перерізу фурми або в окислювальній зоні, а також регулюванням витрати палива пропорційно витраті дуття на кожній фурмі. Велика роль в досягненні високого ступеня використання газу належить умовам і методам розподілу шихти [8, 53, 66].

1.3.1.1. Технічна характеристика марок кам'яного вугілля для виробництва ПВП в умовах України

При аналізі особливостей технології доменної плавки із застосуванням ПВП неодноразово підкреслювався значний вплив його якісних показників на економічну ефективність доменної плавки. До них, в першу чергу, слід віднести калорійність, вміст вуглецю, фізико-хімічні властивості мінеральної частини, а в останні 10 років і вміст летючих, окрім здатності і інтенсивності спучування вугільної частинки в зоні факела горіння. Причому, питанням вибору технологічних властивостей вугілля для виробництва ПВП у всіх періодах освоєння цієї технології, надавалося велике значення. Пошук найбільш придатних, по вище перерахованим показникам вугілля на території країн колишнього СРСР здійснюється на базі двох вугільних родовищ: Донбасу і Кузбасу. Найбільш інтенсивно ця робота велася в Україні. В результаті, до кінця ХХ століття було визначено доцільність залучення для виробництва ПВП вугілля марок *АСШ* (антрацитове вугілля), *ДГ* (довгополумєневе газове вугілля), *П* (пісне вугілля) [9]. Практика роботи доменних цехів Донецького металургійного заводу и комбінату «Запоріжсталь» показала, що найбільший ефект досягається при застосуванні ПВП з суміші такого вугілля. Розроблені в ІЧМ в період 1990–2010 рр. технологічні завдання для доменних печей комбінатів: «Запоріжсталь», «Дніпровський металургійний комбінат (ДМК)» (м. Кам'янське) і «Алчевський металургійний комбінат» були орієнтовані на суміші з вугілля *АСШ*, *ДГ*, *П*.

Технічний аналіз і робоча маса вугілля для приготування ПВП з вугілля Донбасу представлені в табл. 1.5 та 1.6. Вугілля таких марок постійно використовували в доменному цеху Донецького металургійного заводу. З використанням вугілля таких марок працював на першій стадії освоєння технології доменної плавки з застосуванням ПВП і доменний цех комбінату «Запоріжсталь» [4].

Практика використання цього вугілля показала ряд недоліків. Основними з них є:

- ✓ висока зольність (постійно вище 10 %);
- ✓ висока сірчистість – 1,5–2,0 %;

- ✓ знижена температура розм'якшення мінеральної частини, що призводить до постійного заростання повітряних фурм;
- ✓ підвищений розмір часток ПВП;
- ✓ підвищені витрати енергії під час помелу вугілля.

Таблиця 1.5. Технічний аналіз вугілля ПВП

Склад	Марки вугілля			
	<i>ДГ</i>	<i>П</i>	<i>АСШ</i>	Суміш
<i>Ad</i> , %	7,0–12,0	9,0–14,0	12,0	11,13
<i>Sdt</i> , %	1,6	2,0	2,0	1,89
<i>Vdaf</i> , %	40,0	12,0	3,5	16,07
<i>Wr</i> , %	11,0	10,0	11,0	10,67
<i>Sd</i> органічна, %	0,9	1,2	1,2	1,12
<i>Sd</i> колчеданна, %	0,7	0,8	0,8	0,77

Таблиця 1.6. Показники якості розрахункового складу ПВП (*ДГ* = 26,67 %; *П* = 33,33 %; *АСШ* = 40 %)

<i>Ср</i>	<i>Нр</i>	<i>Ор</i>	<i>Sp</i>	<i>Np</i>	<i>Ар</i>	<i>Wp</i>
84,10	0,66	1,01	1,89	0,26	11,01	1,07

Ці недоліки зумовили пошук вугілля з більш високими якісними показниками. Пошук перспективного вугілля для виробництва ПВП було розпочато ще в кінці 80-х років минулого століття. Спеціальною комісією Міністерства чорної металургії, перспективним вугіллям для виробництва ПВП були рекомендовані вугілля Бачатського і Краснобродського вугільних розрізів. Пізніше баланс вугілля для виробництва ПВП було розширено за рахунок ряду шахт.

В останні роки металургійні підприємства України: комбінати «ДМК», «Запоріжсталь» [4], «Єнакієвський металургійний завод» [8] і «Алчевський металургійний комбінат» використовують для виробництва ПВП марки вугілля *СС* (слабкоспікливе) Бачатського вугільного розрізу. Показники якості ПВП з суміші цього вугілля і вугілля Донбасу представлені в табл. 1.7.

З наведених даних видно, що вміст золи в робочій масі в вугіллі типу *СС* не перевищує 8,5% і відповідає нормам, прийнятим у світовій практиці. Крім того, з огляду на високий

вихід шлаку при роботі доменних печей на бідній залізорудній сировині, ці вугілля будуть позитивно впливати на газопрopusкнy здатність в нижній частині печі.

Таблиця 1.7. Показники якості ПВП

Види ПВП	W_p	C_p	H_p	O_p	N_p	S_p	A_p
100% <i>ССМСШ</i>	1,00	79,82	4,21	4,12	2,15	0,20	8,50
50% <i>ДГ</i> +30% <i>П</i> + +20% <i>АСШ</i>	1,00	78,50	4,25	2,74	1,33	1,58	10,6
27% <i>ДГ</i> +33% <i>П</i> + +40% <i>АСШ</i>	1,00	78,9	3,91	2,21	1,32	1,66	11,00

Великий позитивний вплив на формування рідких продуктів плавки має низький вміст в них сірки – 0,20%. Це дозволяє без особливого ризику зниження якості чавуну працювати з основністю шлаку 1,15–1,17 од. Вміст летючих речовин (газів) у вугіллі *ССМСШ* становить 22,1% і відповідає оптимальному рівню цього параметра. Такий рівень летючих речовин при наявності в робочій масі підвищених вмісту водню – 4,21% і кисню – 4,12% при вмісті азоту – 2,15% свідчить про підвищений їх пірофор (самозаймання), що повинно позитивно позначатися на повноті спалювання ПВП в фурменій зоні. Вміст вуглецю в робочій масі – 79,82% забезпечує високу теплотворну здатність (8401 ккал/кг).

Слід зазначити ще два важливих показники, що характеризують ці вугілля, таких як індекс помолоздатності по Хардгроув (*HGI*) і індекс вільного спучування (*FSI*).

Вугілля марки *ССМСШ* мають практично максимальний рівень помолоздатності, що в значній мірі підвищує тонину помолу і покращує умови експлуатації помольних засобів. Підвищення тонини помолу підвищує повноту спалювання частинок ПВП, що поряд з іншими факторами дозволяє збільшити витрату ПВП до 160 кг/т чавуну і ставити питання про можливість подальшого його збільшення до 170–180 кг/т чавуну.

Індекс вільного спучування вугільної частинки цієї марки вугілля значно менше, ніж для вугілля Донбасу, що покращує газодинаміку низу печі. Практика спалювання вугілля показує, що при переході на вугілля марки *ССМСШ*, в порівнянні з вугіллям *ДГ*, *АСШ* і *П* Донбасу, знижується

газонапруженість, головним чином, в нижній частині печі і усувається коксування ПВП в дуттьовому каналі повітряних фурм.

Таким чином, наведена аналітична оцінка особливостей технології доменної плавки з застосуванням ПВП, однозначно показує, що її застосування значно обмежує стійкість ходу доменних печей. В основному, це викликано посиленням газодинамічних умов роботи печей за рахунок значного зниження витрати коксу, а також погіршенням умов противоточної фільтрації газів і шихти в твердому і в'язкопластичному стані, досягнення високих техніко-економічних показників в таких умовах, в значній мірі, визначається дотриманням якості залізорудної сировини та коксу, умовами і методами розподілу шихтових матеріалів на колошнику доменної печі [9].

Виконаний аналіз досвіду діагностики і управління доменною плавкою показав актуальність виконання досліджень в цьому напрямку. У сучасних умовах виробництва чавуну в Україні при використанні в складі шихти матеріалів погіршеної якості, а також при відмові від природного газу і переході на технологію вдування пиловугільного палива необхідно як удосконалювати методи управління процесами, так і обґрунтовано використовувати інформацію сучасних засобів контролю для подальшого енергоефективного ведення технології.

ГЛАВА 2

ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКИ НА ПОЧАТКОВОМУ ЕТАПІ РОБОТИ ДОМЕННІЙ ПЕЧІ ПІСЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ, НЕОБХІДНІ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ОБҐРУНТОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ

2.1. Аналіз конструктивних особливостей завантажувального пристрою і розрахунок траєкторій руху шихтових матеріалів у колошниковому просторі доменної печі²

2.1.1. Загальні положення технології завантаження шихтових матеріалів в доменну піч з використанням БЗП

Обладнання системи завантаження в комплексі з системою автоматизованого управління завантаженням шихтових матеріалів в доменну піч має забезпечувати заданий радіальний і окружний розподіл шихтових матеріалів на колошнику з метою отримання мінімальної витрати палива на виплавку чавуну при заданому рівні виробництва в поточних шихтових умовах [10, 11].

Завантаження доменної печі здійснюється циклами. Цикл завантаження – систематично повторююча сукупність порцій матеріалів, що становлять доменну шихту, які завантажуються на колошник в певній послідовності і розподіляються по площі колошника за заданою програмою для забезпечення нормального протікання процесів доменної плавки по всьому перерізу печі. Порція являє собою масу шихтових матеріалів, що завантажується в доменну піч за один цикл роботи завантажувального пристрою, що включає завантаження заданих мас компонентів порції в бункер БЗП, шлюзування і вивантаження її на колошник. На доменних печах, оснащених БЗП, в остаточному вигляді порція формується в бункері завантажувального пристрою. Поняття

² Автори вдячні колегам ІЧМ НАНУ: с.н.с. М.Г. Іванчі та н.с. В.І. Вишнякову за участь у виконанні досліджень

«подача» при роботі з БЗП є в значній мірі умовним, оскільки в циклі завантаження можуть зустрічатися суміжні порції одного виду (наприклад, залізорудні або коксові), а також порції одного виду з повторюваним якісним, але кількісним складом компонентів, що відрізняється [26, 28, 29, 67–74].

Програма завантаження визначає вид порції (кокова, залізорудна, змішана), її якісний і кількісний склад, загальну масу, розподіл маси порції по кутовим положенням лотка під час вивантаження на поверхню засипу, які визначають відповідні траєкторії руху матеріалу в колошниковому просторі.

Склад і маса основних (робочих) порцій шихтових матеріалів, що входять до складу циклу завантаження, визначаються виходячи з умови забезпечення нормального теплового і шлакового режимів доменної плавки і отримання чавуну заданого складу. Додаткові порції включаються в програму завантаження при необхідності використання в циклі порцій шихти іншого хімічного або гранулометричного складу, основності і т.п., а також порцій спеціального призначення, наприклад, промивних або гарнісажеутворюючих. Допоміжні порції включають в себе шихту, необхідну для короточасних або періодичних впливів, наприклад, підвантаження (розвантаження) осьової (периферійної) зони, подачі певного матеріалу в задані кільцеві зони колошника, управління окружною нерівномірністю і т.п.

Значення робочих кутових положень лотка вибираються на підставі розрахунку траєкторій руху шихти в колошниковому просторі печі виходячи з умови перетину траєкторій центрів тяжіння потоків і середніх ліній рівних по площі кільцевих зон колошника. Кількість кільцевих зон, як правило, приймається рівним десяти, але це є умовним дотриманням, оскільки при малом діаметрі колошника кількість зон може бути прийнята меншою. Траєкторії руху потоків матеріалу і, відповідно, значення кутів нахилу лотка розраховуються для певних значень рівня засипу з заданим кроком. Тобто, конкретним значенням рівня засипу відповідає певний ряд значень кутів нахилу лотка [14, 15, 16, 75].

Розподіл рудного навантаження по радіусу колошника має формуватися в рамках циклу завантаження і змінюватися (в напрямку від осі до стінки печі) від величини 0,5–2,0 в

осьовій зоні печі до максимального значення 5,0–7,0 на відстані 0,8 радіусу колошника від осі з подальшим зменшенням в периферійній зоні на 10–20% від максимального значення [10].

Формування в осьовій зоні печі максимальної газопроникності зумовлює низьке рудне навантаження в цій зоні для утворення «осьової віддушини», тобто, заповнення її в основному коксом і частково залізорудними матеріалами [76]. Частково це досягається спрямованим завантаженням коксу в осьову зону: однієї–трьох порцій коксу в циклі або спрямованим вивантаженням частини порції коксу в перше–друге (іноді третє) положення лотка. Раціональна величина «осьової віддушини» визначається глибиною поширення зони горіння і іншими технологічними параметрами, зокрема, дуттєвим режимом [76].

При досить великій протяжності фурменого вогнища може знижуватися обробка газами периферійної зони, що має звичайно досить високе рудне навантаження. В цьому випадку потрібна інтенсифікація газового потоку на периферії біля стінки печі, тобто, утворення зони з декілька зниженням (щодо максимального по радіусу колошника) рудним навантаженням.

Основним прийомом розподілу шихтових матеріалів на колошнику є розподіл по масі. Розподіл по кільцях (або за часом) є резервним і має застосовуватися при можливих відмовах вагодозуючої системи [11].

2.1.2. Конструктивні особливості БЗП, встановленого на доменній печі після реконструкції

БЗП фірми «Paul Wurth», встановлене на ДП №3, по ряду основних параметрів і конструктивних особливостей не має аналогів в Україні, цей апарат являє собою одноконтурний БЗП, що передбачає можливість завантаження шихтових матеріалів з температурою до 400 °С. Коротка технічна характеристика БЗП приведена нижче.

2.1.2.1. Коротка технічна характеристика основних вузлів і механізмів БЗП

2.1.2.1.1. Приймальна воронка (корисний об'єм – 24 м³). Воронка футерована литими зносостійкими плитами. Основна частина приймальної воронки виконана у вигляді усіченої чотирикутної піраміди з мінімальним кутом нахилу стінки – 53°, максимальним – 59° (сторона похилого мосту). Двогранні кути приймальної воронки виконані округленими ($r = 550$ мм). Мінімальна відстань від гребеня шихтового матеріалу, сформованого після завантаження в воронку двох скіпів з кутом укошу матеріалу 40°, до нижньої точки верху похилого мосту становить ~ 590 мм. Діаметр випускного отвору приймальної воронки – 930 мм, площа випускного отвору – 0,679 м².

Час, за який порція коксу вивантажиться через випускний отвір приймальної воронки, може бути визначено за формулою:

$$t_{u \min} = \frac{2 \cdot V_{ck}}{k_m \cdot S_{овг}^{1,25} \cdot \sqrt{g}}$$

де V_{ck} – корисний об'єм скіпа, м³ ($V_{ck} = 11,5$ м³); k_m – коефіцієнт, що враховує фізико-механічні властивості шихтового матеріалу (для коксу – $k_m = 0,50$, для залізовмісних матеріалів – $k_m = 0,53$ за умови 70% агломерату і 30% окатишів в залізорудній частині шихти); $g = 9,81$ м/с²; $S_{овг}$ – площа випускного отвору приймальної воронки, м².

Розрахункова тривалість вивантаження порції коксу з приймальної воронки з повністю відкритим випускним отвором в бункер БЗП становить – 24 с, що узгоджується з проектним значенням, зазначеним на циклограмі, представленої фірмою «Paul Wurth».

2.1.2.1.2. Верхній шихтовий затвор встановлений на випускному отворі приймальної воронки. Час відкривання і закривання – 3 с. Привід верхнього шихтового затвора – гідравлічний.

2.1.2.1.3. Верхній газозушільнювальний клапан. Клапан тарельчатого типу встановлений у верхній частині бункера БЗП. Призначений для сполучення бункера з атмосферою при

завантаженні шихти, ізолювання бункера від атмосфери під час вивантаження шихти в доменну піч. Діаметр отвори, яке перекривається – 1100 мм. Верхній газоушільнювальний клапан має два робочих положення (відкритий, закритий) здійснює двоходовий рух (поворот + притиск). Операція відкривання складається з розблокування і повороту (тривалість, відповідно, 2 с і 3 с), операція закривання – з повороту і блокування (тривалість, відповідно, 3 с і 2 с). Поворотний привід верхнього газоушільнювального клапану – гідравлічний.

2.1.2.1.4. Бункер БЗП (шихтовий бункер) призначений для шлюзування, зважування та дозування шихти при завантаженні її в піч. Корисний об'єм – 24 м³. Нижня конічна частина бункера футерована литими зносостійкими плитами. Кут нахилу твірної конічної частини бункера виконаний під кутом 55° до горизонталі, що перевищує кути внутрішнього тертя шихтових матеріалів, які використовуються в доменній плавці.

Бункер встановлений на трьох тензовимірювальних опорах і не має інших жорстких зв'язків з металлоконструкціями колошника. Додатково бункер обладнаний акустичним датчиком. Акустичний датчик застосовується для контролю руху шихти. Аналоговий сигнал акустичного датчика надходить в PLC БЗП, де порівнюється з програмними граничними значеннями для різних матеріалів.

2.1.2.1.5. Шихтовий затвор (нижній шихтовий затвор), що складається з двох секторних заслінок, призначений для закривання випускного отвору і регулювання витрати при витіканні шихтових матеріалів з бункера. Положення шихтового затвора задається одним лінійним датчиком з дозволом 0,1°. Максимальна швидкість відкривання – 15 °/с, знижена швидкість – 2 °/с для забезпечення заданої точності позиціонування. Величина відкривання шихтового затвора визначається системою управління за допомогою спеціального алгоритму з використанням його видаткової характеристики. При отриманні сигналу «Бункер порожній» затвор, перед тим як закритися, повністю відкривається.

Тривалість відкривання шихтового затвора на заданий кут ~ 3 с, тривалість закривання ~ 7 с (тривалість повного відкривання 2 с + пауза у відкритому положенні 2 с + тривалість закривання 3 с).

2.1.2.1.6. Нижній газозушільнювальний клапан розташований у вузлі нижнього клапану і шихтового затвора. Клапан призначений для ізолювання шихтового бункера від доменної печі при заповненні бункера шихтою. Має два робочих положення: відкритий і закритий. Відкривання включає розблокування і поворот (тривалість, відповідно, 2 с і 3 с), закривання – поворот і блокування (тривалість, відповідно, 3 с і 2 с). Поворотний привід газозушільнювального клапану – гідравлічний.

2.1.2.1.7. Засувка відсічна листова призначена для повного відділення обладнання тракту БЗП, розміщеного вище засувки, від робочого простору печі в період ремонтів. Засувка встановлена нижче вузла нижнього клапану і шихтового затвора над редуктором. Управління засувкою – місцеве.

2.1.2.1.8. Розподільчий лоток призначений для забезпечення заданого радіального і окружного розподілу шихтових матеріалів по площі колошника (рис. 2.1). Приводи зміни кута нахилу і обертання забезпечують:

- номінальну швидкість обертання – 8 об/хв;
- регулювання швидкості обертання в межах + 20%, –80% по відношенню до номінального значення;
- швидкість зміни кута нахилу лотка – 1,6°/с;
- точність позиціонування кута нахилу $\pm 0,2^\circ$;
- зміна кута нахилу лотка в межах $21^\circ - 47^\circ$ щодо вертикалі.

Розподільчий лоток являє собою жолоб трапецієподібного перерізу довжиною 3,0 м з закритим торцем завантажувального кінця лотка (розрахункова, умовно активна довжина лотка становить 3,5 м). На розвантажувальному торці лотка встановлена поперечна стяжка шириною 200 мм і товщиною 40 мм для посилення жорсткості лотка і компенсації тиску шихти на його стінку. Розвантажувальна частина лотка на довжині 850 мм має піднесення борту, призначене для запобігання перекидання шихти через борт лотка при високій витраті. Робоча поверхня лотка, по якій рухається шихта, складається з двох рівних за довжиною (1,5 м) ділянок. Перша (завантажувальна) ділянка футерована ребристо-клітинною футерівкою (нижня частина ребриста, бічні частини клітинні) для зменшення впливу ударів і тертя шихти при падінні на лоток. Друга (розвантажувальна) ділянка футерована гладкими плитами.



Рис. 2.1. Розподільчий лоток БЗП ДП №3

2.1.2.1.9. Привід зміни кута нахилу і позиціонування лотка. Передбачається 12 фіксованих кутових положень лотка, з яких 11-е положення призначене для завантаження шихтових матеріалів безпосередньо до стінки колошника, а 0-е – в приосьову зону доменної печі.

Швидкість зміни кута нахилу складає $\sim 1,6$ °/с. Переміщення лотка обмежується трьома кулачковими кінцевими вимикачами з нормально закритими контактами. Один контакт використовується для обмеження нижньої межі нахилу лотка, що становить 21° . Інший контакт використовується для обмеження верхньої межі 47° . Третій контакт призначений для демонтажу лотка в режимі місцевого управління в положення з кутом нахилу 70° .

2.1.2.1.10. Привід обертання лотка. Швидкість обертання лотка 8 об/хв. Як правило, для зменшення навантажень на привід, обертання лотка здійснюється безперервно. Для обертання лотка використовується двошвидкісний електродвигун. Поточне робоче положення лотка по окружності обертання визначається датчиком кутового положення. Основне призначення датчика кутового положення – видача сигналу на початок вивантаження шихти в піч. Для забезпечення рівномірного зносу лотка і забезпечення рівномірного окружного розподілу шихтових матеріалів напрямком обертання лотка змінюють після відпрацювання заданої кількості порцій в циклі завантаження.

2.1.2.2. Допоміжні механізми

2.1.2.2.1. Клапан скидання тиску забезпечує скидання тиску у шихтовому бункері до атмосферного. Зниження тиску в бункері до атмосферного необхідно для запобігання зносу запилених газом сідел верхнього газоуцільнювального клапану при його відкриванні та можливих «ударів» газу. Має два робочих положення: відкритий і закритий. Тривалість відкривання і закривання – 4 с. Витримка у відкритому положенні – 4 с.

На циклограмі роботи обладнання системи завантаження фірми «Paul Wurth» цикл роботи клапану скидання тиску (відкритий–пауза–закритий) реалізується послідовно після операції закривання газоутилізаційного клапану перед відкриванням верхнього газоуцільнювального клапану. Практика експлуатації БЗП показує, що для збільшення пропускної здатності системи завантаження доцільно поєднати закривання клапану скидання тиску з закриванням верхнього шихтового затвору (затвору приймальної воронки). В цьому випадку, час, необхідний для закривання клапану не збільшує тривалість циклу.

2.1.2.2.2. Газоутилізаційний клапан призначений для скидання пічного газу в мережу напівчистого доменного газу. Має два робочих положення: відкритий і закритий. Тривалість відкривання і закривання клапану – 4 с. Витримка в відкритому положенні – 4 с.

2.1.2.2.3. Клапан первинного вирівнювання тиску призначений для нагнітання тиску в шихтовому бункері за

допомогою напівчистого доменного газу. Має два робочих положення: відкритий і закритий. Тривалість відкривання і закривання клапану – 4 с. Витримка в відкритому положенні – 2 с.

2.1.2.2.4. Клапан вторинного вирівнювання тиску забезпечує додаткову подачу азоту в шихтовий бункер перед і під час вивантаження порцій шихтових матеріалів. Має два робочих положення: відкритий і закритий. Тривалість відкривання і закривання – 2 с. Витримка в відкритому положенні, протягом якого тиск в бункері вирівнюється з пічним – 2 с.

Слід зазначити, що вибір завантажувального пристрою, його конструктивне компонування і проектні параметри роботи відповідають проектним показникам роботи ДП №3 для сучасних вимог технології доменної плавки.

Прийняті корисні об'єми приймальної воронки і бункера БЗП (24,0 м³), що декілька перевищують корисний об'єм двох скипів ($2 \times 11,5 \text{ м}^3 = 23,0 \text{ м}^3$), в поєднанні з проектними параметрами роботи механізмів БЗП, в цілому, забезпечують достатній рівень пропускної здатності системи завантаження у нормальному режимі і режимі «догонка міри». У системах завантаження такого типу – зі скиповою доставкою шихти на колошник і одноконтурним БЗП – визначальне значення для забезпечення необхідного рівня пропускної здатності мають абсолютне значення корисного об'єму бункера БЗП, приймальні воронки і їх відповідність об'ємам коксової і залізорудної частин подачі. У даному випадку, ця умова витримана, тому пропускна здатність системи завантаження буде визначатися фактичною тривалістю більш тривалого з двох циклів – циклу роботи шихтоподачі і циклу роботи БЗП. За умови, що тривалість зазначених циклів буде відповідати зазначеній в технічній документації базового інжинірингу фірми «Paul Wurth» величині 348 с, максимальна пропускна здатність системи завантаження (в режимі «догонка міри») буде дорівнювати 9,5 подач на годину. Номінальна пропускна здатність системи завантаження з урахуванням коефіцієнта завантаженості обладнання $k_z = 0,7$, яку система завантаження може стабільно забезпечувати протягом тривалого періоду, складе 6,65 подач на годину. Тобто, для досягнення проектної продуктивності печі 3500 т чавуну на добу при роботі на агломераті зі вмістом заліза 54,5% без

використання окатишів буде потрібно збільшення маси залізорудної частини подачі до максимальних значень – 39,5–40,0 т. При необхідності зменшення маси подачі проектна продуктивність доменної печі може досягатися шляхом реалізації наявного резерву пропускної здатності (5,0–6,0%) за рахунок зменшення тривалості вивантаження порцій до рівня ~ 60 с (при цьому тривалість циклів роботи шихтоподачі і роботи БЗП становитиме 320–330 с). При зменшенні маси подачі до рівня 35,0 т виробництво чавуну в кількості 3500 т на добу може забезпечуватися за рахунок зниження фактичного резерву пропускної здатності нижче нормативного значення або за рахунок збільшення вмісту заліза в шихті.

2.1.3. Розрахунок траєкторій руху шихтових матеріалів в колошниковому просторі доменної печі

Розрахунок раціонального складу і правильний вибір режиму завантаження задувочної шихти є факторами, які в значній мірі визначають успішну задувку і роботу доменної печі в роздувочний період [16, 77, 78].

При розробці програми завантаження шихти першого об'єму, слід враховувати, що при завантаженні нижніх горизонтів печі необхідно запобігти пошкодженню футерівки шахти, розпару, заплечиків і фурм завантажувальним матеріалом і, в міру можливості, мінімізувати подрібнення шихтових матеріалів. Крім того, при завантаженні шихти, що містить поряд з коксом шлак і залізорудні матеріали, слід забезпечити необхідний розподіл компонентів по перерізу печі. Очевидно, що для правильного вибору кутових положень лотка, які будуть використані при завантаженні задувочної шихти на різні горизонти печі, необхідно уточнене визначення траєкторій руху шихтових матеріалів після сходу з розподільного лотка по всій висоті робочого простору доменної печі [10, 11, 16, 77, 78].

Рух потоку матеріалу, як правило, характеризується траєкторією руху центральної частині потоку шихтових матеріалів. При розробці програм завантаження доменних печей, оснащених БЗП, горизонтальний переріз колошника розбивається, як правило, на 10 рівних по площі кільцевих зон відповідно до кількості основних робочих кутових положень

лотка (за винятком налагоджувальних положень і положень, призначених для вивантаження шихтових матеріалів безпосередньо під стінку і в вісь печі). Раціональні значення кутів нахилу лотка в робочих кутових положеннях повинні забезпечувати перетин траєкторії центру потоку шихти з середньою лінією відповідної кільцевої зони колошника. Слід врахувати, що зі зміною рівня засипу, координати точок перетину траєкторій падіння потоків шихти з поверхнею засипу також змінюються. У зв'язку з цим, в сучасних системах управління БЗП матриці завдання кутів нахилу лотка передбачають можливість завдання індивідуального ряду значень кутів для різних рівнів засипу, що задаються за кроком 0,10–0,25 м. Зміна реалізованого ряду кутів нахилу лотка здійснюється в автоматичному режимі при зміні завдання рівня засипу. Розрахунок траєкторій руху шихти в робочому просторі ДП №3 і кутів нахилу лотка БЗП виконувався для діапазону зміни рівня засипу 0,0–5,0 м з кроком 0,1 м.

У табл. 2.1 наведені радіуси середніх ліній десяти рівнів за площею кільцевих зон колошника і шахти, а також відстані від осі до стінки печі для значень рівня засипу 0,0–5,0 м з кроком 0,1 м. Розрахунок траєкторій руху центрів тяжіння потоків шихти в робочому просторі печі здійснювався за допомогою уточненої математичної моделі ІЧМ. Результати розрахунку дозволили визначити робочі значення кутів нахилу лотка для завантаження десяти кільцевих зон колошника і двох додаткових кутових положень для завантаження шихтових матеріалів безпосередньо під стінку і в вісь печі. Результати розрахунку представлені в табл. 2.2 і на рис. 2.2–2.5.

Для завантаження задувочної шихти визначені кути нахилу лотка, при використанні яких центри траєкторій потоків перетинаються з контуром внутрішнього профілю печі на різних рівнях засипу (рис. 2.6). На рис. 2.6 показані результати розрахунку траєкторій, виконаного для значень кутів нахилу розподільчого лотка, відповідних завантаженню шихти на рівень засипу 5,0 м.

Слід зазначити, що кут нахилу лотка 47° достатній для завантаження десятої кільцевої зони колошника починаючи з рівня засипу 1,6 м (табл. 2.2), в той час як практика завантаження доменних печей із зіставними з ДП №3

конструктивними параметрами колошника показує, що в більшості випадків робочий діапазон зміни рівня засипу при стабільній роботі печі в нормальному режимі обмежується інтервалом 1,0–1,5 м.

Таблиця 2.1. Середні радіуси кільцевих зон колошника і шахти ДП №3 на різних рівнях засипу

Рівень засипу, м	№ кільцевої зони колошника											
	Стінка печі	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Вісь печі
	№ кутового положення лотка											
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0÷2,3	3,60	3,51	3,32	3,12	2,90	2,67	2,41	2,12	1,79	1,37	0,57	0,00
	Середній радіус кільцевої зони шахти, м											
2,4	3,61	3,52	3,33	3,13	2,91	2,68	2,42	2,13	1,80	1,38	0,57	0,00
2,5	3,62	3,53	3,34	3,14	2,92	2,68	2,43	2,14	1,80	1,38	0,57	0,00
2,6	3,63	3,54	3,35	3,15	2,93	2,69	2,43	2,14	1,81	1,39	0,58	0,00
2,7	3,65	3,55	3,36	3,16	2,94	2,70	2,44	2,15	1,81	1,39	0,58	0,00
2,8	3,66	3,56	3,37	3,17	2,95	2,71	2,45	2,16	1,82	1,40	0,58	0,00
2,9	3,67	3,57	3,38	3,18	2,96	2,72	2,46	2,16	1,83	1,40	0,58	0,00
3,0	3,68	3,59	3,39	3,19	2,96	2,73	2,46	2,17	1,83	1,40	0,58	0,00
3,1	3,69	3,60	3,40	3,19	2,97	2,73	2,47	2,18	1,84	1,41	0,58	0,00
3,2	3,70	3,61	3,41	3,20	2,98	2,74	2,48	2,18	1,84	1,41	0,59	0,00
3,3	3,71	3,62	3,42	3,21	2,99	2,75	2,49	2,19	1,85	1,42	0,59	0,00
3,4	3,73	3,63	3,43	3,22	3,00	2,76	2,50	2,20	1,85	1,42	0,59	0,00
3,5	3,74	3,64	3,44	3,23	3,01	2,77	2,50	2,21	1,86	1,43	0,59	0,00
3,6	3,75	3,65	3,45	3,24	3,02	2,78	2,51	2,21	1,86	1,43	0,59	0,00
3,7	3,76	3,66	3,46	3,25	3,03	2,79	2,52	2,22	1,87	1,44	0,59	0,00
3,8	3,77	3,67	3,47	3,26	3,04	2,79	2,53	2,23	1,88	1,44	0,60	0,00
3,9	3,78	3,68	3,49	3,27	3,05	2,80	2,53	2,23	1,88	1,44	0,60	0,00
4,0	3,79	3,70	3,50	3,28	3,06	2,81	2,54	2,24	1,89	1,45	0,60	0,00
4,1	3,80	3,71	3,51	3,29	3,07	2,82	2,55	2,25	1,89	1,45	0,60	0,00
4,2	3,82	3,72	3,52	3,30	3,07	2,83	2,56	2,25	1,90	1,46	0,60	0,00
4,3	3,83	3,73	3,53	3,31	3,08	2,84	2,56	2,26	1,90	1,46	0,61	0,00
4,4	3,84	3,74	3,54	3,32	3,09	2,84	2,57	2,27	1,91	1,47	0,61	0,00
4,5	3,85	3,75	3,55	3,33	3,10	2,85	2,58	2,27	1,92	1,47	0,61	0,00
4,6	3,86	3,76	3,56	3,34	3,11	2,86	2,59	2,28	1,92	1,47	0,61	0,00
4,7	3,87	3,77	3,57	3,35	3,12	2,87	2,59	2,29	1,93	1,48	0,61	0,00
4,8	3,88	3,78	3,58	3,36	3,13	2,88	2,60	2,29	1,93	1,48	0,61	0,00
4,9	3,90	3,80	3,59	3,37	3,14	2,89	2,61	2,30	1,94	1,49	0,62	0,00
5,0	3,91	3,81	3,60	3,38	3,15	2,89	2,62	2,31	1,94	1,49	0,62	0,00

Розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в робочому просторі ДП №3 і відповідні їм кути нахилу лотка БЗП були використані для вибору режимів завантаження задувочної шихти першого об'єму.

Таблиця 2.2. Значення кутів нахилу лотка БЗП ДП №3 для різних рівнів засипу ⁽¹⁾ і ⁽²⁾ – значення, які не можуть бути реалізовані через наявні обмеження фірми "Paul Wurth" діапазону зміни кутів нахилу лоткового розподільника – 21,2–47,0 °)

Рівень засипу, м	№ кільцевої зони колошника											
	Стінка печі	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Вісь печі
	Середній радіус кільцевої зони колошника, м											
	3,60	3,51	3,32	3,12	2,90	2,67	2,41	2,12	1,79	1,37	0,57	0,0
	№ кутового положення лотка											
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0,0	Кут нахилу лотка, град											
	¹⁾ 47,0	47,0	47,0	47,0	47,0	44,8	41,7	38,3	34,4	30,5	22,6	²⁾ 21,2
0,1	47,0	47,0	47,0	47,0	47,0	44,2	41,1	37,8	33,9	30,1	22,2	21,2
0,2	47,0	47,0	47,0	47,0	46,5	43,6	40,5	37,3	33,5	29,7	22,1	21,2
0,3	47,0	47,0	47,0	47,0	45,9	43,1	40,0	36,8	33,1	29,3	22,0	21,2
0,4	47,0	47,0	47,0	47,0	45,4	42,5	39,5	36,4	32,7	28,9	21,9	21,2
0,5	47,0	47,0	47,0	47,0	44,9	42,0	39,0	35,1	32,3	28,6	21,8	21,2
0,6	47,0	47,0	47,0	46,9	44,3	41,5	38,5	34,7	32,0	28,2	21,7	21,2
0,7	47,0	47,0	47,0	46,4	43,8	41,0	38,1	34,4	31,6	27,9	21,6	21,2
0,8	47,0	47,0	47,0	45,9	43,3	40,5	37,7	34,0	31,3	27,5	21,5	21,2
0,9	47,0	47,0	47,0	45,4	42,8	40,0	37,2	33,7	31,0	27,2	21,4	21,2
1,0	47,0	47,0	47,0	45,0	42,3	39,6	36,9	33,4	30,6	26,9	21,3	21,2
1,1	47,0	47,0	46,9	44,5	41,9	39,1	36,5	33,0	30,3	26,6	21,2	21,2
1,2	47,0	47,0	46,4	44,0	41,4	38,7	36,1	32,7	30,0	26,2	21,2	21,2
1,3	47,0	47,0	46,0	43,6	40,9	38,3	34,6	32,4	29,7	25,9	21,2	21,2
1,4	47,0	47,0	45,5	43,1	40,5	37,9	34,3	32,1	29,4	25,6	21,2	21,2
1,5	47,0	47,0	45,1	42,6	40,1	37,6	34,0	31,8	29,1	25,4	21,2	21,2
1,6	47,0	46,9	44,7	42,2	39,7	37,2	33,7	31,6	28,9	25,1	21,2	21,2
1,7	47,0	46,5	44,2	41,8	39,3	36,9	33,5	31,3	28,6	24,8	21,2	21,2
1,8	47,0	46,1	43,8	41,4	38,9	36,6	33,2	31,0	28,3	24,5	21,2	21,2
1,9	46,7	45,7	43,4	40,9	38,5	34,8	32,9	30,8	28,1	24,3	21,2	21,2
2,0	46,3	45,2	43,0	40,5	38,2	34,5	32,7	30,5	27,8	24,0	21,2	21,2
2,1	45,9	44,8	42,5	40,1	37,9	34,3	32,4	30,2	27,5	23,7	21,2	21,2
2,2	45,5	44,4	42,2	39,8	37,5	34,0	32,2	30,0	27,3	23,5	21,2	21,2
2,3	45,1	44,0	41,8	39,4	37,2	33,7	31,9	29,8	27,0	23,2	21,2	21,2
2,4	44,9	43,8	41,5	39,2	37,0	33,6	31,7	29,6	26,8	23,0	21,2	21,2
2,5	44,6	43,5	41,2	39,0	36,8	33,4	31,5	29,4	26,7	22,9	21,2	21,2
2,6	44,4	43,3	41,0	38,7	36,6	33,2	31,4	29,2	26,5	22,8	21,2	21,2
2,7	44,2	43,0	40,7	38,5	36,4	33,0	31,2	29,0	26,3	22,6	21,2	21,2
2,8	43,9	42,8	40,5	38,3	34,5	32,9	31,0	28,9	26,1	22,5	21,2	21,2
2,9	43,7	42,6	40,3	38,1	34,3	32,7	30,9	28,7	25,9	22,3	21,2	21,2
3,0	43,5	42,3	40,0	37,9	34,2	32,5	30,7	28,5	25,7	22,1	21,2	21,2
3,1	43,2	42,1	39,8	37,7	34,0	32,4	30,5	28,4	25,6	22,0	21,2	21,2
3,2	43,0	41,9	39,6	37,5	33,8	32,2	30,4	28,2	25,4	22,0	21,2	21,2
3,3	42,7	41,7	39,4	37,3	33,7	32,1	30,2	28,1	25,2	22,0	21,2	21,2
3,4	42,6	41,4	39,2	37,2	33,5	31,9	30,1	27,9	25,1	22,0	21,2	21,2
3,5	42,4	41,2	39,0	37,0	33,4	31,8	29,9	27,7	24,9	21,9	21,2	21,2
3,6	42,2	41,0	38,8	36,8	33,3	31,6	29,8	27,6	24,7	21,9	21,2	21,2
3,7	42,0	40,8	38,7	36,7	33,1	31,5	29,7	27,5	24,6	21,9	21,2	21,2
3,8	41,8	40,6	38,5	36,5	33,0	31,4	29,5	27,3	24,4	21,8	21,2	21,2
3,9	41,6	40,4	38,3	36,4	32,9	31,2	29,4	27,2	24,3	21,8	21,2	21,2
4,0	41,4	40,2	38,2	36,2	32,7	31,1	29,3	27,0	24,1	21,8	21,2	21,2
4,1	41,2	40,1	38,0	36,1	32,6	31,0	29,1	26,9	24,0	21,8	21,2	21,2
4,2	41,0	39,9	37,9	33,9	32,5	30,8	29,0	26,7	23,8	21,7	21,2	21,2
4,3	40,8	39,7	37,7	33,8	32,4	30,7	28,9	26,6	23,7	21,7	21,2	21,2
4,4	40,6	39,6	37,6	33,7	32,2	30,6	28,7	26,5	23,5	21,7	21,2	21,2
4,5	40,5	39,4	37,4	33,6	32,1	30,5	28,6	26,3	23,4	21,7	21,2	21,2
4,6	40,3	39,2	37,3	33,5	32,0	30,4	28,5	26,2	23,2	21,6	21,2	21,2
4,7	40,1	39,1	37,1	33,3	31,9	30,3	28,4	26,1	23,1	21,6	21,2	21,2
4,8	40,0	38,9	37,0	33,2	31,8	30,2	28,3	26,0	23,0	21,6	21,2	21,2
4,9	39,8	38,8	36,9	33,1	31,7	30,0	28,2	25,8	22,9	21,6	21,2	21,2
5,0	39,7	38,7	36,8	33,0	31,6	29,9	28,0	25,7	22,8	21,6	21,2	21,2

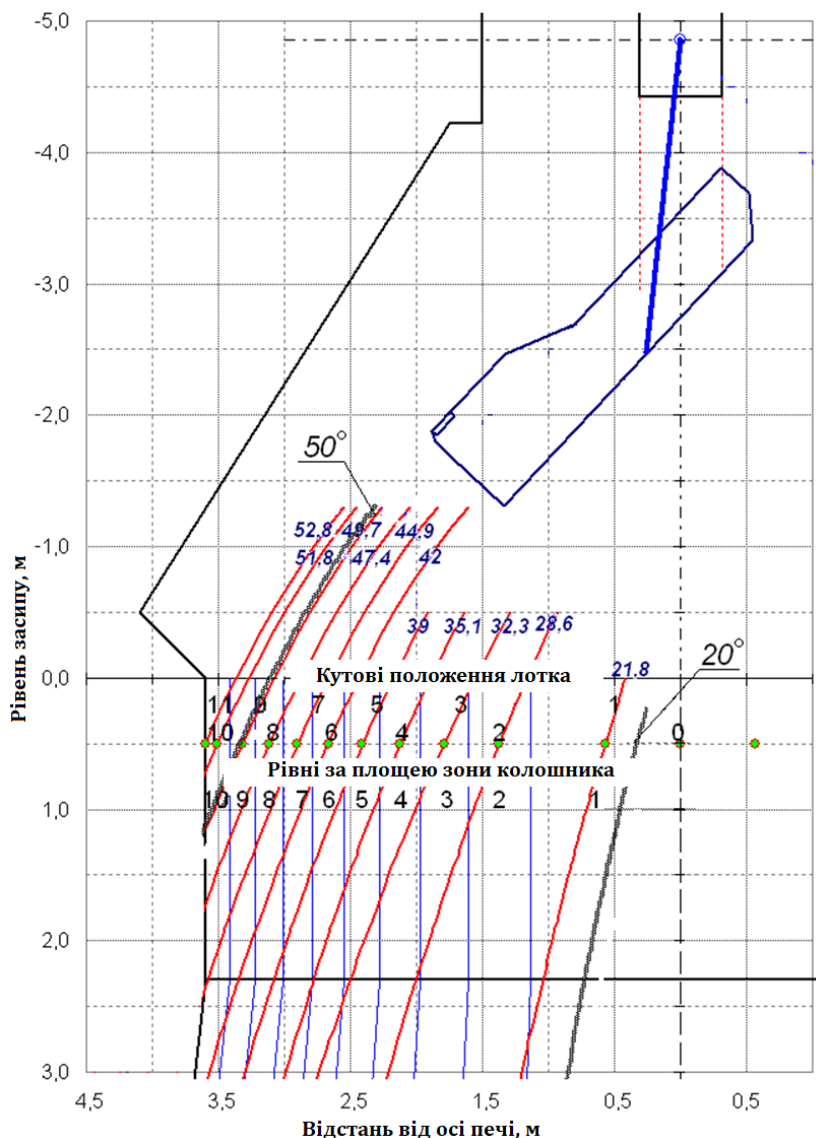


Рис. 2.2. Розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в колошниковому просторі ДП №3 після сходу з розподільчого лотка під час вивантаження на рівень засипу 0,5 м (при куті нахилу лотка 17,5° потік матеріалу не торкається лотка, траєкторію не відображено)

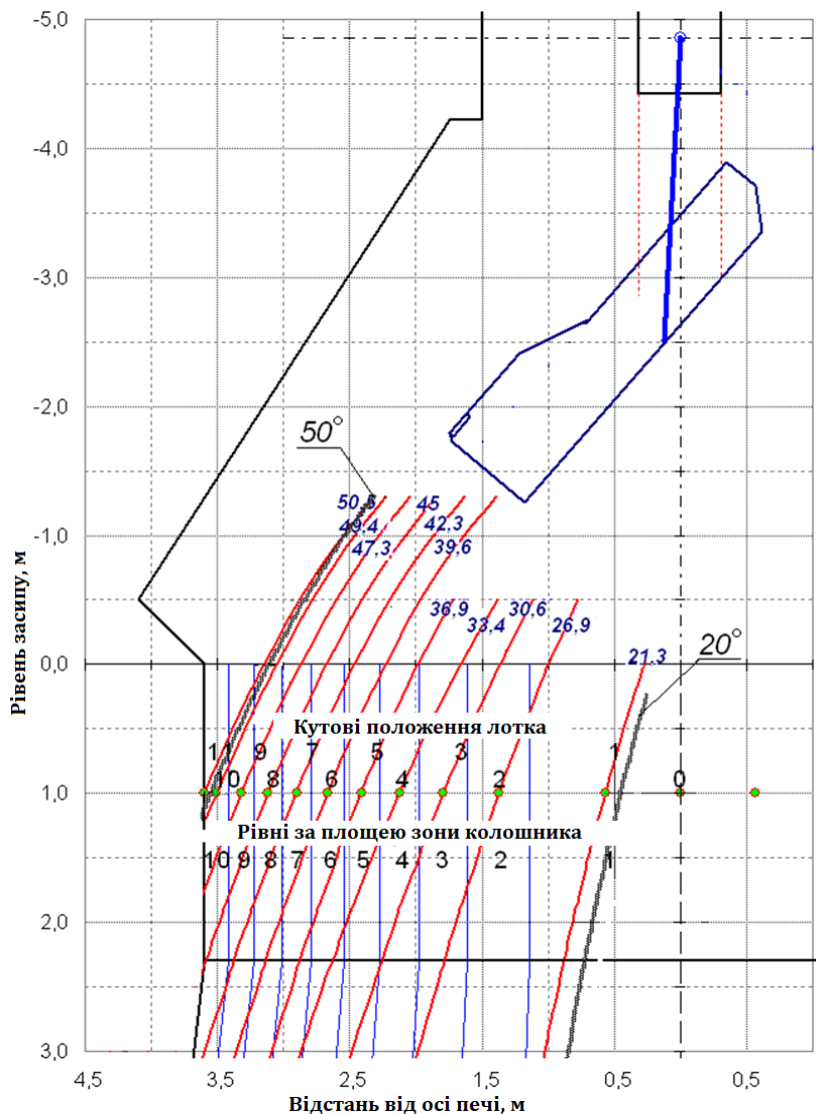


Рис. 2.3. Розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в колошниковому просторі ДП №3 після сходу з розподільчого лотка під час вивантаження на рівень засипу 1,0 м (при куті нахилу лотка 17,5° потік матеріалу не торкається лотка, траєкторію не відображено)

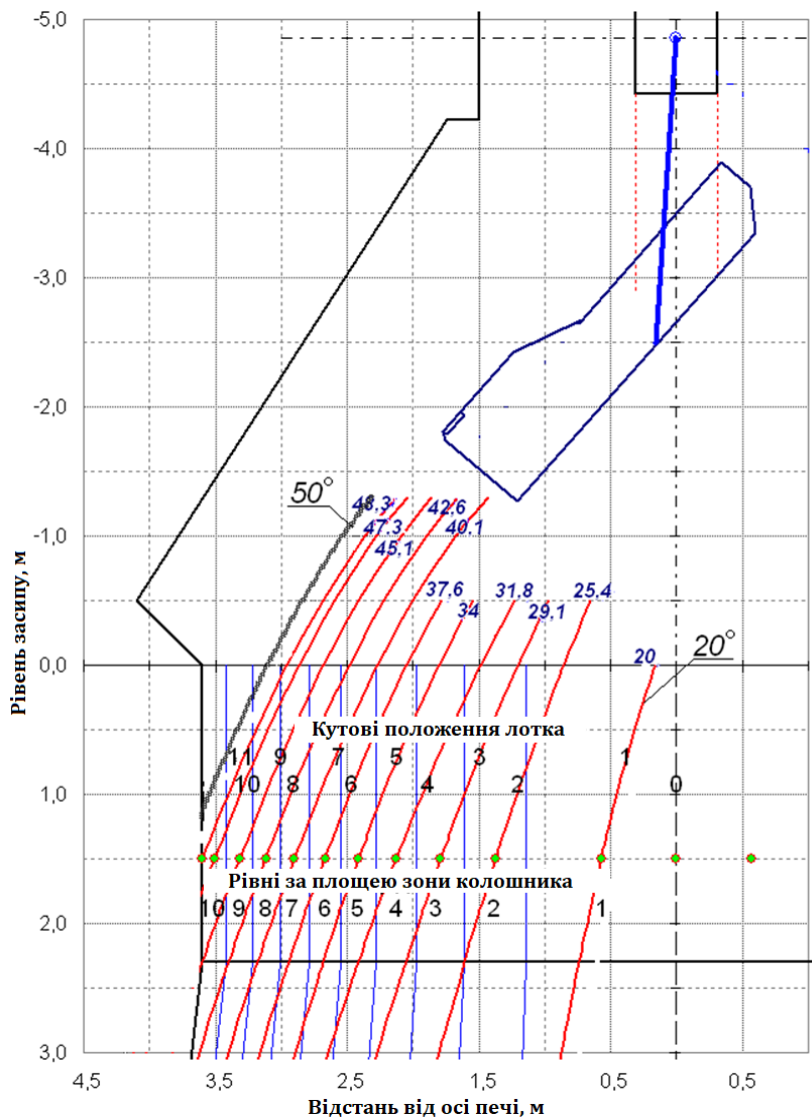


Рис. 2.4. Розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в колошниковому просторі ДП №3 після сходу з розподільчого лотка під час вивантаження на рівень засипу 1,5 м (при куті нахилу лотка 17,5° потік матеріалу не торкається лотка, траєкторію не відображено)

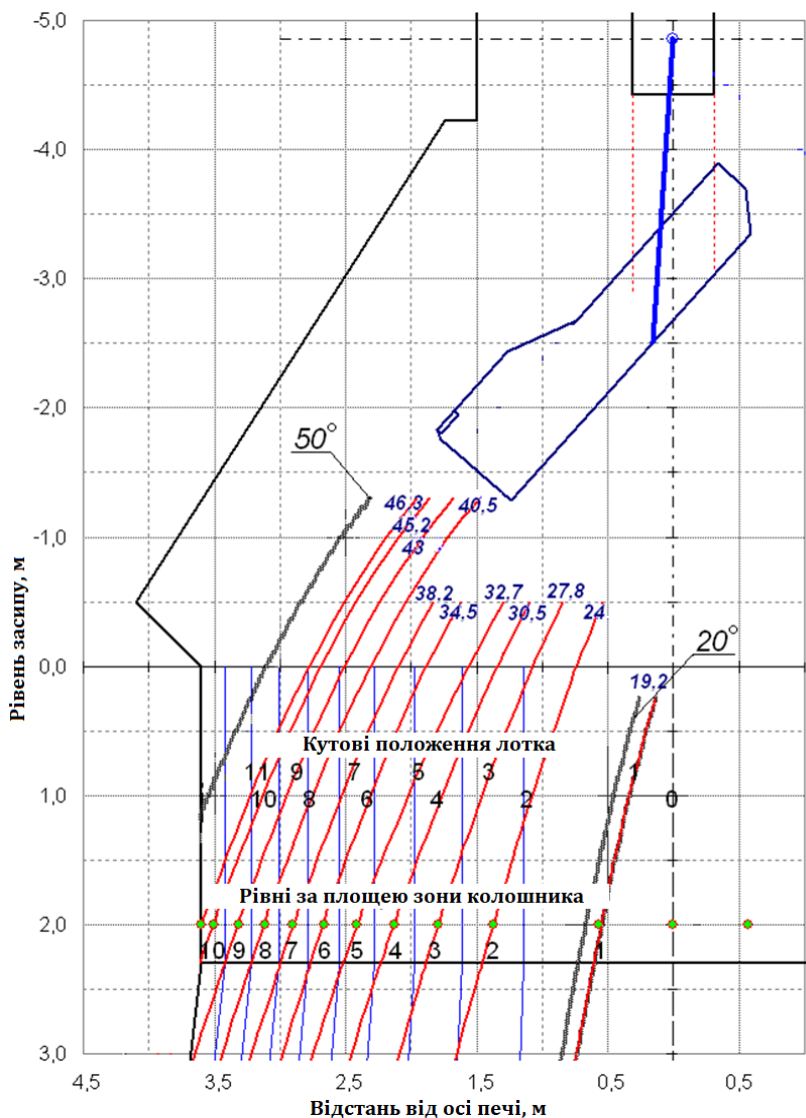


Рис. 2.5. Розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в колошниковому просторі ДП №3 після сходу з розподільчого лотка під час вивантаження на рівень засипу 2,0 м (при куті нахилу лотка 17,5° потік матеріалу не торкається лотка, траєкторію не відображено)

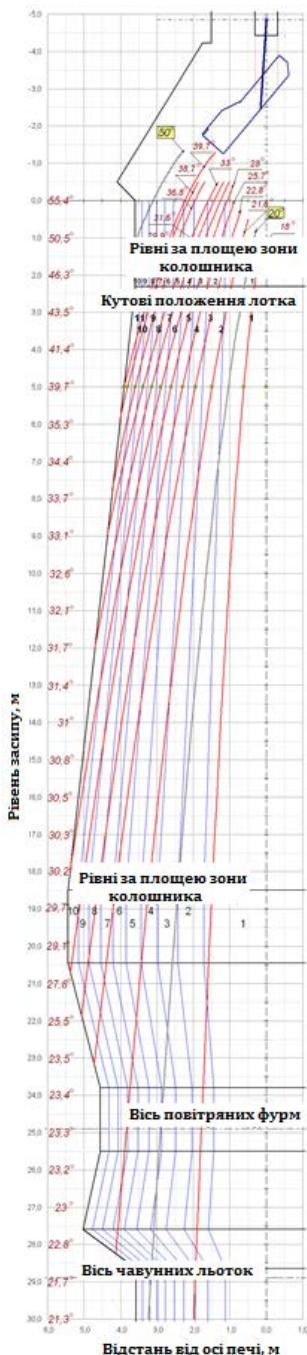


Рис. 2.6. Розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в робочому просторі ДП №3 після сходу з розподільчого лотка під час вивантаження з заданим рівнем засипу 5,0 м (при куті нахилу лотка $17,5^\circ$ потік матеріалу не торкається лотка, траєкторію не відображено)

2.2. Розробка технологічних вимог щодо формування задувочної шихти доменної печі після реконструкції³

2.2.1. Загальні положення

Досягнення високих техніко-економічних показників роботи доменної печі і тривалість її кампанії значною мірою визначаються технологічним і організаційним рівнями задувочного і роздувочного періодів. Підготовка до задувки і технологічні положення, які використовуються при задувці, включають наступне:

- вибір шихтових матеріалів на період задувки і роздувки печі;
- технологічно обґрунтований розрахунок задувочної шихти, в якому повинні враховуватися раціональний розвиток процесів плавки і забезпечення теплотреб на отримання заданого складу першого чавуну і шлаку, нагрів холодної футерівки печі і компенсацію зовнішніх теплових втрат;
- раціональне розміщення шихтових матеріалів по висоті і перерізу доменної печі при завантаженні, що враховує особливості розвитку газодинаміки і температурно-теплових процесів в цьому періоді;
- вибір ефективних прийомів для рівномірного прогріву футерівки печі по всій її висоті;
- реалізацію сталого газодинамічного режиму, відповідно до заданого графіка задувки і роздувки печі;
- забезпечення надходження достатньої кількості тепла в горн за рахунок сталої роботи фурменної зони і акумуляції тепла в шахті печі, головним чином, шлакоутворюючими і залізовмісними матеріалами;
- формування зони первинного шлакоутворення і кінцевих продуктів плавки – чавуну і шлаку з температурою, що забезпечує їм необхідні фізичні властивості;

³ Автори вдячні с.н.с. М.М. Можаренко за участь у виконанні досліджень

- своєчасний випуск першого чавуну і шлаку з температурою, що забезпечує їх нормальну плинність і хімічний склад.

Перед задувкою печі виконується комплекс технологічних досліджень і розробок за вибором раціонального складу шихтових матеріалів, величини рудного навантаження, визначення кількості і складу задувочних шихт і порядку їх розміщення по висоті і перерізу робочого об'єму доменної печі, за визначенням складу дослідних подач, розробці регламенту робіт по задувці і графіка задувки печі з визначенням послідовності зміни основних газодинамічних параметрів.

2.2.2. Технологічні вимоги до шихтових матеріалів при задувці доменної печі

При підготовці до задувки доменної печі важливе значення має вибір шихтових матеріалів і технологічне обґрунтування вихідних положень при виконанні розрахунку задувочних шихт (загальне рудне навантаження на всю задувочную шихту, основність шлаку, розміщення задувочних шихт по висоті і перерізу робочого простору печі). В останні 25–30 років основними компонентами задувочної шихти є: агломерат; залізна руда (кварцити); конвертерний шлак (підготовлений); окатиші (для досліджень). Для збільшення кількості шлаку у задувочній шихті, а іноді і в перших робочих шихтах застосовують, як наповнювач, щебінку, отриману з доменних шлаків. Для ослаблення впливу теплового удару на футерівку металоприймача (лещадь і нижній горн) використовують шлакопемзу або шлакову щебінку.

Як зазначалося вище, при визначенні складу задувочної шихти слід виходити з необхідності забезпечення не тільки отримання чавуну і шлаку заданих складів і властивостей, але і забезпечення теплотреб процесів плавки, компенсації тепловтрат на нагрів шихти, холодної футерівки і зовнішніх втрат системи охолодження і поверхні кожуха доменної печі.

На підставі вищевикладеного технологічні вимоги до задувочних шихт при пуску доменних печей можна узагальнити в наступному вигляді:

- забезпечення надходження загальної достатньої кількості тепла (особливо в горн), компенсуючого його початковий дефіцит, для прогріву шихтових матеріалів, футерівки горна, заплечиків і шахти печі, для розвитку процесів формування рідких продуктів плавки з фізичними властивостями, що забезпечують їх стійкий дренаж в шарі коксу і видачу першого чавуну;
- мінімізація агресивності продуктів плавки по відношенню до футерівки низу шахти, заплечиків і горна печі за рахунок раціонального рівня вмісту FeO в первинному шлаку до 22%;
- введення до складу шихти кількості коксу, що забезпечує вміст вуглецю в чавуні на рівні не нижче 3,5% (в цьому випадку, навіть при низькій температурі чавуну, виключається розчинення вуглецю футерівки, що зменшує миючу здатність чавуну);
- склад шихти повинен забезпечити отримання рідкорухомих стійких кінцевих шлаків з нормальними фізико-хімічними властивостями і мінімальними витратами тепла на шлакоутворення, для чого до складу задувочної шихти першого об'єму вводиться шлаковий щебінь.

Для задувочної шихти ДП №3 на підставі досвіду задувки інших печей цеху технологіями доменного цеху було запропоновано в якості основного залізовмісного матеріалу використовувати агломерат з низьким вмістом заліза 47,0–48,0 % і основністю CaO/SiO_2 – 0,995 од. У поєднанні з залізною рудою і конвертерним шлаком такий агломерат дозволяє отримати кінцевий шлак з основністю в інтервалі 1,00–1,05 од.

Основні переваги такого підходу до формування складу задувочної шихти полягають в наступному.

1. Практичний досвід персоналу доменного цеху в застосуванні технології задувки доменних печей на шихті з використанням агломерату з низьким вмістом заліза.

2. Основна кількість шлакоутворюючих компонентів міститься в агломераті, що значно знижує тепловтрати на формування кінцевого шлаку, і покращує газопрopusкнy здатність нижньої частини печі.

До недоліків зазначеного формування задувочної шихти слід віднести необхідність виробництва агломерату

некондиційної якості, що створює певні труднощі в управлінні виробництвом агломерату та й доменним цехом. Крім того, цей варіант важкореалізований в умовах незадовільного стану обладнання аглофабрики, оскільки велика кількість шлакоутворюючих компонентів в складі такого агломерату зумовить наявність в готовому агломераті негабаритних шматків розміром більше 300–450 мм, що буде перешкоджати нормальній роботі БЗП. Додаткове дроблення в умовах заводу реалізувати неможливо через відсутність дробильних установок.

При розрахунку задувочної шихти, як правило, приймається, що основність кінцевого шлаку CaO/SiO_2 задувочної шихти першого об'єму залежить від рівня масового вмісту кремнію в чавуні і повинна змінюватися для умов доменного цеху в інтервалі 0,95–1,05 од. Величина рудного навантаження визначається з урахуванням досвіду задувок різних доменних печей.

В результаті виконаного аналізу сировинних і паливних умов задувки ДП №3 було прийняте рудне навантаження: агломерат – кокс – 0,429 т/т коксу, агломерат + конвертерний шлак – кокс – 0,574 т/т коксу і агломерат + конвертерний шлак (перерахований на еквівалент агломерату) – кокс – 0,487 т/т коксу. Такий рівень рудного навантаження гарантує стійкий тепловий стан печі в цілому, зокрема, нижньої частини печі, при наявності значного надлишкового теплового резерву. Запропонований варіант, враховуючи темп роздувки, характерний для умов доменного цеху, дозволяє отримати високий хімічний нагрів з вмістом кремнію значно вище 3,5% і фізичний нагрів з температурами на перших випусках більше 1430 °С.

Досвід задувок доменних печей протягом останніх 15–20 років показує, що наявність у роздувочній шихті в основному коксу середньої якості місцевого виробництва і деякої кількості (25–30% привізного високоякісного коксу (Алтайського КХЗ, РФ) і «Преміум» (Авдіївка, Україна) дозволяє без ускладнень проводити задувку печей при рудному навантаженні 0,55–0,70 т/т коксу з достатнім тепловим резервом і отриманням близького до розрахункового вмісту кремнію (3,0–4,0%) в чавуні.

Практика задувок доменних печей показує, що склад шлаку задувочної шихти повинен бути близьким до складу

шлаку, характерного для нормального режиму роботи доменних печей в умовах плавки, що склалися. Підвищений вміст глинозему в шлаках перших шихт сприяє на цьому етапі утворенню захисного шлакового шару на відкритій футерівці низу печі, який грає роль гарнісажу.

Нааявний досвід задувок доменних печей в різних сировинних і технологічних умовах дозволяє узагальнити отримані практичні результати формування задувочної шихти в наступному вигляді.

1. Для забезпечення щадного режиму роботи доменної печі і збереження термомеханічних властивостей футерівки шахти і горна, задувочна шихта, як правило, розраховується на виплавку чавуну з вмістом кремнію від 2,0 до 4,0%.

2. Рациональний рівень виходу шлаку для забезпечення сталого теплового стану металоприймача в період пуску повинен становити 0,85–1,00 т/т чавуну. В якості флюсоутворюючого матеріалу в задувочній шихті доцільно використовувати конвертерний шлак. В якості наповнювача використовується щебінь із доменного шлаку.

3. Середнє рудне навантаження по всьому об'єму задувочної шихти задається в інтервалі 0,55–0,70 т/т чавуну. Послідовність розташування задувочних шихт по висоті доменної печі повинна забезпечувати поступове збільшення рудного навантаження в міру заповнення робочого простору печі задувочною шихтою (до 2,0–2,5 т/т в останній шихті першого об'єму).

4. При розробці програми завантаження задувочної шихти послідовність розміщення компонентів шихти по висоті печі задається з урахуванням того, що шихтові матеріали, що вимагають високого рівня теплової та відновлювальної обробки, розташовуються у верхній половині шахти.

5. Після сушіння печі для забезпечення рівномірного нагріву і виключення теплового «удару» при приході до горна металошлакового розплаву футерівка лещаді покривається шаром шлакового щебеню або шлакопемзою. Використання шлакопемзи краще. При задувці доменних печей великого об'єму для надійного прогріву нижнього горна і лещаді рекомендується укладання дров'яної кліті в зумпфі і металоприймачі з деревини або відпрацьованих залізнодорожних шпал. В окремих випадках, перед завантаженням задувочної шихти, в якості захисного

матеріалу, доцільно завантажити на дно лещаді титановмісний матеріал шаром висотою 0,30–0,35 м.

6. Завантаження шлакоутворюючих матеріалів повинне починатися не раніше досягнення завантаженою шихтою рівня 8,0 м від осі повітряних фурм. Залізорудні матеріали завантажуються при досягненні рівня завантаження шихти в печі не менше 11,0–15,0 м від рівня повітряних фурм залежно від об'єму печі. Для умов задувки ДП №3 це обмеження становить 12,0–14,0 м.

7. Програма завантаження задувочної шихти повинна забезпечити сталий розвиток центрального газового потоку, що, в свою чергу, забезпечить нормальний прогрів стовпа шихти і створить умови для формування необхідного температурно-теплового стану в периферійній зоні (температура газів на периферії не повинна перевищувати 650–750 °С).

8. Основним залізорудним матеріалом в складі задувочної шихти є агломерат. Для запобігання підвищеного утворення коксового дріб'язку при завантаженні в задувочній шихті і забезпечення необхідного теплового режиму в робочому просторі печі необхідно в задувочній шихті і перших робочих шихтах використовувати кокс підвищеної міцності.

2.3. Розробка програми завантаження задувочної шихти

2.3.1. Склад і характеристики задувочної шихти ДП №3

Задувочна шихта ДП №3 була розрахована для двох варіантів вибору застосовуваного агломерату. Перший варіант включав кокс, агломерат Маріупольського металургійного комбінату ім. Ілліча (ММКІ) (вміст заліза – 53,22 %), конвертерний шлак і окатиші в заключних дослідних подачах. Другий варіант включав кокс, агломерат ПГЗК (вміст заліза – 54,54 %), конвертерний шлак, залізну руду і окатиші в заключних дослідних подачах. Хімічний склад шихтових матеріалів і склад чавуну для першого і другого варіантів задувочної шихти наведені в табл. 2.3 і 2.4. При цьому в

першому варіанті задувочної шихти вихід шлаку з основністю 1,040 од. склав 1096 кг/т чавуну. У другому варіанті вихід шлаку склав 1042 кг/т чавуну з основністю 1,037 од.

Фактична задувочна шихта складалася з коксу класу «Преміум» Авдіївського коксо-хімічного заводу, агломерату ПГЗК і ММКІ, окатишів Північного ГЗК і добавок у вигляді конвертерного шлаку і запорізької залізної руди.

Перед завантаженням печі в горні був встановлений металевий поміст масою 9,97 т, а простір між керамічним стаканом і помостом заповнювався шпалами (рис. 2.7). Для захисту повітряних фурм в периферійній частині горна колоди укладалися похило під кутом 62° з утворенням над фурмами «навісу» (рис. 2.7). Для збільшення швидкості витікання дуття на задувці перед завантаженням задувочної шихти повітряні фурми були обладнані керамічними вставками.

Таблиця 2.3. Хімічний склад шихтових матеріалів задувочної шихти

Шихтові матеріали	<i>Fe</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	$\frac{CaO}{SiO_2}$	$\gamma, \text{т/м}^3$
Агломерат ПГЗК	54,54	9,26	0,97	12,04	0,74	1,30	1,90
Агломерат ММКІ	53,22	10,06	1,12	12,19	1,43	1,21	1,83
Окатиші ПівнГЗК	62,24	6,75	1,14	2,71	0,32	0,40	2,11
Залізна руда	48,50	28,00	0,80	0,90	0,60	0,03	1,70
Конвертерний шлак	20,42	16,52	1,96	44,28	7,82	2,68	1,56
Зола коксу	10,06	45,04	32,17	0,55	0,84	0,01	

γ – насипна маса шихтового матеріалу, т/м^3 .

Таблиця 2.4. Хімічний склад чавуну (розрахунковий), %.

<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>C</i>	<i>Fe</i>
3,5	0,70	0,03	0,2	3,5	92,07

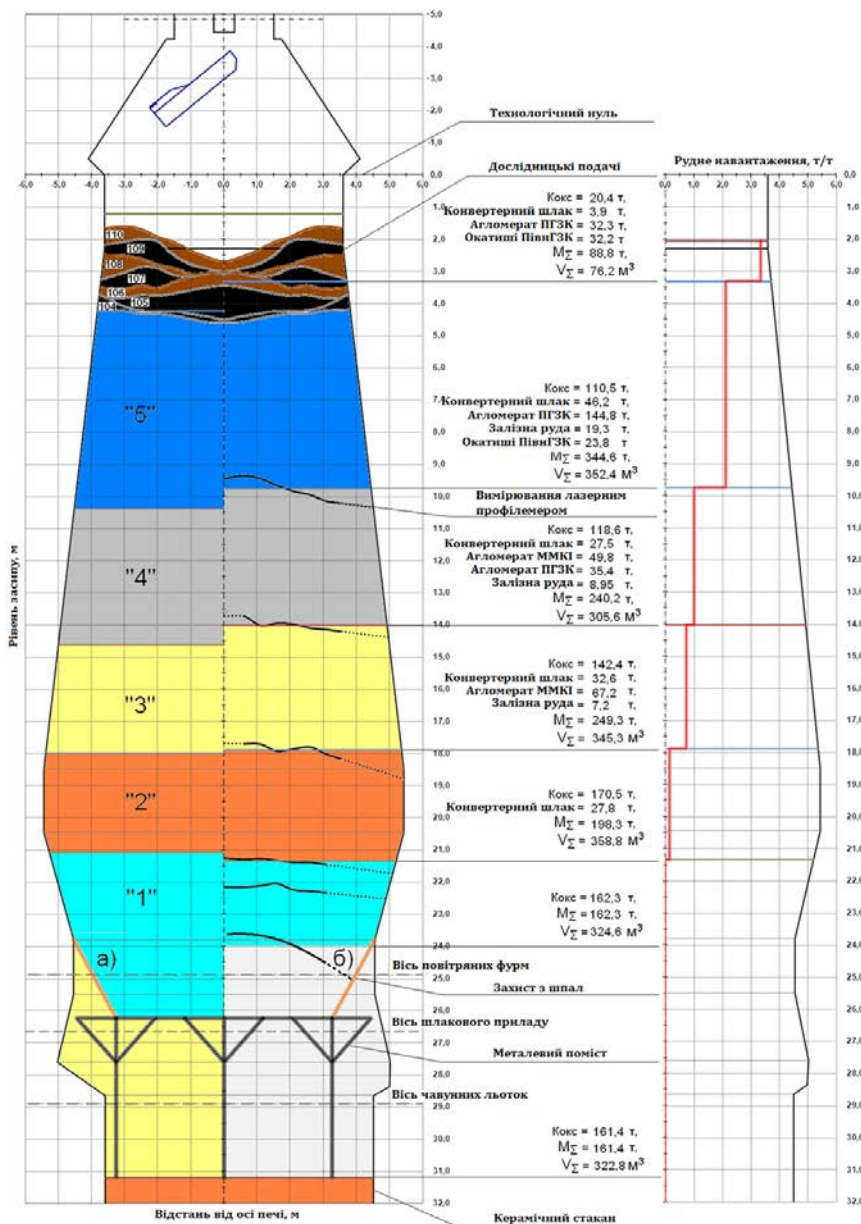


Рис. 2.7. Схема розташування розрахункової (а) і завантаженої (б) задувочних шихт в ДП №3, жовтень 2011 р.

У період завантаження шихтових матеріалів в піч для кожної з задувочних шихт використовувалися кутові положення лотка БЗП, що забезпечують мінімізацію руйнівного впливу потоків шихти на бетонне покриття шахти і нижньої частини печі, а також організацію осьового газового потоку в печі.

У зв'язку з проведенням в період завантаження налагодження системи автоматичного управління завантаженням шихтових матеріалів в піч, завантаження її перед задувкою здійснювалось як в автоматичному, так і в ручному режимі (управління газозушільнювальними клапанами, ступенем відкривання шихтового затвора бункера БЗП, завдання кутів нахилу, швидкості і напряму обертання лоткового розподільника шихти).

Внаслідок зменшеної в порівнянні з розрахунковим кількості укладених на днище печі шпал і відсутності шпал на металевому помості у задувочну шихту «0» був введений кокс в кількості 161,4 т (рис. 2.7), вивантажуваний у кутовому положенні лотка – 21,0°.

Для коригування програми завантаження задувочної шихти і відповідності фактично завантажуваної шихти розрахунковим її параметрам, здійснювався контроль рівня і профілю поверхні засипу шихти після завантаження кожної шихти лазерним рівнеміром, через монтажний люк на колошнику (рис. 2.7).

У піч було завантажено 110 порцій. Сумарні об'єм і маса шихтових матеріалів 6 шихт склали 2085,7 м³ і 1444,9 т. Фактичне загальне рудне навантаження у завантаженій задувочній шихті склало 0,631 т/т коксу. Розрахункове та фактичне розташування задувочної шихти показано на рис. 2.7. Порівняльна оцінка складів розрахункової і завантаженої задувочних шихт показала, що розподіл маси, об'ємів компонентів і рудних навантажень в розрахунковій і фактично завантаженій задувочних шихтах, в цілому, відповідали технологічному завданню.

2.4. Дослідження параметрів потоку шихтових матеріалів і їх розподілу на колошнику доменної печі перед її задувкою⁴

Важливим напрямком підвищення ефективності роботи доменних печей є раціональне використання технологічних можливостей системи завантаження шляхом вдосконалення прийомів розподілу шихтових матеріалів в печі в комплексі з вибором раціональних параметрів дуттєвого і газодинамічного режимів плавки [10, 11]. Для управління формуванням порцій шихтових матеріалів, завантаження і розподілу їх в печі необхідна достовірні інформація про характер руху матеріалів по тракту завантажувального пристрою і розподілу їх на поверхні засипу шихти. Такі дані можуть бути отримані при проведенні передпускових досліджень роботи механізмів шихтоподачі і БЗП, розподілу шихтових матеріалів на колошнику [79–82].

Співробітниками ІЧМ при безпосередній участі авторів книги спільно з представниками заводу були виконані дослідження розподілу шихти першого об'єму в ДП №3 перед її задувкою [52, 83], а також дослідження зміни параметрів завантаження, дуттєвого режиму і газорозподілу в періоди задувки і виходу печі на робочі показники. Використання отриманої інформації для вдосконалення режиму завантаження печі шихтових матеріалів, підвищення ступеня використання теплової та відновлювальної енергії пічних газів в комплексі з виконаними в період ремонту заходами по реконструкції вогнетривкого керамічного стакану горна і лещаді, підвищення стійкості футерівки металоприймача дозволяє збільшити тривалість кампанії печі до 15 років.

Перед задувкою ДП №3 були виконані наступні дослідження:

- визначення витратних характеристик шихтового затвору (ШЗ) бункера БЗП;
- визначення траєкторій руху шихтових матеріалів в колошниковому просторі доменної печі і реалізація в АСУ кутів нахилу лотка БЗП;

⁴ Автори вдячні колегам ІЧМ НАНУ: с.н.с. М.Г. Іванчі, н.с. В.І. Вишнякову та м.н.с. О.В. Наследову за участь у виконанні досліджень

- вимірювання рівня і поверхні засипу шихтових матеріалів після їх завантаження в піч;
- дослідження параметрів потоку шихтових матеріалів і дослідження розподілу компонентів порцій суміші агломерату та окатишів по радіусу колошника.

2.4.1. Визначення витратних характеристик шихтового затвору бункера БЗП

У період виконання досліджень визначені первинні витратні характеристики шихтового затвору БЗП при вивантаженні залізорудних матеріалів і коксу. Результати досліджень наведені на рис. 2.8. Досить високі значення коефіцієнтів достовірності апроксимації (для залізорудних матеріалів $R_{x,y} = 0,940$, для коксу $R_{x,y} = 0,871$) показують, що залежності об'ємної витрати шихтових матеріалів від ступеня відкривання шихтового затвору можуть бути використані в програмному забезпеченні АСУ для автоматизованого управління вивантаженням порцій шихти. Слід зазначити, що отримані залежності вимагають уточнення в процесі експлуатації печі, що передбачається проектними алгоритмами системи управління. На початковому етапі роздувки печі було рекомендовано час вивантаження порцій шихти з БЗП підтримувати для залізорудних матеріалів на рівні – 80 с, для коксу – 90 с. При цьому під час досліджень, указаним значенням часу вивантаження відповідали наступні значення ступеня відкривання шихтового затвору: для залізорудних матеріалів – 33%, для коксу – 40%. Через місяць після задувки печі в зв'язку з необхідністю забезпечення пропускну здатності системи шихтоподачі на рівні 8 подач на годину (при роботі з рудним навантаженням 3,95 т/т) було рекомендовано зменшити час вивантаження залізорудних матеріалів до 70 с і коксу – до 80 с, що відповідало ступеню відкривання шихтового затвору 37% для залізорудних матеріалів і 44% для коксу.

Як показує досвід освоєння доменних печей, обладнаних БЗП, збільшення часу вивантаження порцій шихтових матеріалів сприяє раціональному розподілу матеріалів по радіусу і окружності колошника і має бути максимально можливим для умов необхідної інтенсивності плавки, що визначає швидкість сходу шихти і темп

завантаження печі [84]. Час вивантаження порцій шихти задається відповідно до витратної характеристики шихтового затвору БЗП, яка визначається за результатами передпускових досліджень.

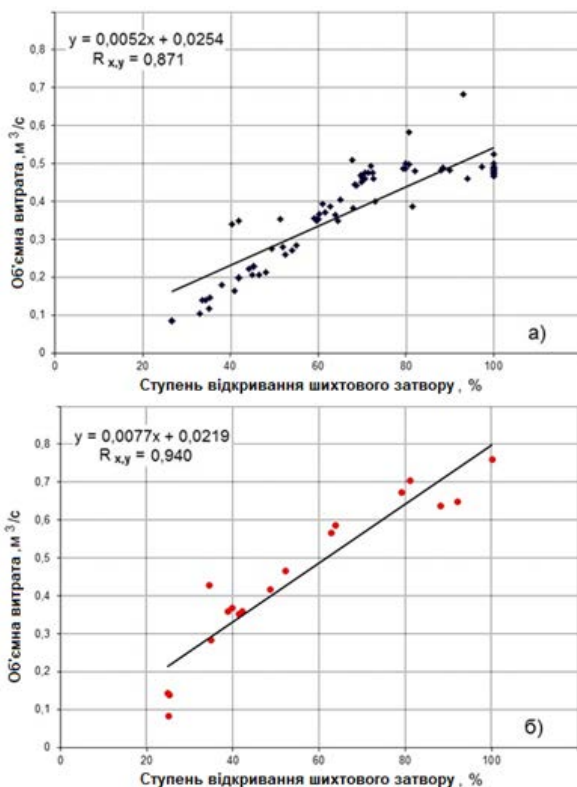


Рис. 2.8. Залежності об'ємної витрати від ступеня відкриття шихтового затвору для коксу (а) і залізрудних матеріалів (б) під час вивантаження з бункера БЗП

Можливий діапазон регулювання об'ємної витрати шихтових матеріалів при забезпеченні достатньої точності розподілу їх на колошнику для умов ДП №3 становить: для коксу – $0,124\text{--}0,337 \text{ м}^3/\text{с}$ та $0,160\text{--}0,337 \text{ м}^3/\text{с}$ – для залізовмісних матеріалів. Величина об'ємної витрати – $0,337 \text{ м}^3/\text{с}$ достатня для забезпечення максимальної пропускної

здатності системи завантаження в режимі «догонка міри». Менші значення об'ємних витрат можуть задаватися в тих випадках, коли в циклі завантаження порцій є резерв часу для збільшення тривалості вивантаження порцій. Нижня межа зазначеного вище діапазону значень об'ємних витрат ($0,124 \text{ м}^3/\text{с}$ – для коксу і $0,160 \text{ м}^3/\text{с}$ – для залізовмісних матеріалів) встановлена, виходячи з експериментально визначених умов «костріння» шихтових матеріалів.

Час вивантаження порцій шихти ($\tau_{\text{вив}}$) визначається в залежності від об'єму порції ($V, \text{м}^3$) і заданої об'ємної витрати ($Q, \text{м}^3/\text{с}$) відповідно до виразу: $\tau_{\text{вив}} = \frac{V, \text{м}^3}{Q, \text{м}^3/\text{с}}, \text{с}$. При цьому для коректного визначення об'єму порції необхідна інформація про фактичну насипну масу кожного з компонентів шихтових матеріалів.

Для оцінки пересипання шихтових матеріалів при ударі об торцеву стяжку і через борт лотка ($L=3,0 \text{ м}$) при вивантаженні в піч, виконувалося, передбачене програмою досліджень, спостереження за рухом шихтових матеріалів по розподільчому лотку при обертанні його по ходу і проти ходу годинникової стрілки і різного ступеня відкривання ($\alpha_{\text{шз}}$) шихтового затвора. Дослідження показали, що в діапазоні зміни ступеня відкривання шихтового затвора від 22% до 100% і кута нахилу лотка від 22° до 49° пересипання матеріалів через борт лотка не відзначено. В якості ілюстрації цього на рис. 2.9 показане вивантаження порції коксу масою 10,6 т при $\alpha_{\text{шз}} = 72\%$.

2.4.2. Визначення меж і траєкторій потоку шихтових матеріалів по висоті і перерізу печі. Вибір робочих значень кутових положень лотка БЗП

Розрахунок раціонального складу і правильний вибір режиму завантаження задувочної шихти є факторами, які в значній мірі визначають успішні задувку і роботу доменної печі до виходу на планові показники [77]. При розробці програми завантаження шихти першого об'єму, слід враховувати, що при завантаженні нижніх горизонтів печі необхідно запобігти пошкодженню футерівки шахти, розпару, заплечиків і повітряних фурм вивантажувальним матеріалом і,

в міру можливості, мінімізувати подрібнення шихтових матеріалів. Крім того, при завантаженні шихти, що містить поряд з коксом шлак і залізорудні матеріали, слід забезпечити необхідний розподіл компонентів по перерізу печі. Очевидно, що для правильного вибору кутових положень лотка, які використовуються при завантаженні задувочної шихти на різні горизонти печі, необхідне уточнення розрахункових траєкторій руху шихтових матеріалів після сходу з розподільчого лотка по всій висоті робочого простору доменної печі [10, 11, 77].



Рис. 2.9. Вивантаження порції коксу масою 10,6 т, $\alpha_{из} = 72\%$, кут нахилу лотка $28,2^\circ$

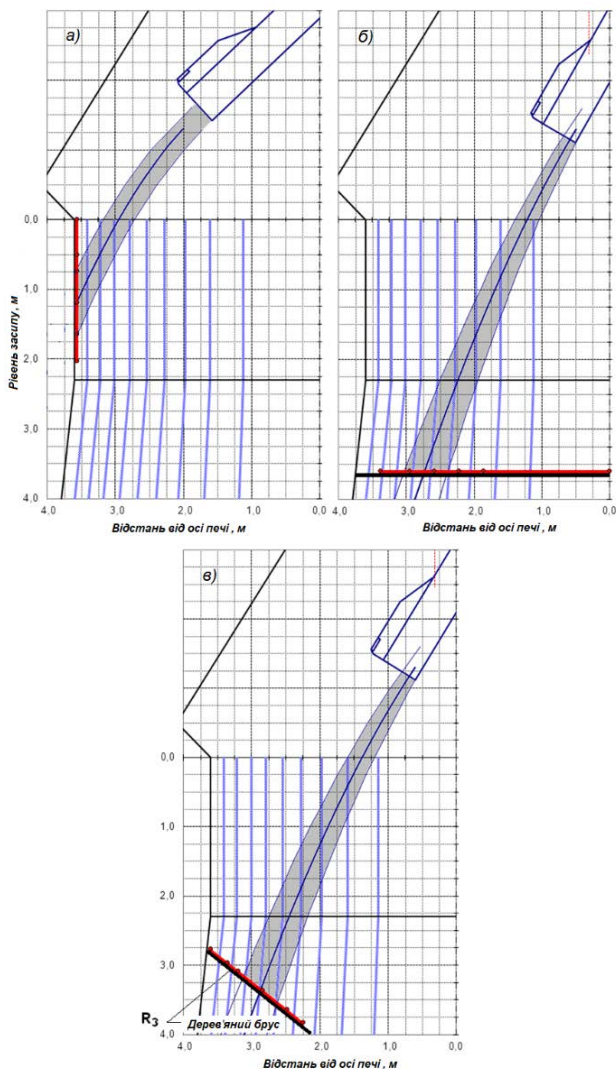
В період передпускових досліджень на ДП №3 розрахунок траєкторій руху центрів тяжіння потоків шихти в робочому просторі печі здійснювався за допомогою уточненої математичної моделі ІЧМ. Результати розрахунку дозволили визначити робочі значення кутів нахилу лотка для завантаження десяти кільцевих зон колошника і двох

додаткових кутових положень для завантаження шихтових матеріалів безпосередньо під стінку колошника і в вісь печі.

Для оцінки і уточнення результатів розрахунку кутів нахилу лотка і параметрів потоку шихтових матеріалів, що вивантажуються з лотка БЗП на поверхню засипу шихти, межі вертикального і горизонтального його перетинів визначалися інструментальними вимірами точок зустрічі потоку з плитами колошникового захисту (рис. 2.10а та 2.11), з поверхнею радіальних зондів відбору газу (рис. 2.10б) (рівень поверхні шихти – 3,6 м), а також з дерев'яним брусом, встановленим похило на поверхні засипу шихти (рис. 2.10в та 2.12).

Загальні межі потоку визначалися для врахування особливостей руху матеріалу за розподільчим лотком, відбиття частини потоку коксу від торцевої стяжки лотка, поверхні стаціонарних термозондів і подальшого його розосередження при русі в колошниковому просторі печі до рівня зондів для відбору проб газу. Заміри меж руху інтенсивного потоку матеріалу використовувалися згодом для уточнення вихідних даних моделювання траєкторій руху шихтових матеріалів в робочому просторі печі.

Результати виконаних замірів параметрів руху потоків коксу і залізовмісних матеріалів дозволили уточнити розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в робочому просторі печі і визначити кути нахилу лотка, що забезпечують необхідний діапазон регулювання розподілу шихтових матеріалів на колошнику. Розрахункові значення кутів нахилу лотка, визначені на підставі експериментальних даних для різних значень рівня засипу з кроком 0,1 м, були введені у відповідні матриці системи управління БЗП ДП №3 (табл. 2.5).



R3 – радіальний зонд для відбору проб газу

Рис. 2.10. Межі вертикального перерізу потоку шихтових матеріалів (а); горизонтального перерізу потоку (б) і межі потоку визначені вимірами точок зустрічі потоку з дерев'яним брусом, встановленим похило на поверхні засипу шихти (в)

Таблиця 2.5. Рекомендовані кути нахилу лотка БЗП при різних рівнях засипу ^(1) і 2) – значення, які не можуть бути реалізовані через наявні обмеження фірми "Paul Wurth" діапазону зміни кутів нахилу лоткового розподільника – 21,2–47,0 °)

Рівень засипу, м	№ кільцевої зони колошника											
	Стінка печі	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	Вісь печі
	Середній радіус кільцевої зони колошника, м											
	3,60	3,51	3,32	3,12	2,90	2,67	2,41	2,12	1,79	1,37	0,57	0,0
	№ кутового положення лотка											
	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	Кут нахилу лотка, град											
0,0	¹⁾ 47,0	47,0	47,0	47,0	46,4	43,3	40,5	37,9	35,1	31,5	23,2	21,2
0,1	47,0	47,0	47,0	47,0	45,7	42,6	39,9	37,4	34,6	31,0	22,9	21,2
0,2	47,0	47,0	47,0	47,0	44,8	42,0	39,4	36,9	34,1	30,6	22,1	21,2
0,3	47,0	47,0	47,0	47,0	44,1	41,3	38,9	36,4	33,7	30,1	22,0	21,2
0,4	47,0	47,0	47,0	46,2	43,4	40,8	38,4	35,8	33,2	29,7	21,9	21,2
0,5	47,0	47,0	47,0	45,5	42,7	40,2	37,9	35,4	32,8	29,3	21,8	21,2
0,6	47,0	47,0	47,0	44,8	42,1	39,7	37,4	35,0	32,4	28,9	21,7	21,2
0,7	47,0	47,0	46,9	44,1	41,5	39,2	37,0	34,6	32,0	28,5	21,6	21,2
0,8	47,0	47,0	46,2	43,4	40,9	38,7	36,6	34,2	31,6	28,1	21,5	21,2
0,9	47,0	47,0	45,4	42,8	40,4	38,3	36,2	33,8	31,3	27,7	21,4	21,2
1,0	47,0	47,0	44,7	42,2	39,9	37,9	35,5	33,4	30,9	27,3	21,3	21,2
1,1	47,0	46,8	44,1	41,6	39,4	37,5	35,1	33,1	30,5	26,9	²⁾ 21,2	21,2
1,2	47,0	46,1	43,4	41,1	39,0	37,1	34,7	32,7	30,2	26,6	21,2	21,2
1,3	46,8	45,4	42,8	40,6	38,6	36,7	34,4	32,4	29,8	26,2	21,2	21,2
1,4	46,1	44,7	42,3	40,1	38,2	36,4	34,1	32,0	29,5	25,9	21,2	21,2
1,5	45,4	44,1	41,7	39,7	37,8	35,5	33,7	31,7	29,1	25,5	21,2	21,2
1,6	44,8	43,5	41,2	39,2	37,4	35,1	33,4	31,4	28,8	25,2	21,2	21,2
1,7	44,1	42,9	40,7	38,8	37,1	34,8	33,1	31,1	28,5	24,9	21,2	21,2
1,8	43,5	42,4	40,3	38,5	36,7	34,5	32,8	30,7	28,1	24,5	21,2	21,2
1,9	42,9	41,8	39,8	38,1	36,4	34,2	32,5	30,4	27,8	24,2	21,2	21,2
2,0	42,4	41,3	39,4	37,7	36,1	33,9	32,2	30,1	27,5	23,9	21,2	21,2
2,1	41,9	40,9	39,0	37,4	35,1	33,6	31,9	29,8	27,2	23,6	21,2	21,2
2,2	41,4	40,4	38,7	37,1	34,8	33,3	31,6	29,5	26,9	23,3	21,2	21,2
2,3	40,9	40,0	38,3	36,8	34,5	33,0	31,3	29,2	26,6	23,0	21,2	21,2
2,4	40,6	39,7	38,1	36,5	34,3	32,8	31,1	29,0	26,3	22,9	21,2	21,2
2,5	40,3	39,4	37,8	36,3	34,1	32,6	30,9	28,8	26,1	22,8	21,2	21,2
2,6	40,0	39,2	37,6	36,1	33,9	32,4	30,6	28,5	25,9	22,6	21,2	21,2
2,7	39,7	38,9	37,4	35,0	33,7	32,1	30,4	28,3	25,6	22,5	21,2	21,2
2,8	39,5	38,7	37,1	34,8	33,5	31,9	30,2	28,1	25,4	22,3	21,2	21,2
2,9	39,2	38,4	36,9	34,6	33,3	31,7	30,0	27,9	25,2	22,1	21,2	21,2
3,0	39,0	38,2	36,7	34,4	33,1	31,5	29,8	27,6	24,9	22,0	21,2	21,2
3,1	38,7	38,0	36,5	34,2	32,9	31,3	29,6	27,4	24,7	22,0	21,2	21,2
3,2	38,5	37,8	36,3	34,0	32,7	31,2	29,4	27,3	24,5	22,0	21,2	21,2
3,3	38,3	37,6	35,1	33,9	32,5	31,0	29,2	27,0	24,3	22,0	21,2	21,2
3,4	38,1	37,4	34,9	33,7	32,3	30,8	29,0	26,8	24,1	21,9	21,2	21,2
3,5	37,9	37,2	34,7	33,5	32,1	30,6	28,8	26,6	23,8	21,9	21,2	21,2
3,6	37,7	37,0	34,6	33,3	31,9	30,4	28,6	26,4	23,6	21,9	21,2	21,2
3,7	37,5	36,8	34,4	33,1	31,8	30,2	28,4	26,2	23,4	21,8	21,2	21,2
3,8	37,3	36,6	34,2	33,0	31,6	30,0	28,3	26,0	23,2	21,8	21,2	21,2
3,9	37,1	36,5	34,1	32,8	31,4	29,8	28,0	25,8	23,0	21,8	21,2	21,2
4,0	37,0	36,3	33,9	32,6	31,3	29,7	27,8	25,6	22,9	21,8	21,2	21,2
4,1	36,8	34,9	33,7	32,5	31,1	29,5	27,6	25,4	22,8	21,7	21,2	21,2
4,2	36,6	34,7	33,6	32,3	30,9	29,3	27,5	25,2	22,7	21,7	21,2	21,2
4,3	36,5	34,6	33,4	32,2	30,8	29,2	27,3	25,0	22,6	21,7	21,2	21,2
4,4	36,3	34,4	33,3	32,0	30,6	29,0	27,1	24,8	22,5	21,7	21,2	21,2
4,5	36,2	34,3	33,1	31,8	30,4	28,8	26,9	24,7	22,4	21,6	21,2	21,2
4,6	34,7	34,1	33,0	31,7	30,3	28,7	26,8	24,5	22,3	21,6	21,2	21,2
4,7	34,5	34,0	32,8	31,6	30,1	28,5	26,6	24,3	22,2	21,6	21,2	21,2
4,8	34,4	33,9	32,7	31,4	30,0	28,3	26,4	24,1	22,1	21,6	21,2	21,2
4,9	34,3	33,7	32,5	31,3	29,8	28,2	26,3	24,0	22,0	21,6	21,2	21,2
5,0	34,1	33,6	32,4	31,1	29,7	28,0	26,1	23,8	21,9	21,6	21,2	21,2



Рис. 2.11. Дерев'яні рейки, опущені через газовідводи для визначення точок зустрічі потоку шихти з плитами колошникової захисту



Рис. 2.12. Дерев'яний брус, встановлений похило на поверхні засипу шихти для визначення точок зустрічі потоку шихти з поверхнею засипу шихти

2.4.3. Дослідження формування профілю поверхні засипу шихти

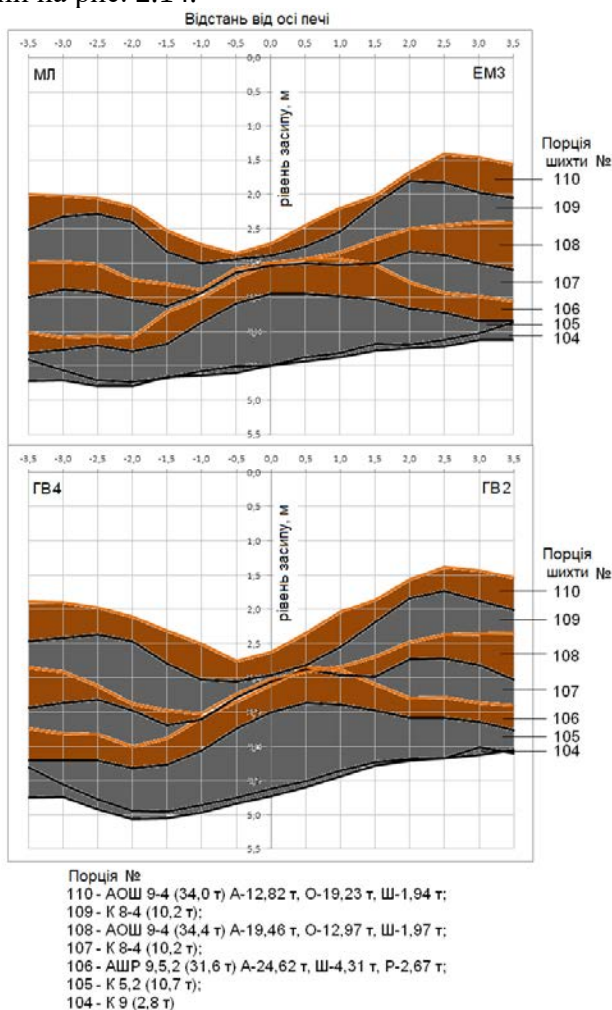
На форму поверхні засипу, розташування геометричного гребеня профілю після вивантаження порцій шихтових матеріалів, крім їх фізико-механічних властивостей, істотно впливають рівень засипу, кути нахилу лотка, величина відкривання шихтового затвору бункера БЗП, а також параметри профілю після вивантаження попередньої порції шихти (вихідний профіль засипу) [11].

Оцінка формування поверхні засипу шихти виконувалася за даними вимірів рівнів поверхні шихти в 60 точках безпосередньо на поверхні засипу після вивантаження восьми останніх порцій задувочної шихти. Результати вимірів представлені на рис. 2.13. Аналіз експериментальних даних показав наступні тенденції формування поверхні засипу після завантаження досліджуваних порцій.

Вивантаження восьми досліджуваних порцій супроводжувалося зниженням рівня засипу поверхні шихти на радіусах МЛ (монтажний люк) на 0,50 м, в середньому, і ГВ-4 (газовідвід №4) на 0,48 м, в середньому, в той час як на радіусі РР2 (радіолокаційний рівнемір) зниження рівня засипу склало 0,13 м і на радіусі ГВ-3 – 0,22 м.

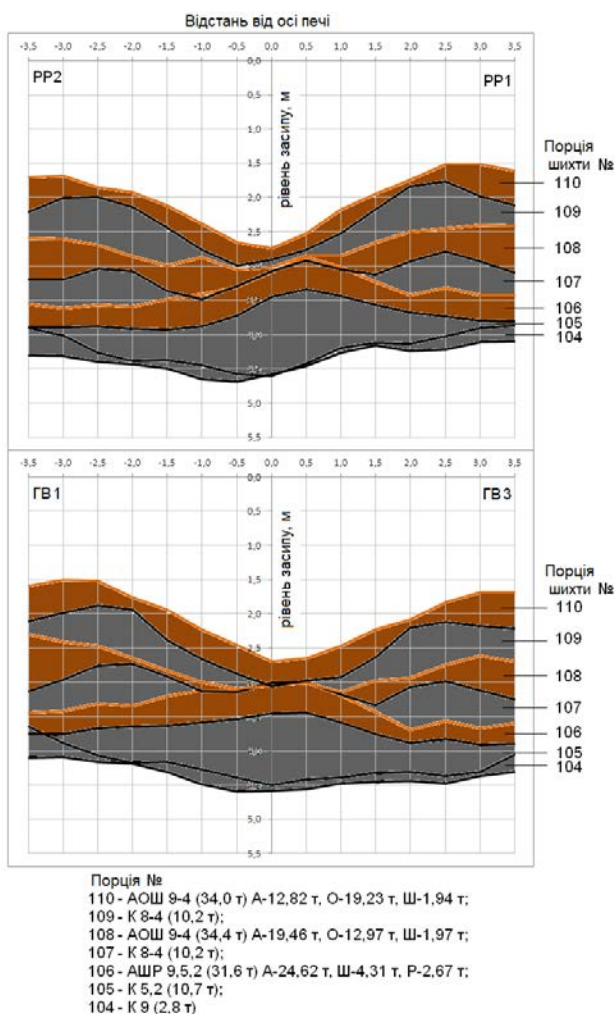
Наявність окружної нерівномірності рівнів засипу було викликано відпрацюванням у випадковому режимі (проектний базовий режим фірми «Paul Wurth» роботи шихтового затвору при вивантаженні кожної чергової порції шихтових матеріалів) початку вивантаження порцій шихти, а також нахилу доменної печі відносно завантажувального пристрою. Ця проектна помилка була встановлена при подальшій експлуатації ДП після виконання геодезичних вимірювань. Допустима несоосность горизонтів печі на рівнях опорного фланця БЗП і мараторного кільця складає 30 мм, за результатами геодезичних вимірювань несоосность цих відміток склала 41 мм. Відзначено також нерівномірність розподілу шихти по окружності, яка викликана впливом термозондів іноземного виробництва, що використовувались на першому етапі роботи ДП №3, з широким поперечним перерізом, які зумовили утворення поглиблень з різницею рівнів шихти величиною 0,57 м в зоні їх установки при середньому рівні засипу 3,19 м. При середньому рівні засипу

1,95 м ця різниця зменшилася до 0,33 м. Вплив термозондів на формування нерівномірності поверхні засипу шихти показаний на рис. 2.14.



ЕМЗ – електромеханічний зонд, ГВ-1 ... ГВ-4 – газовідводи, МЛ – монтажний люк.
Найменування порцій шихти: А – агломерат, О – окатиші, Ш – шлак, К – кокс, Р – залізна руда, 9-4, 8-4, 5-2 – кутові положення лотка БЗП вивантаження матеріалів

Рис. 2.13 а. Поверхні засипу шихтових матеріалів, які виміряні після вивантаження восьми останніх порцій задувочної шихти



PP-1, PP-2 – радіолокаційні рівнеміри, ГВ-1 ... ГВ-4 – газовідводи, Найменування порцій шихти: А – агломерат, О – окатиші, Ш – шлак, К – кокс, Р – залізна руда, 9-4, 8-4, 5-2 – кутові положення лотка БЗП вивантаження матеріалів

Рис. 2.13 б. Поверхні засипу шихтових матеріалів, які виміряні після вивантаження восьми останніх порцій задувочної шихти

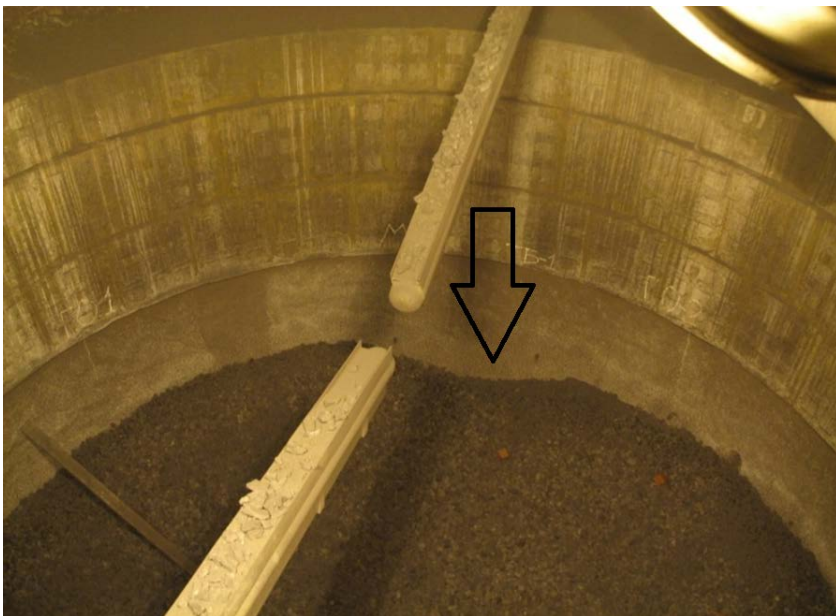


Рис. 2.14. Вплив термозондів на формування окружної нерівномірності поверхні засипу шихти (на фотографії поверхня засипу шихти після вивантаження порції №104, рівень засипу 4,1–4,4 м)

Після вивантаження порції коксу №103 масою 5,4 т з кутом нахилу лотка $49,0^\circ$, вимірний профіль поверхні засипу характеризувався утворенням горизонтальної «полки» на периферії шириною 0,5 м. Поверхня засипу, утворена після вивантаження порції коксу № 104 масою 2,8 т з кутом нахилу лотка $37,5^\circ$ на рівень засипу – 4,38 м характеризувалась наявністю кільцевої ділянки на периферії шириною 0,5–0,8 м з кутом нахилу поверхні цієї ділянки до центру печі $\approx 20^\circ$. Після вивантаження порції коксу №105 масою 10,7 т з кутами нахилу лотка $28,1^\circ$ та $21,6^\circ$ на рівень засипу 4,24 м було зафіксовано утворення «гребенів» на радіусах МЛ, ГВ-4 та ГВ-3 на відстані 1,0 м від стінки печі з максимальним кутом нахилу поверхні засипу від «гребеня» до стінки печі – 10° і від «гребеня» до осі печі – 12° . Зазначене розташування «гребенів» відповідало координатам точок зустрічі центру потоку шихтових матеріалів, що вивантажуються з 5-го

кутового положення лотка, з поверхнею засипу. Після вивантаження порції залізовмісних матеріалів №106 масою 31,6 т з кутами нахилу лотка $38,4^\circ$, $29,3^\circ$ та $21,8^\circ$ на рівень засипу – 3,67 м було зафіксовано утворення явно виражених «гребенів» на радіусах РР-1, ГВ-4 та ГВ-3 на відстані 1,0 м від стінки печі з максимальним кутом нахилу поверхні засипу від «гребеня» до стінки печі – 12° і від «гребеня» до осі печі – 20° . Зазначене розташування «гребеня» також відповідало координатам точок зустрічі центру потоку шихтових матеріалів, що вивантажуються з 5-го кутового положення, з поверхнею засипу. На інших позначених на рис. 2.13 радіусах через перекіс поверхні засипу «гребені» зафіксувати не вдалося. При вивантаженні чотирьох дослідницьких порцій №№107–110 глибина осьової воронки поверхні засипу шихти, в середньому по восьми радіусам, збільшувалася від мінімального значення після вивантаження порції №107, що склала 0,11 м, до 0,45 м – після вивантаження порції №108, 0,97 м – після вивантаження порції №109 і досягла значення – 1,06 м після вивантаження порції №110.

Зазначені особливості формування поверхні засипу дозволили в подальшому їх враховувати при розробці раціональних програм завантаження з метою мінімізації негативних впливів конструктивних особливостей ДП та обладнання на рівномірність або наперед задану нерівномірність розподілу шихтових матеріалів в печі [53].

2.4.4. Дослідження гранулометричного і компонентного складу шару залізовмісних матеріалів по радіусу колошника

Оптимізація режиму завантаження ДП, обладнаної БЗП, включає раціональний розподіл як рудних навантажень в кільцевих зонах перерізу колошника, так і складу суміші різноосновних рудних компонентів, зокрема, агломерату та окатишів. Останнє має виключати локальне зосередження масивів низькоосновних окатишів в окремих зонах печі, особливо в пристінній її зоні, в зв'язку з їх негативним впливом на стійкість футерівки і гарнісажуєтворення в шахті печі. Збільшення кількості окатишів в периферійній зоні призводить до зниження основності матеріалу, формуванню агресивних оксидних розплавів з низькою плинністю, що руйнують вогнетривку футерівку печі, а також до збільшення

частки монооксиду заліза в первинних шлаках, що обумовлює розмивання і зсув гарнісажу, нестійкий нагрів і хід печі, горіння повітряних фурм.

Одним з технологічних прийомів обмеження попадання окатишів в пристінну зону печі, розробленим в ІЧМ, є формування змішаних залізорудних порцій з головною частиною, що складається з агломерату [85, 86]. У системах завантаження зі скіповою доставкою шихти на колошник головна частина залізорудної порції формується з агломерату, що завантажується наверх першого скіпа. У деяких випадках в перший скіп завантажується тільки матеріал, що становить головну частину порції, а всі інші компоненти порції завантажуються в другий скіп.

Кількісна оцінка впливу маси головної частини змішаної порції на розподіл агломерату та окатишів по радіусу колошника на ДП №3 була виконана з використанням телескопічних пробовідбирачів циліндричної форми, що складаються з двох, близьких за об'ємом, вертикальних секцій. Пробовідбирачі встановлювалися на шар коксу перед вивантаженням дослідницької залізозмісної порції АОШ 9-4 ($M_A = 19,46$ т або 56,57% від маси порції, $M_O = 12,97$ т – 37,70%, $M_{Ш} = 1,97$ т – 5,73%) по радіусу колошника, орієнтованому в секторі установки радіолокаційного рівнеміра РР-1 з боку похилого мосту на відстані, в середньому, 1,2 м один від одного (рис. 2.15). Структура порції АОШ, котра формувалася в процесі досліджень, показана на рис. 2.16. Розподіл агломерату та окатишів по радіусу колошника після вивантаження цієї порції представлено на рис. 2.17.

Результати виконаних експериментальних досліджень показали, що маса головної частини порції з агломерату (маса агломерату, завантаженого в перший скіп без окатишів) на рівні 18,0–20,0 т забезпечує розподіл залізорудних компонентів по радіусу колошника досить близький до технологічних вимог: вміст окатишів на периферії печі не перевищує 11,0% з максимумом в проміжній зоні і плавним спаданням кількості цього матеріалу до осі печі [85, 86].

Отримані результати досліджень дозволити в подальшому розробляти і впроваджувати на ДП №3 раціональні режими формування багатокомпонентних порцій для різних технологічних та шихтових умов.



Рис. 2.15. Встановлення циліндричних пробовідбирачів на поверхні коксу перед вивантаженням дослідницької залізовмісної порції АОШ 9-4

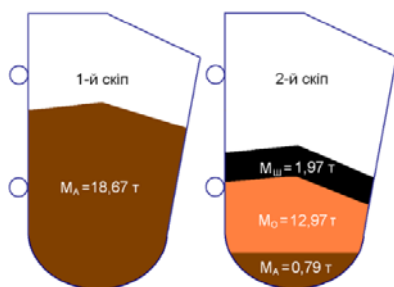


Рис. 2.16. Структура дослідницької залізовмісної порції АОШ 9-4 (послідовність набору компонентів в сипи)

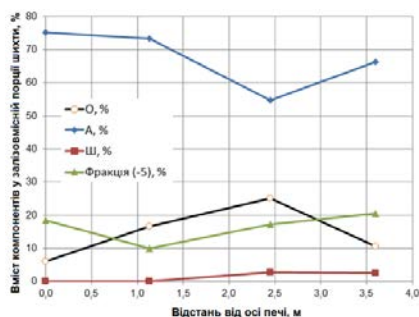


Рис. 2.17. Розподіл компонентів дослідницької залізовмісної порції АОШ 9-4 по радіусу колошника

2.5. Оптимізація пропускної здатності системи завантаження БЗП при контактному і безконтактному способах контролю рівня засипу

В даний час обсяг виробництва чавуну в доменних цехах України лімітується не максимальною продуктивністю печей, а необхідним рівнем виробництва. У подібних умовах на перший план виходять задачі ефективності доменної плавки при заданому рівні виробництва і можливість не тільки планово, а й оперативно змінювати рівень виробництва чавуну. Достатній рівень пропускної здатності системи завантаження і наявність нормативного резерву цього параметра є одним з визначальних умов стабільної та ефективної роботи доменної печі. Пропускна здатність системи завантаження в цілому визначається параметрами роботи двох підсистем: шихтоподачі і БЗП [84, 87].

На ДП, оснащених однотрактними БЗП, пропускна здатність системи завантаження визначається тривалістю циклу завантаження скіпів порцій коксу або ЗВМ і доставки їх на колошник або тривалістю циклу завантаження цих порцій в доменну піч. Пропускна здатність систем завантаження цього типу визначається тривалістю більш тривалого із зазначених вище циклів.

Контроль рівня засипу в ДП №3 здійснюється електромеханічним зондом (шомполом) і радіолокаційними рівнемірами іноземного виробництва. Для умов ДП №3 виконано аналіз пропускної здатності системи завантаження БЗП при контролі рівня засипу електромеханічним зондом (контактний спосіб) і радіолокаційними рівнемірами (безконтактний спосіб).

Метою виконаного аналізу циклограм роботи обладнання системи завантаження ДП №3, була перевірка відповідності фактичних параметрів і послідовності роботи обладнання проектним показникам, наявності циклових простоїв і оцінка резервів пропускної здатності системи.

На ДП №3 після здачі в промислову експлуатацію АСУ системи завантаження у листопаді 2012 р. були виконані вимірювання часу роботи механізмів шихтоподачі і системи БЗП, на підставі яких побудовані циклограми їх роботи. Аналіз отриманих результатів показав, що у листопаді 2012 р. тривалість циклу завантаження і підйому на колошник скіпів

однієї подачі становила 323 с, що на 15,6 с менше, ніж після задувки печі, у зв'язку з налаштуванням обладнання системи завантаження на початковому етапі роботи ДП. Тривалість циклу завантаження бункера, шлюзування і вивантаження в піч однієї порції становить: 202,4 с – для коксової порції, 208,4 с – для порції ЗВМ. Таким чином, тривалість циклу завантаження БЗП однієї подачі становить 410,8 с, це на 87,8 с більше циклу завантаження і транспортування скипів на колошник.

При аналізі циклограми, побудованої у листопаді 2012 р. можна виділити три основні групи механізмів з визначенням, по технологічній можливості, зменшення часу циклу їх роботи:

- *газоуцілювальні клапани.* Час роботи газоуцілювальних клапанів збільшено практично вдвічі, в порівнянні з проектним часом. Це пов'язано із загальним зменшенням тиску азоту у загальнозаводському магістральному трубопроводі. Після реконструкції кисневого цеху і при збільшенні тиску азоту можливим є зменшення часу роботи для даних механізмів; (7,0–7,5 кг/см² – проектний тиск, 4,5–6,2 кг/см² – у листопаді 2012 р. і протягом наступних двох років експлуатації БЗП);
- *електромеханічний зонд.* Для запобігання пошкодження зонда потоком шихти технологами цеху було збільшено час піднімання механічного зонда на 8,1 с шляхом внесення змін до програмного забезпечення АСУ завантаженням доменної печі. На підставі результатів передпускових досліджень фактичних траєкторій шихти [52], авторами цієї книги було обгрунтовано зміну часу початку відкривання шихтового затвору в момент перетину механічного зонду верхньої межі потоку шихтових матеріалів при роботі на мінімальному рівні засипу і максимальному куті нахилу лотка БЗП, а ні під час досягнення зондом гаражного положення, як це відбувалось при наладці обладнання перед пуском печі. Це дозволило зменшити час циклу роботи БЗП на 8,3 с в режимі «догонка міри». Для зменшення часу виведення печі на робочий рівень засипу при роботі в режимі «догонка міри» було рекомендовано виводити механічний зонд з

експлуатації. Дозвіл на вивантаження доцільно організувати за показаннями радіолокаційних рівнемірів (за умови їх стабільної роботи).

- *розподільчий лоток*. Усунення затримки часу пошуку лотком БЗП заданого гаражного положення перед вивантаженням порції шихтових матеріалів дозволило зменшити час циклу завантаження на 15–22 с.

Для аналізу пропускної здатності традиційно використовують коефіцієнт завантаженості обладнання (K_z), нормативна величина якого 0,75 характеризує стабільність роботи доменної печі із заданою продуктивністю і забезпечує резерв пропускної здатності при роботі печі в режимі «догонка міри», при роботі доменної печі із заданою продуктивністю ($Q_{зад}$) [10]. У табл. 2.6 наведені значення величини K_z , а також кількість подач, завантажених в доменну піч у годину, задана і максимальна продуктивність, а також час циклу завантаження БЗП для трьох варіантів з можливими (3200 т/добу і 3400 т/добу) і поточним (2900 т/добу) рівнями виробництва:

- до реалізації рекомендацій ІЧМ (позначений період 2012 р);
- після реалізації рекомендацій ІЧМ (позначений період 2013 р.);
- після заміни механічного зонда радіолокаційними рівнемірами (позначений період 2013 р. з використанням радарів).

Як впливає з табл. 2.6, використання показань радарів дозволить зменшити час завантаження на 18,6% і збільшити максимальну продуктивність при прийнятному рівні коефіцієнта завантаженості (менш ніж 0,75 од.). Подальше збільшення продуктивності печі повинно включати в себе додаткові технологічні заходи.

Таким чином, реалізація рекомендацій ІЧМ щодо усунення тимчасових затримок завантаження, пов'язаних з підйомом механічного зонда і пошуком положення лотка по окружності перед вивантаженням порції дозволила зменшити час циклу завантаження на 28 с і зменшити коефіцієнт завантаженості устаткування до значень менш ніж 0,75 од., що призвело до збільшення максимальної продуктивності доменної печі, яку може забезпечити система завантаження при роботі в режимі «догонка міри», на 271 т/добу.

Таблиця 2.6. Показники пропускної здатності системи завантаження

Коефіцієнт завантаженості обладнання при роботі доменної печі із заданою продуктивністю ($Q_{\text{зад}}$)

$$K_z = \frac{Q_{\text{зад}}}{Q_{\text{max}}}$$

Максимальна продуктивність доменної печі (Q_{max}), яку може забезпечити система завантаження при роботі в режимі "догонка міри"

$$Q_{\text{max}} = \frac{24 \cdot 3600 \cdot n \cdot m \cdot C_{\text{Fe}}^{\text{ш}}}{t_{\text{ц}} \cdot C_{\text{Fe}}^{\text{ч}}}$$

$C_{\text{Fe}}^{\text{ш}}$ – вміст Fe у шихті,

$C_{\text{Fe}}^{\text{ч}}$ – вміст Fe у чауні,

$t_{\text{ц}}$ – тривалість циклу завантаження,

n – кількість скилів у циклі завантаження,

m – маса ЗВМ в одному скилі

Період	$Q_{\text{зад}},$ т/доб	$t_{\text{ц}},$ с	$Q_{\text{max}},$ т/доб	Кільк. подач у годину	K_z
2012 р.	2900	411,0	3710	8,76	0,78
2013 р.	2900	383,0	3981	9,40	0,73
2013 р. використанням радарів	2900	347,4	4389	10,36	0,66
2012 р.	3200	411,0	3710	8,76	0,86
2013 р.	3200	383,0	3981	9,40	0,80
2013 р. використанням радарів	3200	347,4	4389	10,36	0,73
2012 р.	3400	411,0	3710	8,76	0,92
2013 р.	3400	383,0	3981	9,40	0,85
2013 р. використанням радарів	3400	347,4	4389	10,36	0,77

$$n = 2, m = 15,5 \text{ т} (m_{\text{max}} = 22,0 \text{ т})$$

В результаті виконаного аналізу встановлено, що час руху механічного зонда, досить великий. У зв'язку з цим, для управління завантаженням печі було рекомендовано використовувати на ДП №3 радіолокаційні рівнемірами. Аналіз складових тривалості циклу завантаження показав, що збільшення часу спрацювання шихтових затворів і газовідсічних клапанів дозволить скоротити цикл завантаження лише на 2,1 %, у той час як застосування безконтактних вимірювачів рівня засипу забезпечує зменшення тривалості циклу (вивантаження двох порцій) на 18,6 %.

2.6. Модельна система для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження доменної печі, обладнаної БЗП

Як зазначалося вище, в останні роки, реконструйовані або новоспоруджувані доменні печі оснащуються безконусними завантажувальними пристроями, які, на відміну від конусних завантажувальних пристроїв, мають широкі можливості управління як радіальним, так і окружним розподілом шихтових матеріалів [10, 52].

В даний час на ДП раціональність програм завантаження оцінюють, в першу чергу, по характеру зміни розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу шихти. Інформація про розподіл шихтових матеріалів на колошнику ДП необхідна для оцінки змін структури стовпа шихти при різних режимах роботи печі, а також для визначення показників розподілу: рудних навантажень і об'ємів матеріалів по радіусу колошника [10, 11, 22, 88, 89].

З метою оптимізації (або обмеження можливих варіантів) вибору раціонального режиму завантаження печі актуальним є розробка і реалізація модельної системи, що служить для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження ДП, обладнаної БЗП. Модельні системи для підтримки прийняття рішень є вид комп'ютерних інформаційних систем, які допомагають оператору-технологу в прийнятті рішень при наявності погано структурованих задач за допомогою прямого діалогу з комп'ютером, використовуючи технологічні дані і математичні моделі [90].

Розроблена і реалізована на ДП №3 після її пуску модельна система призначена для автономної роботи на персональному комп'ютері користувача, служить навчальним інструментом для технологів доменного цеху, що є важливим і значущим при освоєнні персоналом нового завантажувального пристрою. Модельна система розроблена з урахуванням існуючої на ДП №3 технології завантаження, конструктивних параметрів доменної печі, БЗП і обладнання системи завантаження. Модельна система дозволяє розрахувати рудні навантаження і об'єми матеріалів в рівних по площі десяти кільцевих зонах колошника, що є важливою інформацією для коригування існуючих і вибору раціональних програм завантаження ДП №3.

Початковими даними для розрахунку програм завантаження за допомогою модельної системи є: матриця циклу завантаження (розподіл мас шихтових матеріалів по скіпам і бункерам шихтоподачі); вихідна програма завантаження (розподіл шихтових матеріалів по кутовим положенням лотка); рівень засипу шихти в печі; характеристики переліку шихтових матеріалів з прив'язкою до бункерів шихтоподачі. Вихідними даними є: розподіл шарів вивантажених порцій на колошнику доменної печі;

розрахункові значення в десяти рівних за площею кільцевих зонах колошника рудних навантажень, мас і об'ємів компонентів шихти; геометрія профілю засипу шихтових матеріалів після вивантаження циклу завантаження.

Для максимального наближення до фактичних умов роботи ДП №3 всі параметри завантаження, які були використані в модельній системі, були уточнені за результатами передпускових досліджень розподілу шихти першого об'єму, виконаних перед задувкою печі (див. Розділ 2.4) [52, 83, 89]. В ході виконання цих досліджень було визначено, що при зміні кута нахилу лотка та об'ємної витрати матеріалу на вихідному торці лотка змінюється координата точки вильоту центра ваги потоку щодо робочої поверхні лотка в поздовжньому його перерізі. З урахуванням цього в модельній системі розроблено алгоритм розрахунку ширини потоку шихтових матеріалів в залежності від кута нахилу лотка, рівня засипу і об'ємної витрати.

На підставі розрахунку траєкторій центру ваги потоку шихтових матеріалів і результатів передпускових досліджень на ДП №3 були побудовані наступні залежності, які використані в модельній системі: залежність кутів укосу шихтових матеріалів від виду матеріалу в кожній рівній по площі зоні колошника; залежність ширини потоку шихтових матеріалів від часу вивантаження порції, кута нахилу лотка і рівня засипу шихти.

При роботі з модельною системою користувачеві надаються три форми для введення вихідних даних і отримання результатів: «План завантаження», «Список матеріалів», «Моделювання». Вихідні дані для моделювання завантаження печі розташовуються на перших формах вікна програми: «План завантаження» і «Список матеріалів». Матриця циклу і вихідна програма завантаження печі задається на вкладці «План завантаження», характеристики переліку шихтових матеріалів – на вкладці «Список матеріалів». Рівень засипу печі задається безпосередньо перед моделюванням завантаження на вкладці «Моделювання».

Форма «План завантаження» складається з двох основних частин, розділених горизонтально (рис. 2.18). У верхній частині форми відображається матриця циклу завантаження з розподілом мас шихтових матеріалів по скіпам і бункерам шихтоподачі. До цієї матриці по кожному з

бункерів шихтоподачі оператором вводяться маси шихтових матеріалів для порцій програми завантаження. Максимальна кількість порцій програми завантаження – 18. Кількість бункерів шихтових матеріалів незмінна, визначена конфігурацією шихтоподачі ДП №3 і дорівнює 20. Виходячи з цього, порція матриці циклу завантаження складається з 20 значень мас (стовпець матриці) дози матеріалу з кожного бункера шихтоподачі. Горизонтально матриця циклу завантаження розділена на дві підматриці, які відповідають лівій і правій стороні шихтоподачі (лівому і правому скіпу), які в свою чергу, розділені на коксовий і залізовмісний набори.

The screenshot shows a software interface for simulating the loading of a blast furnace. The main window is titled "ИЧМ - ЕМЗ ДП-3 - Симулятор загрузки печи" and "НАБОР СКИПОВ". It displays a complex table with multiple columns for different material types (e.g., кокс, окатыши, известняк) and rows for different batches or positions. The table is organized into sections for "Операторский план загрузки" and "Распределение". The interface includes various tabs and a sidebar with a tree view of the data structure.

Рис. 2.18. Форма «План завантаження»

У нижній частині форми відображається матриця розподілу шихтових матеріалів по кутовим положенням лотка. До цієї матриці оператор вводить відсотковий розподіл шихтових матеріалів для порцій програми завантаження по кутовим положенням лотка і час вивантаження порції (час розподілу). Кількість кутових положень лотка незмінна, визначена конструкцією БЗП ДП №3 і дорівнює 11. Виходячи з цього, стовпець матриці розподілу шихтових матеріалів складається з 11 значень відсотків від маси порції і часу

вивантаження даної порції завантажувальним пристроєм. База даних модельної системи дозволяє зберігати необмежену кількість матриць циклу завантаження і розподілу шихтових матеріалів по кутовим положенням лотка.

Форма «Список матеріалів» складається з таблиці переліку шихтових матеріалів, які використовуються в технології з прив'язкою до бункерів шихтоподачі (рис. 2.19). Кількість можливих різних шихтових матеріалів відповідає кількості бункерів шихтоподачі і становить 20. При використанні одного і того ж шихтового матеріалу в кількох бункерах інформація дублюється на кожен бункер. Після завдання вихідних даних (матриць набору скипів і розподілу шихтових матеріалів по кутовим положенням лотка БЗП) моделювання завантаження печі здійснюється на формі «Моделювання» (рис. 2.20), яка складається з трьох основних частин: завдання, розподіл по зонах колошника, зображення структури вивантажених шарів.

№	Сторона ШП	Бункер	Описание	Материал	Шифр	Адресная таблица	Тип	Плотность
1	ЛЕВАЯ	ОП3	Окашки	Окашки	O	105 ОКАТЫШ	ЖСМ	2,11
2	ЛЕВАЯ	ОП2	Окашки	Окашки	O	103 ОКАТЫШ	ЖСМ	2,11
3	ЛЕВАЯ	ОП1	Окашки	Окашки	O	101 ОКАТЫШ	ЖСМ	2,11
4	ЛЕВАЯ	КОП	Коксовый орех	Коксовый орех	Кк	87 ОРЕХ	КОКС	0,82
5	ЛЕВАЯ	ДП4	Известняк	Известняк	Из	89 ИЗВЕСТНЯК	ЖСМ	1,69
6	ЛЕВАЯ	ИП1	Брикеты	Брикеты	Бр	83 БМС-80	ЖСМ	1,66
7	ЛЕВАЯ	ДП3	Шлак	Шлак	Ш	85 ШЛАК	ЖСМ	1,56
8	ЛЕВАЯ	ДП2	Шлак	Шлак	Ш	81 ШЛАК	ЖСМ	1,56
9	ЛЕВАЯ	ДП1	Брикеты	Брикеты	Бр	59 БМС-80	ЖСМ	1,66
10	ЛЕВАЯ	АП	Агломерат ММКИ	Агломерат ММКИ	А	АГЛ. ММКИ	ЖСМ	1,83
11	ЛЕВАЯ	КП	Кокс Адвеевский Преминум	Кокс Адвеевский Преминум	К	КОКС АИХ 33	КОКС	0,50
12	ПРАВАЯ	ОП3	Окашки	Окашки	O	105 ОКАТЫШ	ЖСМ	2,11
13	ПРАВАЯ	ОП2	Окашки	Окашки	O	103 ОКАТЫШ	ЖСМ	2,11
14	ПРАВАЯ	ОП1	Окашки	Окашки	O	101 ОКАТЫШ	ЖСМ	2,11
15	ПРАВАЯ	ИП1	Известняк	Известняк	Из	89 ИЗВЕСТНЯК	ЖСМ	1,69
16	ПРАВАЯ	ДП1	Брикеты	Брикеты	Бр	84 БМ-2	ЖСМ	1,66
17	ПРАВАЯ	ДП2	Шлак	Шлак	Ш	82 ШЛАК	ЖСМ	1,56
18	ПРАВАЯ	КОП	Коксовый орех	Коксовый орех	Кк	80 ОРЕХ	КОКС	0,82
19	ПРАВАЯ	АП	Агломерат ММКИ	Агломерат ММКИ	А	АГЛ. ММКИ	ЖСМ	1,83
20	ПРАВАЯ	КП	Кокс Адвеевский Преминум	Кокс Адвеевский Преминум	К	КОКС АИХ 33	КОКС	0,50

Всего: 20

План загрузки | Список материалов | Моделирование

v11.0.0

Рис. 2.19. Форма «Список материалов»

При завданні матриць мається на увазі, що кожному набору скипів порції циклу завантаження відповідає розподіл матеріалів у відсотках за кутовими положеннями лотка БЗП. Об'єм шихтових матеріалів кроку (порції) завантаження, розрахований через масу і щільність, розташовано відповідно в скипі і бункер (об'єм скипа становить $11,5 \text{ м}^3$, бункера – 24 м^3). При недотриманні даних параметрів користувачеві

виводиться перелік помилок. Після коректного завдання всіх вихідних даних і натискання кнопки «Вивантаження» відбувається розрахунок і візуалізація конфігурації шарів шихтових матеріалів на колошнику, розрахунок розподілу шихтових матеріалів і рудних навантажень по радіусу колошника.

У правій частині рис. 2.20 візуалізується розподіл шарів вивантажених порцій на колошнику ДП, який представляє собою схематичний геометричний розподіл об'ємів шихтових матеріалів по радіусу колошника і в верхній частині шахти ДП. У центральній частині рис. 2.20 в результатуючій таблиці представлено розподіл мас компонентів шихтових матеріалів по бункерах шихтоподачі і сумарний розподіл мас і об'ємів коксових і залізовмісних компонентів шихтових матеріалів в десяти рівновеликих по площі кільцевих зонах колошника. Розрахункові значення величин рудних навантажень представлені на графіку (рис. 2.20).

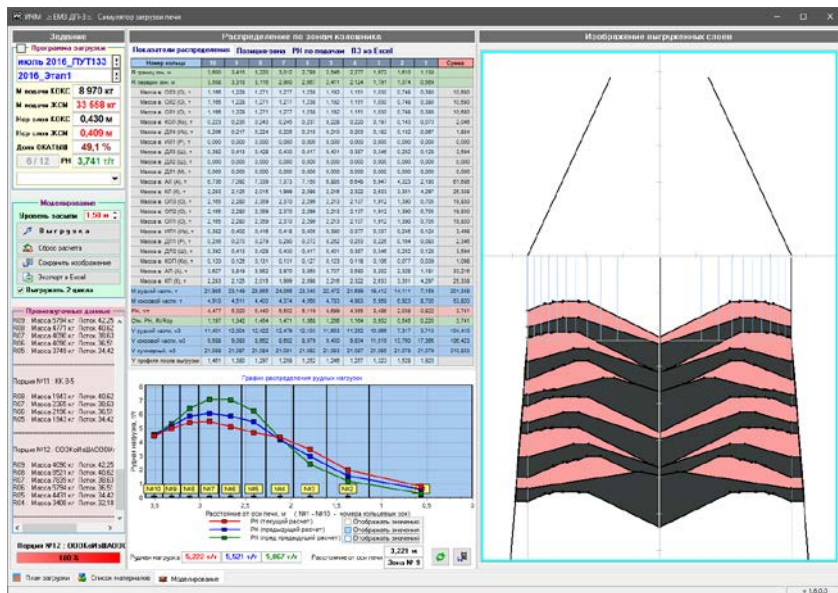


Рис. 2.20. Форма «Моделирование»

На ДП №3 показником розподілу шихтових матеріалів є температура колошникового газу за показаннями термозондів. Для перевірки адекватності модельної системи

виконано оцінку зв'язку розрахованих з її допомогою значень рудних навантажень і температури колошникового газу по радіусу печі для одного з періодів роботи печі, в якому використовувалася розроблена за допомогою модельної системи програма завантаження. У аналізованих періодах коефіцієнт достовірності апроксимації величин рудного навантаження і температури колошникового газу склав $-0,84$ (рис. 2.21). Отриманий зв'язок дозволив по розрахованим показникам розподілу шихтових матеріалів на колошнику ДП №3 зробити висновок про адекватність розробленої модельної системи.

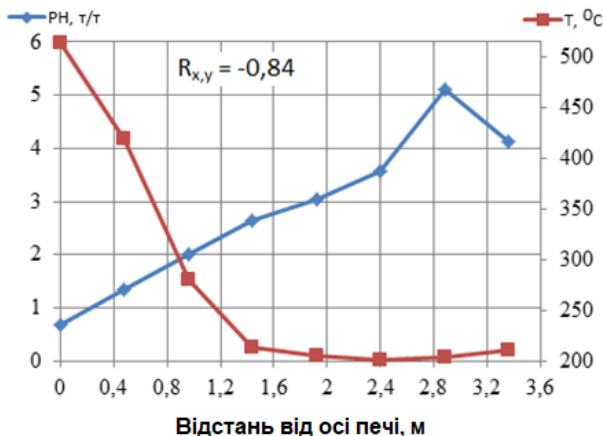


Рис. 2.21. Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу (T , $^{\circ}\text{C}$) та розрахункових рудних навантажень (RH , т/т)

За допомогою модельної системи протягом п'яти років експлуатації ДП №3 (з 2012 по 2016 рр.) розроблено та реалізовано різноманітні варіанти програм завантаження: при використанні в складі шихтових матеріалів різних компонентів, а також при використанні в дутті природного газу та пиловугільного палива. Розроблені програми завантаження дозволили отримати задані або високі техніко-економічні показники плавки [53]. Для прикладу, на рис. 2.22 представлені рекомендації щодо зміни програми завантаження за допомогою модельної системи при переході на збільшену частку в шихті високоякісних залізрудних офлюсованих окатишів з високим вмістом заліза і основністю (CaO/SiO_2) 0,3 од.

Ключовий принцип зміни програми завантаження був спрямований на зменшення рудного навантаження на периферії і в проміжній зоні за рахунок збільшення товщини шарів коксу на периферії. Згідно з рекомендаціями, змінам підлягли 4 порції з 12 циклу завантаження. На першому етапі змінено порції №4 та №5, далі через кілька діб – порції №10 і №11. При цьому, режим завантаження матеріалів в скіпи рекомендовано формувати таким чином: окатиші + добавки + агломерат, агломерат завантажувється на верх скіпа, з максимальним його вмістом в першому (лівому) скіпі.

Реалізовані зміни дозволили забезпечити стабільність ходу печі із формуванням на футерівці шахти та заплечиків стійкого гарнісажу, а також виключити горіння повітряних фурм.

Висновки до Глави 2.

Дослідження параметрів потоків шихтових матеріалів, що завантажуються в доменну піч за допомогою БЗП, розподілу маси порцій і їх компонентів на колошнику, виконані перед пуском доменної печі №3, а також визначення витратних характеристик шихтового затвору бункера БЗП, дослідження формування профілю поверхні засипу шихти, гранулометричного і компонентного складів шару залізовмісних матеріалів по радіусу колошника дозволили після задувки печі визначити і реалізувати режими роботи механізмів БЗП, необхідні для ефективного застосування раціональних програм завантаження доменної печі.

Розроблено та реалізовано на ДП №3 модельну систему для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження, що дозволяє технологічному персоналу приймати адекватні управляючі рішення по зміні режимів завантаження печі. Крім основної функції, використання системи націлене також на навчання персоналу в умовах освоєння нового завантажувального пристрою.

За допомогою модельної системи протягом п'яти років експлуатації доменної печі розроблено та реалізовано програми завантаження: при використанні в складі шихтових матеріалів різних компонентів, а також при використанні в дутті природного газу та пиловугільного палива. Розроблені програми завантаження дозволили отримати високі техніко-економічні показники доменної плавки.

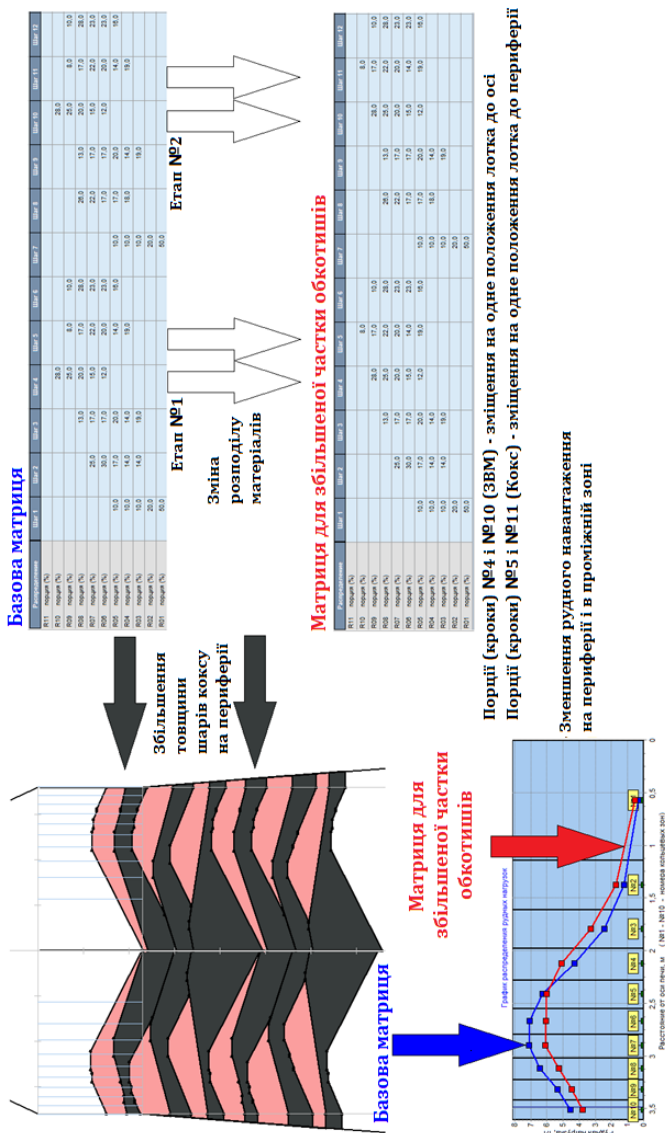


Рис. 2.22. Рекомендації щодо зміни програми завантаження при переході на збільшену частку в шихті високоякісних залізорудних офлюсованих окатишів

*Здобувати пізнання
ще недостатньо
для людини, треба вміти
віддавати їх в зріст*

*Йоганн Вольфганг фон Гете
(1749 – 1832)*

ГЛАВА 3

НОВІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯМ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ В ЗМІННИХ ШИХТОВИХ УМОВАХ І ПРИ ВДУВАННІ В ГОРН ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

Важливим напрямком підвищення ефективності роботи доменних печей є вдосконалення режимів завантаження шихтових матеріалів в доменну піч і раціональний їх розподіл по радіусу та окружності колошника. За сучасними уявленнями, рівень техніко-економічних показників роботи доменних печей значною мірою визначається ефективним формуванням стовпа шихти і газового потоку. Цьому сприяє застосування на доменних печах безконусних завантажувальних пристроїв [10, 11]. В останні роки реконструйовані або новоспоруджені ДП оснащуються БЗП, які на відміну від конусних завантажувальних пристроїв (КЗП), мають широкі можливості управління як радіальним, так і окружним розподілом шихтових матеріалів [10].

Як показує досвід розробки програм завантаження печей, обладнаних БЗП [10], традиційно порції шихтових матеріалів розподіляють практично по всьому радіусу колошника і з різною циклічністю вивантажують кокс в центральну зону колошника для формування осьової віддушини (зони підвищеної газопроникності). По робочим кутовим положенням лотка шихтові матеріали прийнято розподіляти, як правило, із заданою нерівномірністю, що дозволяє без зміни структури програми завантаження оперативно змінювати рудні навантаження і (або) об'єми матеріалів в зонах, де хід ДП вимагає такої зміни [10, 91]. При такому формуванні програм завантаження забезпечується

укладання матеріалів з мінімальним перерозподілом шихти вздовж радіуса.

Далі представлені результати практичного освоєння програм завантаження на ДП з БЗП [53, 92–94], обраної в якості об'єкта досліджень, що дозволили в умовах нестабільної та низької якості шихтових матеріалів отримати нові знання про вплив режимів завантаження на показники роботи печі, переглянути існуючі підходи при розробці раціональних програм завантаження.

3.1. Розробка програм завантаження доменної печі для умов роботи з нестабільною низькою якістю шихтових матеріалів при малій величині маси подачі

Важливим параметром режиму завантаження ДП є величина маси подачі. Відомі дослідження, спрямовані на вивчення впливу маси подачі на показники роботи ДП, засновані на експериментальному її виборі в залежності від конкретних умов плавки: якості шихтових матеріалів, кількості вдуваного природного газу та інших [95–99]. Як випливає з результатів цих досліджень, при збільшеній масі подачі хід печі набуває периферійний характер, при зменшеній – центральний. Це пов'язано зі зміною кутів нахилу поверхні шихти в печі при зміні величини подачі, які при формуванні поверхні шихти КЗП визначають перерозподіл матеріалів від стінки печі до центру з відповідною зміною розподілу газового потоку по радіусу печі. При формуванні поверхні засипу шихти БЗП, визначальну роль відіграє програма завантаження печі, яка дозволяє при різній масі подачі і рівні засипу забезпечити практично незмінним розподіл рудних навантажень (РН) і об'ємів шихтових матеріалів по радіусу печі. Разом з тим, на печах, обладнаних як БЗП так і КЗП, зменшення маси подачі на 15–20 % зазвичай призводить до збільшення середньої температури на периферії на 50–60 °С і зменшення вмісту CO_2 в колошниковому газі на 1–2 %, що тягне за собою перевитрату коксу. З результатів досліджень, виконаних раніше, випливає також, що обґрунтованого способу розрахунку величини подачі для печей того чи іншого об'єму не існує [92].

На думку іноземних дослідників, ефективна доменна плавка в значній мірі визначається формуванням на

колошнику шарів коксу та залізовмісних матеріалів товщиною не менше 0,5 м. При роботі ДП з малими величинами маси подачі зазначена товщина шарів не забезпечується, а з урахуванням встановленого німецькими дослідниками ефекту проникнення залізовмісних матеріалів при вивантаженні з БЗП на 0,15 м у кокс [100, 101], утворення шарів з розрахункової товщиною менше 0,5 м сприяє ще більшому зменшенню газопроникувності [102].

Реалізовані на ДП з БЗП, обраної в якості об'єкта досліджень, програми завантаження, розроблені відповідно до сформульованих раніше в ІЧМ положень, на початковому етапі роботи печі забезпечували стабільний хід печі та прийнятні техніко-економічні показники доменної плавки, оскільки якість залізородної сировини і коксу при цьому була задовільною [53, 92–94].

З другої половини 2012 р. істотно погіршилася якість шихтових матеріалів. Перехід на високоосновний агломерат (основність по CaO/SiO_2 збільшилася від 1,2 до 2,2 од.) при незадовільному стані обладнання аглофабрики заводу з одночасно низькою якістю аглошихти, сприяв суттєвому збільшенню дрібних фракцій в скіповому агломераті та середньоквадратичного відхилення його основності.

Разом з цим, в порівнянні з початковим етапом експлуатації печі, середньозважене значення показника гарячої міцності (CSR) коксу, зменшилось від 51 % до 43 %, а показника реакційної здатності (CRI) збільшилось від 31 % до 39 %. Ці фактори при відсутності можливості використання промивних матеріалів призвели до збільшення кількості згорілих фурм. Сформовані умови обґрунтовували роботу ДП з малою величиною маси подачі і низьким рівнем засипу (нижче 2,5 м). Маса коксових порцій становила 7,0–8,0 т (при максимально можливій 10,5 т), що відповідало товщині шару коксу менш 0,40 м. Такі параметри завантаження дозволяли в цей період мінімізувати верхні «підвисання» та забезпечити центральний газорозподіл. Однак, інтенсивне горіння повітряних фурм, зниження продуктивності печі і висока витрата коксу в таких умовах роботи печі зумовили перегляд підходів до розробки раціональних програм завантаження БЗП з пошуком нових, раніше не використовуваних, рішень.

Так, однією з відмінних рис нової програми завантаження стало зменшення (з шести – восьми до п'яти)

кількості робочих кутових положень лотка БЗП при вивантаженні кожної порції циклу завантаження. Це дозволило збільшити товщину шарів шихтових матеріалів на завантажуваних частинах радіусу печі. Крім цього, в запропонованій програмі завантаження, кожна наступна порція циклу завантаження зміщувала умовний «гребінь» шихтових матеріалів відносно умовного «гребеня», сформованого вивантаженням попередньої порції, що направлено на зміну напрямку руху газового потоку.

В табл. 3.1 представлені дві програми завантаження: перша – яка була використана наприкінці 2012 р. (позначена 2012) і друга – реалізована на ДП з початку лютого 2013 р. (позначена 2013).

Для аналізу програм завантаження та оцінки одержуваного з їх використанням розподілу матеріалів по радіусу печі, як правило, використовують загальноприйняті показники розподілу – об'єми і РН за цикл завантаження печі в десяти рівних за площею зонах колошника [10, 11]. Заданий розподіл цих показників по радіусу печі за цикл завантаження можна забезпечити великою кількістю варіантів програм завантаження. При розробці нової програми завантаження для умов роботи ДП з БЗП для аналізу програм з метою виявлення їх характерних ознак і особливостей були використані оригінальні показники [92] оцінки програми завантаження:

– перший показник – положення умовного «гребеня» кожної порції коксу (C_K) і залізовмісних матеріалів ($C_{звм}$) в циклі завантаження. Аналогічний показник, який тільки розраховується в середньому за цикл завантаження, був запропонований авторами роботи [102]. Цей показник якісно характеризує положення центра ваги шару матеріалів по радіусу колошника. Чисельне значення запропонованого показника відображає рівновелику зону перерізу колошника (від 1 до 10), щодо якої концентрується максимальний об'єм матеріалів у шарі. Показник положення умовного «гребеня» кожної порції визначається відповідно до наступного виразу:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{10} i \cdot M_i}{\sum_{i=1}^{10} M_i},$$

де i – номер кутового положення лотка, M – маса матеріалів, які вивантажуються з кутового положення лотка;

Таблиця 3.1. Програми завантаження ДП №3

2012	№ порції											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ кутового положення лотка	Вид матеріалу											
	Розподіл матеріалів по кутових положеннях лотка, %											
	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
10		12		19		17		12		19		17
9		19	8	20	8	17		19	8	20	8	17
8	8	13	16	14	16	13	8	13	16	14	16	13
7	6	15	21	14	21	10	6	15	21	14	21	10
6	6	12	21	12	21	12	6	12	21	12	21	12
5	6	11	21	11	21	14	6	11	21	11	21	14
4	6	11	13	10	13	17	6	11	13	10	13	17
3	6	7					6	7				
2	22						22					
1	40						40					
2013	№ порції											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ кутового положення лотка	Вид матеріалу											
	Розподіл матеріалів по кутових положеннях лотка, %											
	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
10				48						48		
9				20	10	10				20	10	
8			16	15	21	28		26	16	15	21	10
7		25	21	10	27	23		22	21	10	27	28
6		30	21	7	25	23		17	21	7	25	23
5	6	17	25		17	16	6	17	25		17	23
4	12	14	17				12	18	17			16
3	12	14					12					
2	30						30					
1	40						40					

– другий показник – кількість робочих кутових положень лотка під час вивантаження коксу (N_k) і залізовмісних матеріалів ($N_{зм}$) в циклі завантаження. Даний показник був запропонований авторами роботи [102], він відображає відносне розтягування об'ємів кожної порції по радіусу колошника;

– третій показник – розрахункові РН в десяти рівних за площею зонах колошника всередині циклу завантаження після вивантаження кожної пари порцій коксу і залізовмісних матеріалів (далі після вивантаження кожної подачі). За допомогою цього показника можлива оцінка зміни РН в

кожній із зон всередині структури стовпа шихти, сформованої вивантаженням циклу завантаження.

За допомогою запропонованих показників виконано порівняльний аналіз програм завантаження: яка була використана у 2012 р. (до погіршення сировинних умов) і реалізованої у 2013 р. (після погіршення сировинних умов).

Для програми завантаження, що використовувалась в 2012 р., показники положення умовного «гребеня» порцій в циклі завантаження склали: для порцій осьового коксу $C_k=3,0$, для інших коксових порцій $C_k=6,3$, для залізовмісних порцій – $C_{зм}=6,9, 7,1$ і $7,5$. Для програми завантаження, реалізованої в 2013 р, показники положення умовного «гребеня» порцій змінюються в більш широкому діапазоні: так, для порцій осьового коксу $C_k=2,1$, для інших коксових порцій $C_k=5,8, 5,9$ та $6,8$, для залізовмісних порцій – $C_{зм}=5,4, 5,9, 6,2, 6,9$ та $8,9$. Таким чином, для програми завантаження, реалізованої в 2013 р., показник $C_{зм}$ змінюється в діапазоні $5,4-8,9$ в порівнянні з його зміною $6,9-7,5$ для програми завантаження, що використовувалась у 2012 р. Це свідчить про те, що рекомендована нова програма завантаження, у порівнянні з попередньою, забезпечує розширення діапазону зміни положення умовного «гребеня» шихтових матеріалів в циклі завантаження.

Показник кількості робочих кутових положень лотка в циклі завантаження для програми завантаження, що використовувалась у 2012 р, склав для коксу $N_k=6-8$, для залізовмісних матеріалів $N_{зм}=7-8$. Це призводило до «розтягування» порцій циклу завантаження практично по всьому радіусу колошника, а з урахуванням роботи ДП з БЗП з малою величиною маси подачі, забезпечувало товщину шарів $0,3-0,4$ м. Для програми завантаження, реалізованої в 2013 р., $N_k=N_{зм}=5$, що дозволяє забезпечити на окремих ділянках радіусу колошника концентровані локально зосереджені шари шихтових матеріалів з товщиною більше $0,5$ м при незмінній величині маси подачі, і збільшити газопроникність за рахунок зменшення кількості різко окреслених меж різнорідних шарів. На рис. 3.1 представлені графіки зміни розрахункових висот шарів по радіусу печі після вивантаження трьох порцій залізовмісних матеріалів в циклі завантаження (№ 2, № 4 та № 8) для двох розглянутих програм завантаження (позначені 2012 і 2013). Як видно з графіків, реалізована у 2012 р.

програма завантаження практично не забезпечувала висоту шару, що перевищує 0,5 м, в той час як програма завантаження, реалізована в 2013 р. забезпечує висоту шару 0,6–0,7 м на різних ділянках радіусу печі, що змінюють своє становище від порції до порції в циклі завантаження. Розрахункові висоти шарів та РН отримані за допомогою, розробленої в ІЧМ і адаптованої до умов ДП з БЗП, модельної системи для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження [89]. На рис. 3.2 представлені в порівнянні розрахункові структури стовпа шихтових матеріалів для двох програм завантаження.

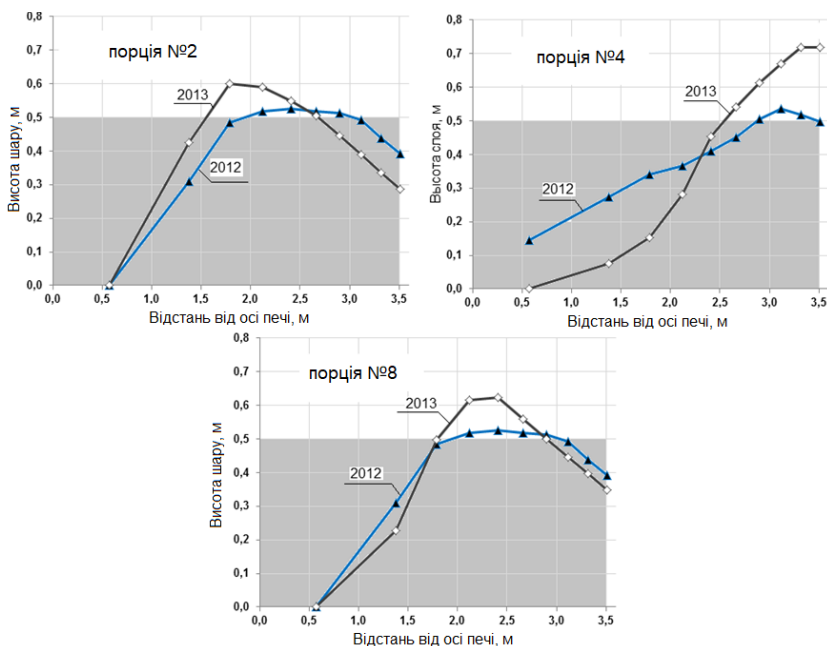


Рис. 3.1. Зміна висоти шарів по радіусу печі після вивантаження заліззовмісних порцій для програм завантаження 2012 і 2013 рр.

Аналіз розподілу розрахункових РН в десяти рівних за площею зонах колошника всередині циклу завантаження після вивантаження кожної подачі для програми завантаження, що використовувалась в 2012 р. (рис. 3.3 а) і встановленої у 2013 р. (рис. 3.3 б) показав, що реалізована у 2013 р. програма

завантаження характеризується великим діапазоном зміни РН в кожній зоні колошника від подачі до подачі. Особливо характерна периферійна зона, де діапазон зміни РН для програми завантаження, запропонованої у 2013 р, становить від 2,35 т/т до 9,66 т/т ($\sigma_{РН}=2,64$ т/т) в порівнянні з діапазоном зміни РН для програми завантаження, реалізованої у 2012 р., – від 3,51 т/т до 5,28 т/т ($\sigma_{РН}=0,63$ т/т). Вказана особливість, при використанні коксу низької якості, на думку авторів, сприяє підвищенню газопроникності та збільшенню ступеня використання відновлювальної здатності газів за рахунок збільшення часу перебування газів в печі.

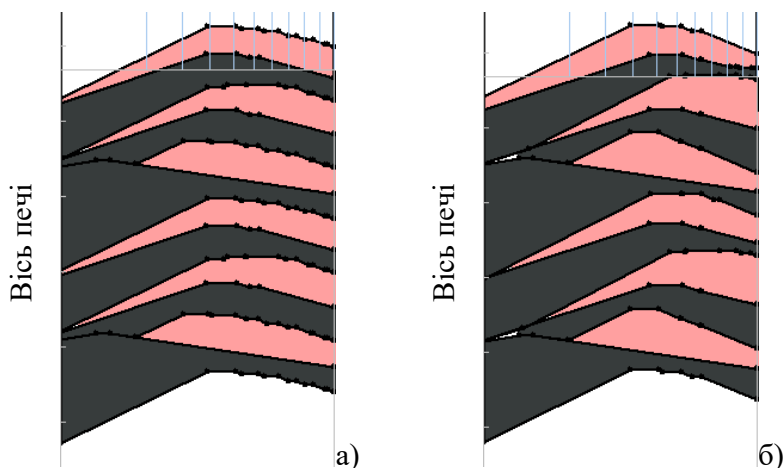


Рис. 3.2. Розрахункові структури стовпа шихтових матеріалів для програм завантаження 2012 р. (а) та 2013 р. (б)

На першому етапі після зміни програми завантаження робота ДП характеризувалася нестабільним хімічним нагріванням чавуну зі зміною вмісту кремнію від 0,21 до 1,01 % ($[Si]_{ср}=0,62$ %) та вмісту сірки від 0,026 до 0,269 % ($[S]_{ср}=0,072$ %), що може пояснюватися оновленням коксової насадки при перебудові стовпа шихти в печі. Після чого, сход шихти став більш стабільним без «підстоїв» і «обривів», температура периферійних газів після стабілізації робочого рівня засипу (1,3 м) зменшилася на 65 °С (при збільшенні в шихті кількості гарячого агломерату, це дозволило надалі продовжити термін служби лотка БЗП).

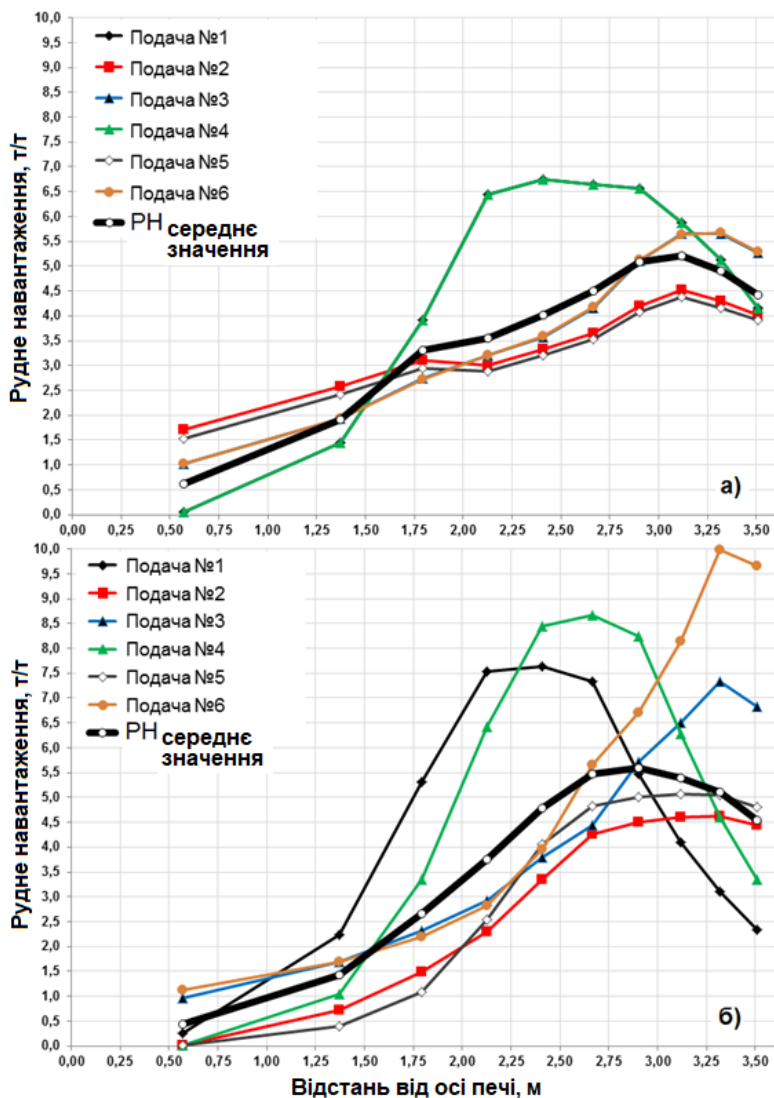


Рис. 3.3. Розподіл розрахункових рудних навантажень по радіусу колошника всередині циклу завантаження після вивантаження кожної подачі для програм завантаження, що використовувалась в 2012 р. (а) і встановленої у 2013 р. (б)

Температура колошникового газу збільшилася незначно від 295 °С до 310 °С. Розподіл по радіусу печі температур поверхні засипу шихти за показаннями стаціонарних термозондів характеризувався стабільним центральним газорозподілом і поступовим зменшенням температур в проміжній та периферійній зонах печі (рис. 3.4). Після зміни програми завантаження припинилося інтенсивне горіння фурм, стала можливою робота без верхніх «підвисань» з рівнем засипу 1,3 м, яка супроводжувалася відносно стабільним верхнім перепадом тиску, що складав близько 0,18 аті. Для приведення ДП до однакових умов роботи до і після зміни програми завантаження був виконаний розрахунок впливу технологічних факторів на питому витрату коксу [103], який показав, що приведена витрата коксу після зміни програми завантаження зменшилася на 2% [53, 92, 104, 105].

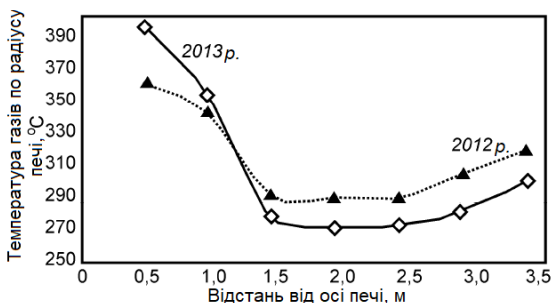


Рис. 3.4. Розподіл температур над поверхнею засипу по радіусу печі до і після зміни програми завантаження

Таким чином, розроблена по вищеописаному підходу програма завантаження, як основна, успішно використовувалася на ДП з лютого 2013 р. з деякими коригуваннями, спрямованими на забезпечення розвиненого центрального газорозподілу при зміні сировинних умов. Також, на підставі даної програми, були розроблені і використовувалися скориговані варіанти програми завантаження: варіант для роздувки ДП після планових зупинок, який відрізняється від основної програми більш «розкритою периферією» (зменшеними рудними навантаженнями в периферійній зоні), а також варіант програми завантаження для підвищеного (понад 50 %) вмісту

окастишів в шихті, що забезпечує мінімальну їх концентрацію в периферійній і центральній зонах колошника.

3.2. Вибір раціональних кутів нахилу лотка БЗП при зміні конфігурації футерівки лотка

У квітні та жовтні 2013 р., для збільшення терміну служби лотка БЗП, фахівцями заводу було прийнято технічне рішення поетапного збільшення довжини ребристо-клітинного футерування. На рис. 3.5 показано креслення лотка з вказанням періодів зміни меж ребристо-клітинної та гладкої частин лотка.

В період роботи ДП жовтень 2013 р. – червень 2014 р. довжина гладкої (кінцевої) частини лотка становила 520 мм, що відповідає 15 % довжини лотка. При пуску ДП, в листопаді 2011 р. довжина гладкої частини становила 1500 мм (50 % довжини лотка). Таким чином, при зміні футерівки лотка в 2013 р. збільшився коефіцієнт тертя матеріалів на лотку, що призвело до необхідності зміни робочих кутів його нахилу, для потрапляння центру потоку у відповідну кутовому положенню лотка кільцеву зону колошника. З урахуванням зміни співвідношення гладкої та ребристо-клітинної частин футерівки лотка розрахунковим способом були визначені і встановлені на ДП на початку жовтня 2013 р. нові робочі кути нахилу лотка [105].

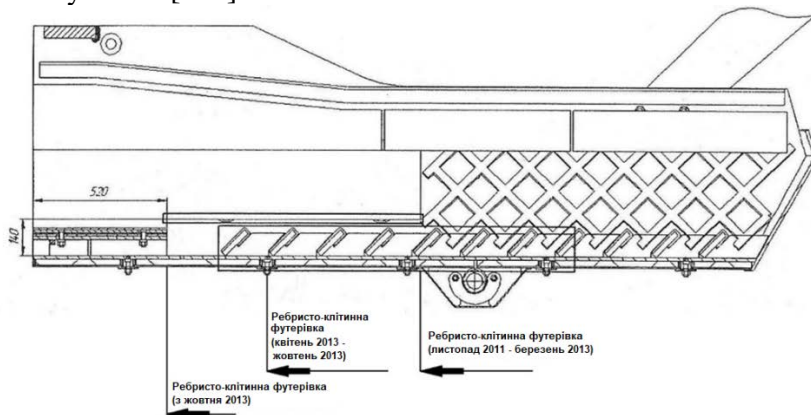


Рис. 3.5. Зміни довжини ребристо-клітинного футерування лотка БЗП ДП в квітні та в жовтні 2013 р.

Для перевірки розрахункових кутів нахилу лотка, авторами книги на зупинці ДП були виконані дослідження з визначення характеристик потоку шихтових матеріалів при вивантаженні їх в піч. Їх визначення було виконано по розташуванню точок зустрічі потоку з плитами колошникового захисту, зафіксованих за допомогою мірних дерев'яних рейок. Результати досліджень показали правильність обраних розрахунковим способом кутів нахилу лотка і стали підставою для подальшого їх використання в АСУ завантаженням ДП.

Конструкція нового лотка, встановленого після капітального ремонту 3-го розряду в червні 2014 р. знову зазнала змін, так, довжина гладкої частини лотка була збільшена, в порівнянні з лотком, який використовувався раніше, і складала 930 мм (31 % довжини лотка). Збільшення гладкої частини лотка пов'язано з його виготовленням за проектом квітня 2013 р. (рис. 3.5). Отже, чергова зміна конструкції лотка призвела до зменшення коефіцієнта тертя матеріалів на лотку, що зумовило проведення передпускових досліджень характеристик потоку шихтових матеріалів, що вивантажуються з лотка, які були виконані при завантаженні задувочної шихти після проведення у червні 2014 р. капітального ремонту 3-го розряду з шоткретуванням шахти ДП.

Результати виконаних замірів параметрів потоку коксу по розташуванню точок зустрічі потоку з плитами колошникового захисту та сформованого гребеня залізовмісних матеріалів дозволили уточнити розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в робочому просторі печі та визначити кути нахилу лотка, що забезпечують необхідний діапазон регулювання розподілу шихтових матеріалів на колошнику.

Для формування гребеня шихтових матеріалів на поверхні засипу, останні шість порцій задувочної шихти вивантажували в одне кільце з шостого кутового положення лотка. Розрахункова структура шарів останніх 12 порцій задувочної шихти представлена на рис. 3.6. Кут нахилу лотка під час вивантаження цих порцій становив 28,7–30,84°. Чотири порції склалися з суміші агломерату та окатишів масою 15,5 т, співвідношення агломерату та окатишів 50 %/50 %, дві порції склалися з коксу масою 10 т.

Необхідність формування явно вираженого гребеня була продиктована впевненим визначенням точки зустрічі потоку шихти з поверхнею засипу при заданому куті нахилу лотка для подальшого коригування кутів нахилу лотка в АСУ завантаженням. Вимірює за допомогою геодезичного обладнання поверхня засипу шихти по перерізу монтажний люк–механічний зонд представлена на рис. 3.7.

Розрахункові значення кутів нахилу лотка, визначені на підставі експериментальних даних, які представлено на рис. 3.6 та 3.7, для різних значень рівня засипу з кроком 0,1 м, були встановлені в АСУ завантаженням ДП.

Таким чином, результати вимірів параметрів потоку шихтових матеріалів по розташуванню точок його зустрічі з плитами колошникового захисту та сформованого гребеня залізовмісних матеріалів, виконаних у 2011 та 2014 рр. дозволили визначити траєкторії руху шихтових матеріалів в робочому просторі печі і, відповідно, робочі кути нахилу лотка, що забезпечують необхідний діапазон регулювання розподілу шихтових матеріалів на колошнику [105].

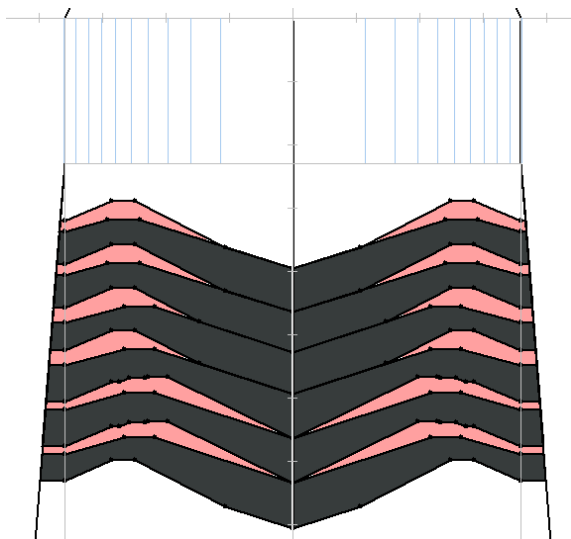


Рис. 3.6. Розрахункова структура шарів останніх 12 порцій задувочної шихти

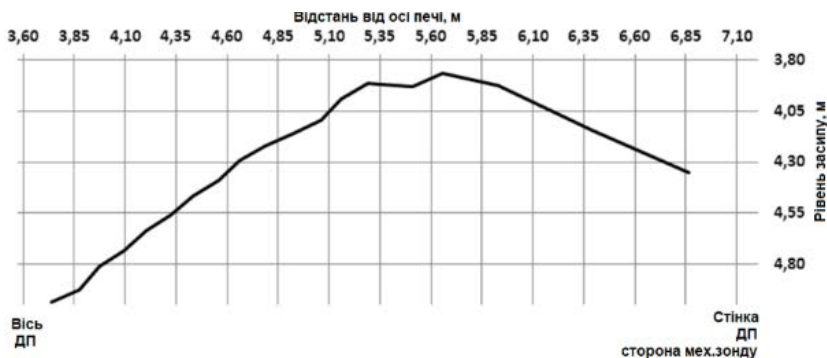


Рис. 3.7. Профіль поверхні засипу шихти, який вимірюється після вивантаження останньої порції задувочної шихти

При цьому, заміри 2011 і 2014 рр. виконувалися при різних конструкціях лотка БЗП. Так, в жовтні 2011 р. перед задувкою ДП після реконструкції, конфігурація лотка БЗП представляла собою рівне співвідношення гладкої та ребристо-клітинної (що самофутерується) частин: 50/50 % (1500 мм+1500 мм). В процесі подальшої експлуатації, для збільшення терміну служби лотка БЗП, було прийнято рішення збільшувати довжину ребристо-клітинного футерування [105]. Так, після шоткретування шахти ДП, в червні 2014 р. був встановлений лоток зі співвідношенням гладкої та ребристої частин: 31/69 % (930 мм+2070 мм), лоток даної конфігурації використовувався до зупинки ДП у вересні 2016 р. Крім цього, використовували конфігурації лотка: 25/75 % (750 мм+2250 мм) та 17/83 % (500 мм+2500 мм).

У вересні 2016 р., після ремонту ДП з шоткретуванням шахти, був встановлений лоток нової конструкції (п'ятий варіант конфігурації футерівки) зі співвідношенням гладкою і ребристою частин: 29/71 % (860 мм+2140 мм). Крім цього в конструкції лотка (вересень 2016 р.), на відміну від конструкції 2014 р. (рис. 3.8), бічні направляючі (на рисунку показані стрілками) були покриті клітинною футерівкою, що вимагало проведення нових експериментальних досліджень.

Авторами книги при завантаженні задувочної шихти 22.09.2016 р. були виконані вимірювання по визначенню точок зустрічі потоку коксу з дерев'яними рейками, які були встановлені через два газовідводи (№№ 1 та 2) на плити колошникового захисту (рис. 3.9). Вимірювання виконувалися

під час вивантаження трьох порцій задувочної шихти, представлених в табл. 3.2.

Результати виконаних замірів параметрів потоку коксу по розташуванню точок зустрічі потоку з дерев'яними рейками, встановленими на плитах колошникового захисту, дозволили уточнити розрахункові траєкторії руху шихтових матеріалів в робочому просторі печі та визначити кути нахилу лотка, що забезпечують необхідний діапазон регулювання розподілу шихтових матеріалів на колошнику. Значення кутів нахилу лотка, визначені на підставі розрахунків та експериментальних даних для різних значень рівня засипу з кроком 0,1 м, були встановлені в АСУ завантаження ДП 23.09.2016 р.

Таким чином, для п'яти конфігурацій лотка, які було використано на ДП №3, визначені і передані доменному цеху значення кутів нахилу лотка, визначені на підставі розрахунків та експериментальних даних для робочих рівнів засипу з кроком 0,1 м. Значення робочих кутів нахилу лотка БЗП, для різних його конфігурацій, включені в технологічну інструкцію по веденню доменної плавки.

Таблиця 3.2. Дослідницькі порції задувочної шихти

№	Дата и час вивантаження	Порція, маса (т)	Початкове гаражне положення лотка по окружності, град	Кут нахилу лотка, град	Кут відкривання нижнього шихтового затвору, %
1	22.09.2016 р. 13 ⁵⁵	Кокс, 10,6 т	111	46,00	45,6
2	22.09.2016 р. 16 ²⁵	Кокс, 10,8 т	343	47,00	46,3
3	22.09.2016 р. 17 ⁰⁸	Кокс, 10,5 т	307	46,74	71,1

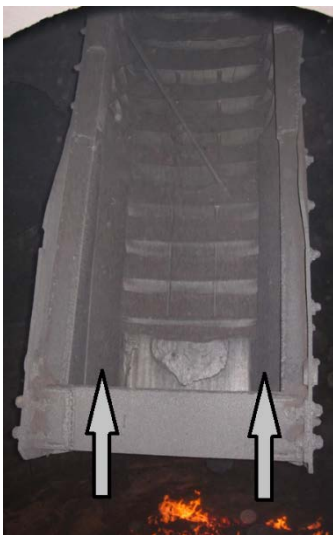


Рис. 3.8. Конфігурація лотка (2014 р.) з гладкими бічними напрямними

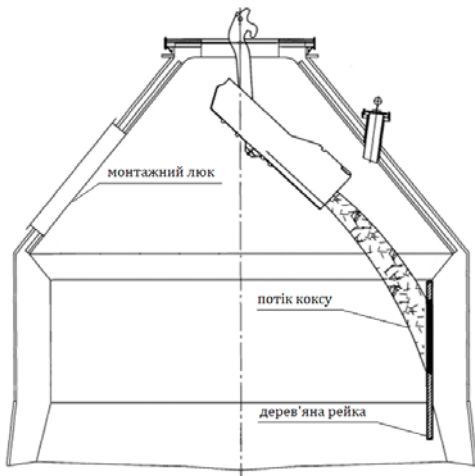


Рис. 3.9. Схема визначення меж траєкторій потоку шихтових матеріалів по залишеному сліду на дерев'яній рейці

У перспективі, для ефективного використання БЗП, необхідно контролювати фактичні співвідношення гладкої та ребристо-клітинної частин конструкції лотка при його заміні, та своєчасно в АСУ вибирати відповідну таблицю кутів нахилу з наявного переліку. При виготовленні лотка нової конструкції, повинні надаватись визначені розрахунковим способом робочі кути нахилу лотка, які, в подальшому, уточнюються в результаті проведення безпосередніх вимірювань.

3.3. Розробка заходів з оперативного управління периферійним газовим потоком, в тому числі, при переході на технологію вдунання пиловугільного палива

Як відомо, надмірно розвинений периферійний газовий потік виникає при роботі печі з режимами завантаження, що розпушують периферію, збільшенні частки дрібної фракції в

ЗВМ, використанні маломіцного коксу та недостатній кількості дуття. Надмірний периферійний потік газів характеризується низьким вмістом CO_2 у стінки печі (до 2–4 %) і високим (10–12 %) в осьовій зоні. Такий газорозподіл погіршує використання теплової та хімічної енергії газів, збільшує питому витрату коксу і зменшує продуктивність печі. Тривала робота в цих умовах призводить до значного зменшення активності осьової зони шахти і горна, сприяє підвищеному зносу футерівки заплечиків і шахти, а також виходу з ладу холодильників та повітряних фурм [61]. Погіршується рівність ходу печі, що супроводжується нерівномірним опусканням шихти з підстоями та обривами її по ходу печі. Нерідко, при захаращені периферії відбувається також утворення канального ходу. Правильна і своєчасна оцінка характеру газового потоку, на підставі спільного аналізу даних візуального спостереження та контрольно-вимірювальної апаратури (термопарі футерівки шахти та периферійного газового потоку, термопарі газовідводів та термозонди, встановлені над поверхнею засипу) – дозволяє досить швидко коригувати хід печі шляхом зміни параметрів режиму завантаження, зберігаючи при цьому стабільність режиму горна. Одними з найбільш ефективних способів завантаження периферії є зменшення маси коксу і збільшення кількості ЗВМ на периферії. Однак, передчасне завантаження периферії ЗВМ, при низькій газопроникності осі, призводить до «підвисання» шихти і примусовим осадкам.

В теперішній час широке застосування отримала технологія вдування ПВП в горни доменних печей. Застосування ПВП на ДП в сучасних шихтових умовах вимагає особливого підходу в управлінні радіальним та окружним розподілом шихти і газів. Практика вдування ПВП показує, що в цьому випадку скоротшується окислювальна зона і виникає надмірно розвинений периферійний газовий потік. Оскільки при вдуванні в горн ДП ПВП зменшується витрата завантажуваного в піч коксу, внаслідок чого погіршується газопроникність шихти, та відбувається перерозподіл потоків газу і з посиленням периферійного газового потоку, зміщуються зони максимальних теплових навантажень по висоті печі в зону розпару, заплечиків, а також першого та другого рядів холодильників низу шахти [106]. Наслідком цього є прогари та руйнування холодильних плит в

найбільш теплонавантажених зонах, що призводить до аварійних ситуацій і додаткових зупинок ДП. Крім цього створюються умови для руйнування футерівки шахти доменної печі і нестійкості гарнісажу. Для збільшення стійкості холодильників розробляються нові конструкції з більш інтенсивним охолодженням. Пропонуються також більш стійкі вогнетриви для низу печі та охолоджувальної частини шахти. Також необхідно додатково використовувати раціональні прийоми управління завантаженням і дуттевими параметрами. Технологічним заходом впливу на надмірно розвинений периферійний газовий потік, при застосуванні технології вдування ПВП, є розробка і реалізація прийомів оперативного управління розподілом шихти по радіусу печі.

Узагальнюючи за багато років типові технологічні інструкції по доменному виробництву заводів і комбінатів колишнього СРСР, для ліквідації надмірно розвиненого периферійного газового потоку, незалежно від типу завантажувального пристрою, здійснюють заходи представлені в табл. 3.3.

На печах обладнаних БЗП, для оперативного управління надмірно розвиненим периферійним газовим потоком, раціональним є використання наступних прийомів:

- 1) Використовувати принцип нерівномірності мас порцій коксу в циклі завантаження зі зменшення маси порцій коксу, що вивантажуються в центральну зону печі і збільшення маси порцій коксу, що вивантажуються в проміжну зону;
- 2) Використовувати прийом перерозподілу коксу від стінки до проміжної і центральної зон печі;
- 3) Використовувати прийом перерозподілу залізовмісних матеріалів від проміжної до периферійної зони печі.

Вищенаведені заходи необхідно здійснювати в наведеної послідовності.

Робота доменної печі з вмістом окатишів в залізорудній частині шихти, що перевищує 50 % сприяє систематичному попаданню їх, під час вивантаження з лотка БЗП, в периферійну зону перерізу колошника, незважаючи на формування матеріалів в скіпах, що передбачає відсутність окатишів в першому (лівому) скіпу [86, 107]. Це викликано особливостями вивантаження матеріалів з бункера БЗП, які полягають в вивантаженні в першу чергу центральної частини

стовпа матеріалів з бункера і більшою, в порівнянні з агломератом, «плинністю» окатишів. Підвищена концентрація окатишів в периферійній зоні колошника призводить до розпушення стовпа шихти, підвищення газопроникності і, як наслідок, до збільшення температури газового потоку [86, 107].

Таблиця 3.3. Заходи з ліквідації надмірно розвиненого периферійного газового потоку

<i>Якщо осьова частина печі не перевантажена:</i>	<i>При перевантаженій осьовій частині печі:</i>
а) зменшити загальний перепад тиску на 0,10–0,15 атм;	а) завантажити додатковий кокс (з одночасним опусканням не менше 4-5 скипів) від впущеного рівня засипу і потім, в залежності від теплового стану горна, компенсувати холості подачі ЗВМ (при наявності, зварювальним шлаком);
б) поступово посилити завантаження периферії залізовмісною шихтою шляхом зміни режиму завантаження;	б) посилити завантаження периферії зміною режиму завантаження;
в) зменшити величину рудної частини подачі (РН);	в) зменшити величину подачі;
г) знизити рівень засипу.	г) зменшити тиск газу під колошником на 0,1–0,2 кг/см ² , при цьому величину загального перепаду тиску треба зберегти;
	д) якщо для вирівнювання ходу печі потрібно знизити інтенсивність плавки – зменшити витрату дуття або концентрацію кисню в дутті на 1,5–2,0 %;
	е) при необхідності провести промивання горна.

Для зменшення концентрації окатишів в периферійній зоні печі раціональним є використання прийому, в якому один або два рази на циклі завантаження залізовмісна порція розділяється на дві, з вивантаженням в піч окремо кожного скіпа – першого (лівого), що містить агломерат або агломерат з добавками і другого (правого), що містить переважно окатиші. У табл. 3.4 представлено розподіл матеріалів по кутовим положенням лотка БЗП порції ЗВМ для базової

програми завантаження, що використовувалася на ДП у 2012 р., і для «розщепленого» (поскіпового) варіанта стосовно базової програми завантаження. Основним принципом створення «розщепленого» варіанту є збереження розподілу по радіусу печі РН незмінним.

Розрахункова структура стовпа шихти на колошнику для «розщепленого» (поскіпового) варіанту програми завантаження представлена на рис. 3.10. Зазначений прийом випробувано на ДП №3 15.11.2012 р. починаючи з 11³⁰. В табл. 3.5 представлена динаміка зміни температури периферійних газів після реалізації «розщепленого» варіанту програми завантаження. Даний прийом в подальшому доцільно використовувати для оперативного зменшення температури периферійних газів, в той же час, слід звернути увагу на недолік цього прийому, який полягає в збільшенні часу циклу завантаження в середньому на 8 хвилин, відтак, раціональним є завантаження другого скіпа в режимі «без міри».

Таблиця 3.4. Розподіл матеріалів за кутовими положеннями лотка БЗП порції ЗРМ для базової програми завантаження і для «розщепленого» (поскіпового) варіанту

БАЗОВИЙ ВАРІАНТ Лівий та правий скіпи		«РОЗЩЕПЛЕНИЙ» ВАРІАНТ			
		Лівий скіп		Правий скіп	
№ кутового положення лотка БЗП	% матеріалів	№ кутового положення лотка БЗП	% матеріалів	№ кутового положення лотка БЗП	% матеріалів
10	19	10	36		
9	20	9	38		
8	14	8	26		
7	14			7	30
6	12			6	26
5	11			5	23
4	10			4	21

Таблиця 3.5. Динаміка зміни температури периферійних газів ($T_{\text{пф}}$) після реалізації «розщепленого» варіанту програми завантаження

Дата і час	$T_{\text{пф}}, ^\circ\text{C}$
15.11.2012 15 ¹²	709
15.11.2012 17 ⁰⁰	714
15.11.2012 19 ⁰⁰	684
15.11.2012 21 ⁰⁰	669
15.11.2012 23 ⁰⁰	655

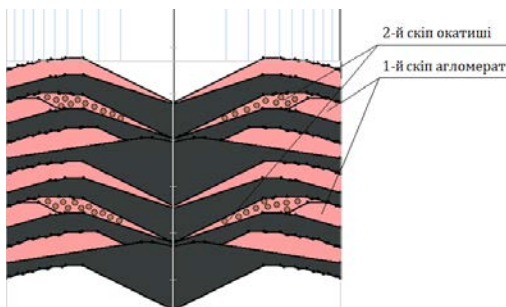


Рис. 3.10. Розрахункова структура стовпа шихти на колошнику після вивантаження циклу завантаження, в якому дві порції ЗРМ вивантажуються поскіпово

3.3.1. Приклад реалізації заходів з оперативного управління периферійним газовим потоком на ДП з БЗП

У травні 2014 р. на ДП з БЗП в програму завантаження був внесений ряд змін, необхідність яких обумовлена слаборозвиненим центральним газорозподілом з переважанням периферійного газового потоку, температура периферійних газів становила понад 450°C . На першому етапі 08.05.2014 р. було змінено розподіл коксових порцій програми завантаження з перерозподілом коксу від стінки печі до проміжної і центральної зон печі, а також збільшено кількість коксу, що завантажується в центр печі.

Після зміни програми завантаження температура периферійних газів зменшилася до 408°C , витрата приведенного к коксу палива (з урахуванням коксового горіха та природного газу) зменшилася з 532 кг/т чавуну (01–07.05.2014 р.) до 523 кг/т чавуну (09–16.05.2014 р.). З 17.05.2014 р. на ДП була зменшена витрата природного газу на $10\text{ м}^3/\text{т}$ чавуну, що призвело до збільшення температури периферійних газів до 600°C і витрати приведенного к коксу палива до 535 кг/т чавуну. Зазначені технологічні зміни зумовили необхідність подальшого коригування програми завантаження.

Наступним етапом зміни режиму завантаження було збільшення товщини коксових шарів в проміжній зоні для поліпшення її газопроникності шляхом перерозподілу мас порцій коксу в циклі завантаження. Зазначений прийом був реалізований в два етапи і спрямований на забезпечення вузької осьової віддушини і більш ефективного перерозподілу газового потоку від периферії до центру печі. Так, на першому етапі – 20.05.2014 р. маси порцій осьового коксу скоригованої 08.05.2014 р. програми завантаження були зменшені від 8,0 т до 7,0 т, а маси інших коксових порцій – збільшені від 8,0 т до 8,5 т. На другому етапі – 22.05.2014 р. маси порцій осьового коксу були зменшені від 7,0 т до 6,5 т, маси інших коксових порцій – збільшені від 8,5 т до 8,75 т. Крім зазначених змін, для збереження стійкого центрального газорозподілу при роботі з більш вузькою осьовою коксовою віддушиною, було змінено розподіл однієї порції залізовмісних матеріалів в циклі завантаження з перерозподілом матеріалів до периферійної зони печі з використанням при вивантаженні цієї порції кутових положень лотка 9-5, замість 8-4.

Після перерозподілу мас порцій коксу циклу завантаження і зміни програми завантаження, температура периферійних газів зменшилася від 600 °С до 484 °С, витрата приведенного до коксу палива зменшилася з 535 кг/т чавуну (17–19.05.2014 р.) до 529 кг/т чавуну (23.05–09.06.2014 р.). Також після внесення змін до програми завантаження 22.05.2014 р. зафіксовано збільшення ступеня використання відновлювальної здатності газів від 41,0 % до 42,6 %.

3.4. Управління окружним розподілом шихтових матеріалів на ДП з БЗП

Одним із резервів збільшення продуктивності доменних печей і зниження питомої витрати коксу є оперативний контроль та управління окружним газорозподілом, а також стабілізація газодинамічного режиму доменної плавки. Рівномірний хід доменної плавки по окружності печі дозволяє забезпечити високі показники за ступенем використання відновлювальної здатності газів та зменшити витрату енергоносіїв. Для доменної плавки неминучим є нерівномірний розподіл газових потоків в доменній печі. Основними причинами нерівномірності

розподілу газових потоків в доменній печі є конструктивні особливості завантажувальних пристроїв і способу підведення дугтя в печі, а також зміни газопроникності окремих частин стовпа шихти в доменній печі [10, 28, 38, 42].

Для забезпечення ефективного управління окружним розподілом шихти (ОРШ) і газів в доменній печі, завантажувальний пристрій повинен забезпечувати можливість реалізації двох режимів – рівномірного розподілу шихти по окружності і спрямованого нерівномірного з подачею збільшених або зменшених об'ємів компонентів шихти в задані сектори колошника.

До кардинальної зміни програми завантаження на досліджуваній ДП в лютому 2013 р. [53, 92] за рекомендаціями авторів книги використовували такі прийоми управління окружним розподілом шихтових матеріалів:

- зміна напрямку обертання лотка БЗП раз в 24 порції, що при завантаженні в піч, в середньому, 8 подач на годину становить один раз в 1,5 години. Цей прийом дозволяє усувати нерівномірності розподілу шихти, які можуть бути утворені по окружності печі під термозондами;

- прийом попарного переступання, при якому кожна наступна пара порцій (порція коксу та ЗРМ) в циклі завантаження, що складається з 12 порцій, починає завантажуватися в піч при проходженні лотком зміщеного по ходу або проти ходу годинникової стрілки на 60° сектора печі по окружності (табл. 3.6, базовий варіант). Цей прийом дозволяє компенсувати окружну нерівномірність шихти, викликану утворенням в печі або незамкнених кілець, або кілець з перекриттям.

Після зміни програми завантаження на ДП існуючий прийом попарного переступання потрібно було скоригувати, оскільки встановлена програма завантаження характеризується утворенням в печі зміщених по радіусу колошника умовних «гребенів» [53, 92], що призводить до утворення в печі концентрованої окружної нерівномірності і, як наслідок, до збільшення розкиду температур периферійних газів. Запропонований алгоритм прийому попарного переступання полягає в тому, що кожна порція матриці завантаження починає розвантажуватися в піч при проходженні лотком шести різних положень по окружності (табл. 3.6, скоригований прийом). Запропонований прийом

функціонує в складі АСУ завантаженням з жовтня 2013 р. Після установки скоригованого прийому істотно зменшився діапазон зміни температур футерівки верхніх горизонтів шахти по окружності ДП (рис. 3.11), так, за період жовтень 2013 р. – травень 2014 р. середньоквадратичне відхилення температур складо 51 °С, в порівнянні з 79 °С в попередньому періоді: квітень 2013 р. – вересень 2013 р.

Таблиця 3.6. Алгоритми прийому попарного переступання

№ порції	Вид матеріалу	Положення лотка, при проходженні яких починається вивантаження матеріалів в піч						
		Базовий варіант прийому попарного переступання	Скоригований прийом попарного переступання					
			Цикл №1	Цикл №2	Цикл №3	Цикл №4	Цикл №5	Цикл №6
1	Кокс	30	30	330	270	210	150	90
2	ЗВМ	30	30	330	270	210	150	90
3	Кокс	90	90	30	330	270	210	150
4	ЗВМ	90	90	30	330	270	210	150
5	Кокс	150	150	90	30	330	270	210
6	ЗВМ	150	150	90	30	330	270	210
7	Кокс	210	210	150	90	30	330	270
8	ЗВМ	210	210	150	90	30	330	270
9	Кокс	270	270	210	150	90	30	330
10	ЗВМ	270	270	210	150	90	30	330
11	Кокс	330	330	270	210	150	90	30
12	ЗВМ	330	330	270	210	150	90	30

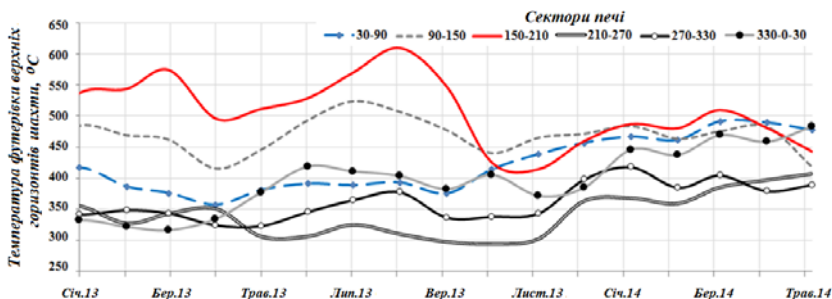


Рис. 3.11. Розподіл температур футерівки верхніх горизонтів шахти по окружності ДП до та після реалізації скоригованого способу управління ОРШ

3.5. Завантаження задувочної шихти після проведення капітального ремонту з шоткретуванням шахти

Для збільшення міжремонтного періоду експлуатації ДП, щоб уникнути пошкодження футерівки шахти після її шоткретування при завантаженні задувочної шихти необхідно виключити потрапляння потоку матеріалів безпосередньо на бетонну поверхню шахти. Для цього при розробці програми завантаження задувочної шихти повинні вибиратися відповідні цій вимозі траєкторії завантаження матеріалів з лотка БЗП [105]. Також, для забезпечення прогріву футерівки шахти ДП в роздувочний період, програма завантаження задувочної шихти повинна характеризуватися зменшеним рудним навантаженням в периферійній зоні ДП для забезпечення помірно розвинутого периферійного газорозподілу. По досягненню рівня засипу 8,0 м, для зменшення глибини осьової воронки, в процесі завантаження необхідно здійснювати вивантаження коксу 100 % в 1-ше кутове положення, один раз у 5 подач. Оскільки траєкторії руху шихти в робочому просторі ДП і кути нахилу лотка БЗП розроблені для діапазону зміни рівня засипу 0,0–5,0 м з кроком 0,1 м, то до досягнення рівня засипу 5,0 м, кути нахилу лотка БЗП використовуються для рівня засипу 5,0 м. У табл. 3.7 представлені програми завантаження задувочної шихти, що відповідають сформульованим вище вимогам.

Програми завантаження задувочної шихти, що представлені в табл. 3.7, внесені пунктом доповнення до технологічної інструкції по доменному виробництву в розділ задувки доменної печі, обладнаної БЗП, після проведення капітального ремонту з попередньою видувкою печі до рівня 15 м і нижче.

Таблиця 3.7. Програми завантаження задувочної шихти

Кутове положення лотка	до рівня засипу 18 м		до рівня засипу 16 м		до рівня засипу 12 м		до рівня засипу 10 м	
	КОКС	ЗВМ	КОКС	ЗВМ	КОКС	ЗВМ	КОКС	ЗВМ
	Розподіл матеріалів за кутовими положеннями лотка, %							
8								
7								
6								
5							20	
4					25		20	33
3			33		25	50	20	33
2	50	100	33	100	25	50	20	34
1	50		34		25		20	

Кутове положення лотка	до рівня засипу 8 м		до рівня засипу 6 м		до рівня засипу 3 м	
	КОКС	ЗВМ	КОКС	ЗВМ	КОКС	ЗВМ
	Розподіл матеріалів за кутовими положеннями лотка, %					
8					25	
7			16		25	25
6	20		16	33	25	25
5	20	33	16	33	25	25
4	20	33	16	34		25
3	20	34	16			
2	20		20			
1						

3.6. Особливості поведінки шихтових матеріалів в об'ємі печі та вибір раціональних режимів завантаження при освоєнні технології вдування пиловугільного палива

3.6.1. Дослідження процесу формування рідких фаз при вдуванні пиловугільного палива в змінних шихтових умовах⁵

Теоретичні дослідження, розрахунки, промисловий досвід переважної більшості доменних цехів показують, що одним з найважливіших елементів технології доменної плавки з застосуванням ПВП є забезпечення максимальної газифікації ПВП в межах фурменної зони [1, 108]. Незважаючи на успіхи в підготовці ПВП до доменної плавки, поліпшенню вузлів вводу, вдосконалення технології спалювання ПВП, частина його проходить через стадію неповного згорання в межах фурменної зони, погіршуючи дренажну здатність горна. Аналіз літературних даних та досліджень ІЧМ щодо впливу ПВП на хід доменної плавки вказує, що вміст вуглецю в частково згорілому паливі може залишатися на рівні 5–15 %, що спільно із золою ПВП, становить 15–20 % від маси вдуваного пилу [109–111]. Основна частина незгорівшого ПВП виноситься під зону в'язко-пластичного стану (по перерізу печі) в район зрізу фурменного вогнища.

Напередодні та в період освоєння ПВП на Єнакієвському металургійному заводі склалися складні шихтові та організаційні умови [112–114]. Через організаційні складнощі поставки шихтових матеріалів відбувалися нерегулярно, обумовлюючи необхідність відпрацьовувати режими роботи ДП зі змінними продуктивністю та кількісним складом компонентів шихти. При цьому, в цей період, вміст в шихті окатишів змінювався в межах від 10 до 85 %, обумовлюючи необхідність змінювати основність агломерату в межах від 1,6 до 2,2 од., відповідно.

⁵ Автори вдячні к.т.н., с.н.с. О.С. Нестерову за постановку цієї задачі та виконання досліджень

Перехід на технологію доменної плавки з застосуванням ПВП відобразився не тільки на витраті коксу та виході кінцевого доменного шлаку, а й призвів до змін його фізико-хімічних властивостей, зокрема, збільшення гетерогенності. Тому дослідження процесів формування первинних, проміжних і кінцевих шлакових розплавів з різних видів залізорудної сировини при застосуванні ПВП в доменній плавці є важливим напрямом, що дозволяє на базі фізико-хімічних особливостей різних матеріалів сформулювати вимоги до їх розподілу по перерізу колошника ДП.

В лабораторних умовах була проведена проплавка різних видів залізорудної сировини на коксовій насадці з різним ступенем засміченості частками ПВП [111]. Аналіз показників високотемпературних властивостей агломерату, окатишів, кускових і марганцевих руд, а також їх сумішей, виявив значну відмінність складу та властивостей первинних шлакових і метало-вуглецевих розплавів в процесі відновлювально-теплової обробки.

На рис. 3.12 графічно представлено зміни температури початку фільтрації рідких фаз через коксову насадку ($T_{нф}$, °C), маси залишку розплаву в шарі коксу ($M_{зал}$, %) і вмісту в ньому оксиду заліза (FeO , %) в залежності від основності залізорудної сировини. З рис. 3.12 видно, що при підвищенні основності залізорудної сировини температура початку фільтрації рідких фаз через коксову насадку збільшується, маса первинного шлакового розплаву і вміст оксиду заліза в ньому знижується. Залишок розплаву в шарі коксу, як і в'язкість первинних розплавів, збільшується.

Дослідження показали, що при проплавці окатишів відділяється 25–35 % первинного шлакового розплаву з вмістом в ньому 42–64 % оксиду заліза, потім відбувається спільне відділення металу та шлаку і на коксовій насадці залишається незначна (6,0–8,0 %) кількість розплаву, що залишився в шарі коксу (рис. 3.13 і 3.14).

При проплавці суміші агломерату та окатишів близької основності або агломерату основністю 1,0–1,2 од. на початку через стадію первинного шлакоутворення проходить 12–15 % матеріалу, потім відбувається спільне відділення первинного шлаку та метало-вуглецевого розплаву. Залишок розплаву в шарі коксу підвищується до 10,0–14,0 %. При підвищенні основності агломерату до 1,50–1,65 од. формування і

фільтрація шлакового і метало-вуглецевого розплаву через коксову насадку проходять спільно. Залишок розплаву в шарі коксу може підвищуватися до 18–20 %.

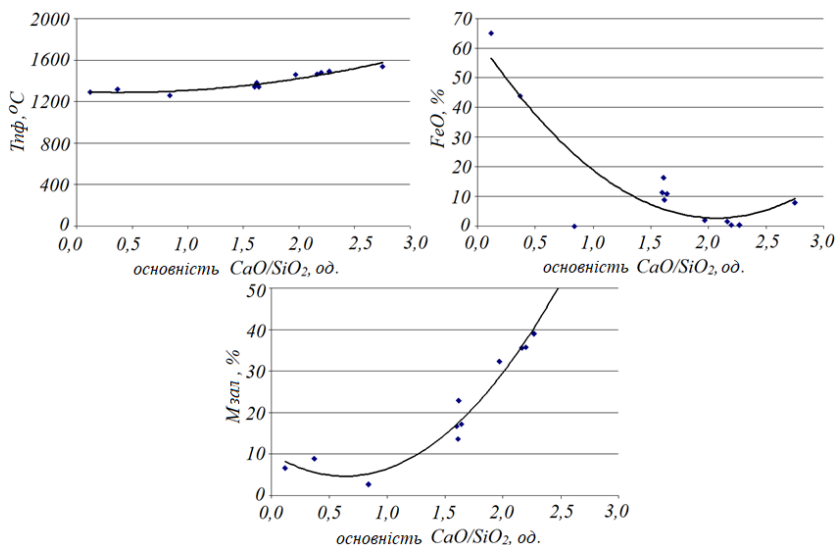


Рис. 3.12. Зміна високотемпературних властивостей залізорудних матеріалів при зміні основності

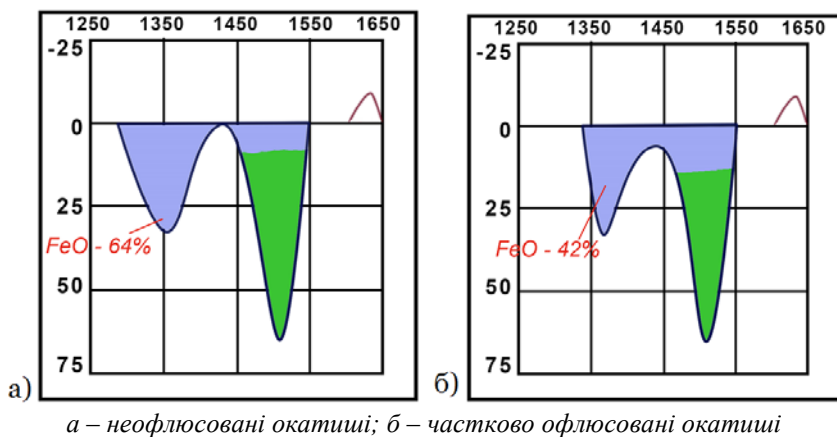


Рис. 3.13. Динаміка фільтрації рідких продуктів плавки через коксову насадку при використанні в шихті окатишів

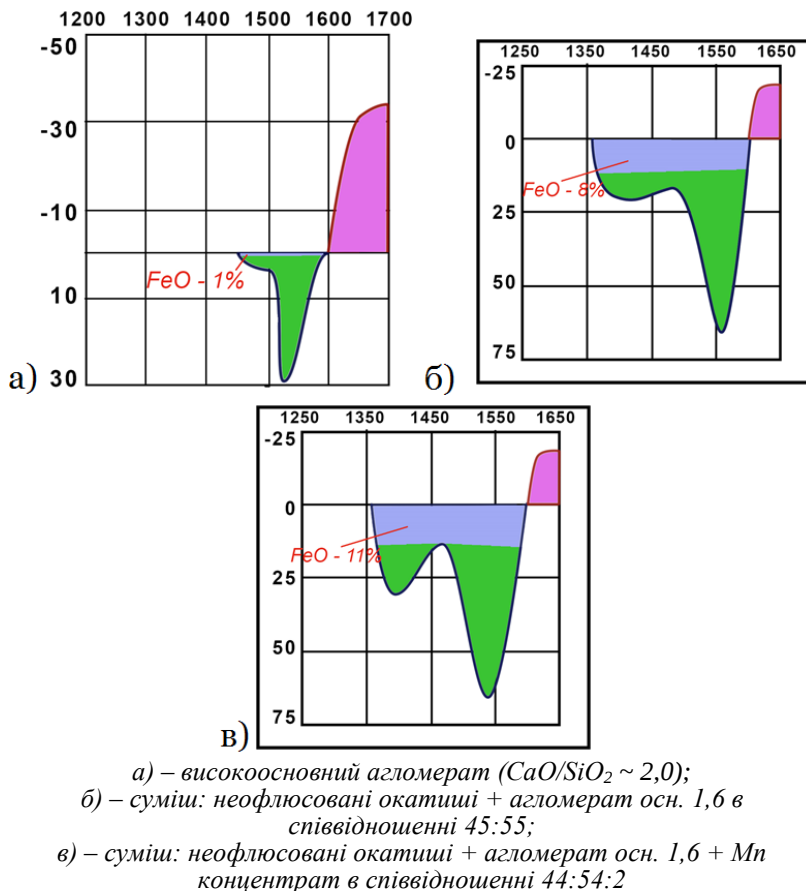


Рис. 3.14. Динаміка фільтрації рідких продуктів плавки через коксову насадку при використанні в шихті окатишів в суміші з агломератом та Mn концентратом

Розплав високоосновного агломерату ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 \geq 2,0$ од.), що профільтрувався через коксову насадку, практично повністю складається з метало-вуглецевого розплаву, шлакова складова, незважаючи на перегрів матеріалу до 1600°C , практично вся залишається в шарі коксу. В температурному діапазоні $1540\text{--}1600^\circ\text{C}$ витікає близько 25 % від маси матеріалу, який практично повністю

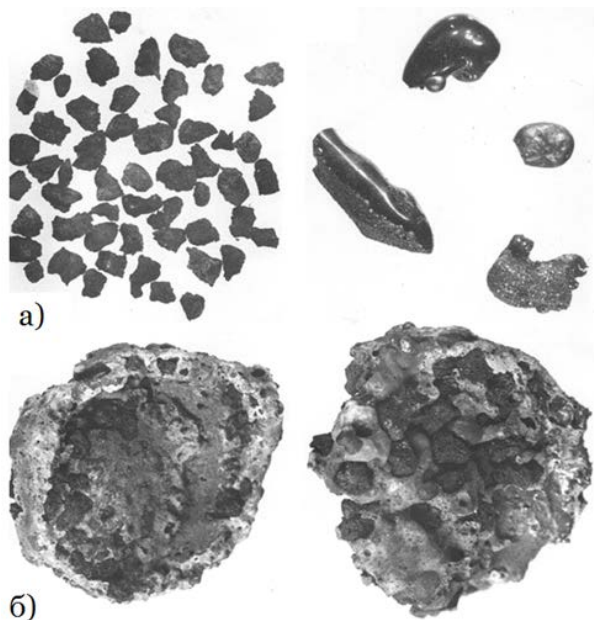
складається з метало-вуглецевого розплаву. Немагнітної складової в розплаві було менше 2,0 % (рис. 3.14 і 3.15). На рис. 3.15 представлений характерний стан коксової насадки при проплавці різних видів залізорудної сировини.

Попадання часток не в повному обсязі згорілого палива в первинні і проміжні розплави з високоосновних матеріалів підвищує гетерогенність шлакового розплаву і зміщує область температур фільтрації рідких фаз через коксову насадку на 25–50 °С, розширюючи інтервал в'язко-пластичного стану матеріалів в ДП і збільшує ймовірність захаращення горна неплавкими масами [109]. За дослідженнями ІЧМ в'язкість первинних, проміжних і кінцевих шлакових розплавів при попаданні від 4 до 7 % озолоного ПВП від маси розплаву збільшує його в'язкість на 8–15 % від базового рівня.

При регулюванні розподілу шихтових матеріалів по радіусу печі, при вдуванні в горн ПВП, для досягнення оптимальних техніко-економічних показників плавки необхідно виключити локалізацію окремих видів залізорудної сировини по перерізу колошника доменної печі та, розподілом компонентів залізорудної частини шихти по перерізу колошника, забезпечити підвищену концентрацію низькоосновної сировини в зоні локалізації частинок ПВП.

На підставі цих принципів, а також досліджень особливостей розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу, запропонована і реалізована програма завантаження, принцип якої описаний далі в розділі 3.6.2. Моделювання процесів поведінки шихтових матеріалів при відновно-тепловій обробці (в зоні температур 1050–1600 °С), формування порцій шихтових матеріалів, розподіл їх на колошнику дозволили сформувати задані співвідношення матеріалів по перерізу колошника, щоб забезпечити раціональний газорозподіл в ДП.

Дослідно-промислове випробування скоригованого режиму завантаження в період освоєння ПВП в змінних шихтових умовах показало, що шляхом раціонального розподілу часток агломерату та окатишів по перерізу колошника можливо знижувати в'язкість шлакового розплаву на 30–40 % від базового рівня, збільшуючи при цьому технологічну стійкість доменної плавки.



*а) частково-офлюсовані окатиші;
б) високоосновний агломерат ($\text{CaO/SiO}_2 - 1,65 \div 2,2$ од.)*

Рис. 3.15. Характерний стан коксової насадки при проплавці різних видів залізорудної сировини

3.6.2. Вибір раціональних режимів завантаження при освоєнні технології вдування пиловугільного палива

На основі викладеного в розділі 3.1 підходу, розроблені програми завантаження для умов використання технології вдування ПВП, яка реалізована на ДП Єнакієвського металургійного заводу у 2016 р. Основною зміною програми завантаження при використанні ПВП стало зменшення кількості робочих кутових положень лотка БЗП при вивантаженні коксу, від п'яти до чотирьох, і збільшення, від п'яти до шести, кількості робочих кутових положень під час вивантаження порцій залізозмісних матеріалів. Ці зміни обумовлені роботою ДП зі збільшеним середнім рудним навантаженням при вдуванні ПВП і спрямовані як на забезпечення достатньої газопроникності шарів шихтових

матеріалів по висоті стовп, так і на поліпшення взаємного перетікання газів між центральною та периферійною зонами печі.

На ДП з КЗП освоєння технології вдування ПВП було розпочато з 01.03.2016 р, на ДП з БЗП – з 20.04.2016 р. Основні конструктивні характеристики і перелік основних засобів контролю ДП з КЗП і ДП з БЗП представлені на рис. 3.16 і в табл. 3.8.

Таблиця 3.8. Основні конструктивні характеристики і засоби контролю ДП з КЗП і ДП з БЗП

Найменування	ДП с КЗП	ДП с БЗП
Пуск після реконструкції, дата	29 червня 2007 р.	18 жовтня 2011 р.
Корисний об'єм, м ³	1513	1719
Шоткретування шахти після пуску, дата	жовтень 2009 р., липень 2011 р., листопад 2013 р., листопад 2016 р.	червень 2014 р., вересень 2016 р.
Радіус колошника, м	3,40	3,60
Завантажувальний пристрій	Клапанний двоконусний	Однотрактний безконусний фірми “P.Wurth”
Висота циліндричної частини колошника, м	2,70	2,30
Висота шахти, м	16,40	16,20
Кількість чавунних льоток, шт	2	2
Кількість повітряних фурм, шт	20	24
Стационарні термозонди над поверхнею засипу шихти, шт	4	4
Електромеханічні зонди, шт	2	1
Радіолокаційні рівнеміри, шт	0	2
Газовідводи, шт	4	4
Термопары периферійного газового потоку, шт	16	16
Термопары футерівки шахти, розпару і заплечиків, шт	40+16*)	56
Термопары тіла холодильників шахти, шт	30	–

*) – відновлені в період останнього ремонту з шоткретуванням шахти, 16 термопар додатково продубльовані в теплонапружених зонах (над другою чавунною льоткою

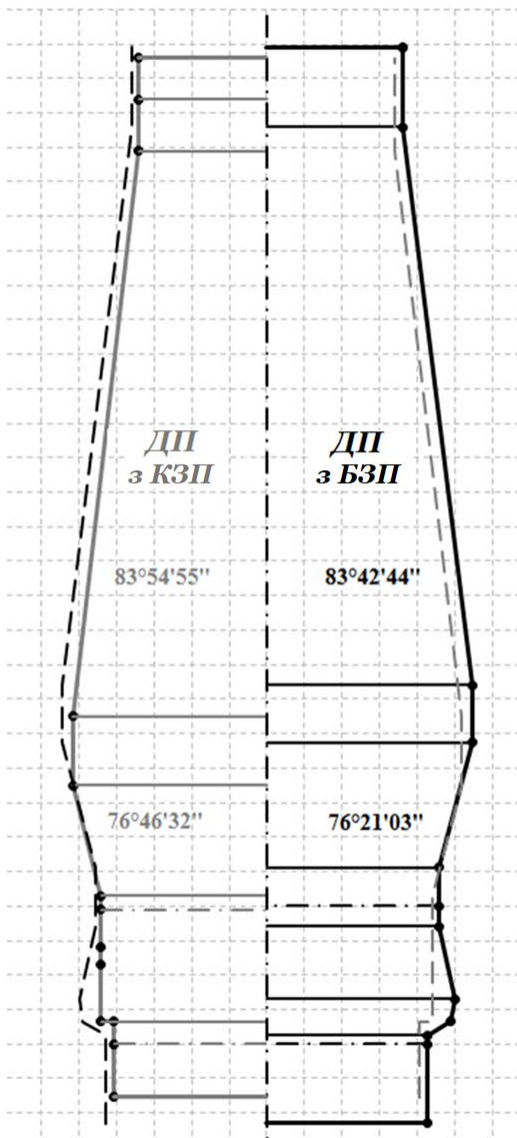


Рис. 3.16. Порівняльна схема профілів ДП з КЗП і ДП з БЗП щодо осей чавунних льоток

Комплекс приготування і вдування ПВП в горни доменних печей Єнакієвського металургійного заводу включає: секцію розвантаження та зберігання сирого вугілля; ділянку змішування вугілля; установку відбору проб вугілля; ділянку просівання і додрібнення вугілля; установку сушки та помолу вугільної сировини, оснащену двома вертикальними млинами (продуктивністю 52,5 т/год); установку вдування ПВП. Комплекс для вдування ПВП в доменні печі оснащений також системою так званої киснево-вугільної технології «ОХУСОАЛ».

Для виробництва ПВП у 2016 р. були використані вугілля марки СС Бачатського вугільного розрізу, склад та властивості яких відповідають нормам, прийнятим у світовій практиці. Вміст вуглецю в робочій масі цього вугілля складає 79,82 %, зольність $\geq 8,5$ %, вміст летючих речовин 22,1 %, низький вміст сірки 0,20 %. Слід зазначити ще два важливих показники, що характеризують ці вугілля, такі як індекс помолоздатності по Хардгроув (*HGI*) та індекс вільного взпучування (*FSI*). Вугілля марки СС мають практично максимальний рівень помолоздатності, що в значній мірі підвищує тонину помелу і покращує умови експлуатації помольних засобів [8, 9].

З урахуванням організаційних та складних економічних особливостей, якість коксу не відповідала експлуатаційним вимогам технології доменної плавки з застосуванням ПВП. У табл. 3.9 наведені характеристики коксу в період освоєння технології вдування ПВП на досліджуваних ДП після повного виведення зі складу дуття природного газу до проведення капітального ремонту з шоткретуванням шахт печей в порівнянні з необхідними показниками якості коксу при вдуванні ПВП.

Крім цього, кількісний і якісний склад залізорудної сировини в цей період також носив нестабільний характер [8]. Вміст привозних окатишів основністю (CaO/SiO_2) 0,05 од. в суміші з агломератом змінювався від 10 до 75 %, кількість агломерату виробництва місцевої аглофабрики основністю 1,4 од. з високим вмістом вторинних ресурсів обумовлювало необхідність додаткових поставок агломерату виробництва ПівдГЗК основністю 1,6 од., загальний вміст заліза в шихті з вапняком в період освоєння ПВП становив 54,8 %.

Таблиця 3.9. Якість коксу на досліджуваних доменних печах в період освоєння технології вдування ПВП

Показник якості коксу ДП → ↓		W	Зола	Сірка	M25	M10	>80	0-25	CSR	CRI
Відповідно до експлуатаційних вимог		≤ 0,5	<12%	<0,6%,	≥ 87,0	≤ 6,0	≤ 5,0	≤ 3,5	>60%,	<30
ДП з КЗП	ПВП=110 кг/т чавуну	3,47	10,96	0,90	88,04	7,33	9,36	3,15	49,2	33,5
ДП з БЗП	ПВП=126 кг/т чавуну	3,60	10,80	0,92	87,87	7,41	8,75	3,12	49,5	33,3

Перехід на технологію ПВП зі збільшенням продуктивності доменних печей при зниженій якості шихтових матеріалів і слабкої інтенсивності оновлення коксової насадки викликає необхідність проведення промивань на постійній основі (так званих «м'яких» промивань). У доменному цеху для підтримки задовільних властивостей первинних, проміжних і кінцевих шлаків в складі доменної шихти використовували марганцевмісні матеріали, зокрема, марганцеву руду. Оксид марганцю цієї руди знижує в'язкість проміжних шлаків і зменшує температуру плавлення суміші залізорудної частини шихти [8]. На другій стадії, при потраплянні в нижню високотемпературну зону, частина марганцю відновлюється в ній з газифікацією вуглецю в нижній частині ДП, сприяючи прискоренню відновлення коксової насадки та стабілізації нагріву продуктів плавки.

Дослідження впливу марганцю в шихті при роботі на комбінованому дутті в умовах роботи досліджуваних ДП до початку освоєння технології вдування ПВП показали, що при використанні коксу зниженої якості, збільшення вмісту MnO в шихті на 1 кг/т чавуну зменшує витрату коксу на $\sim 2,7$ – $2,9$ кг/т за рахунок організації «м'якого» промивання горна від коксу дрібних фракцій і, як наслідок, сприяє стабілізації нагріву чавуну, коефіцієнт переходу марганцю в чавун при цьому становить $\sim 0,47 \pm 0,03$. Використання марганцевмісних матеріалів, при освоєнні технології вдування ПВП на досліджуваних ДП, в кількості ~ 25 кг/т чавуну дозволило підвищити технологічність доменної плавки і розширило можливості її управління при нестабільному надходженні сировини [8].

Перехід на технологію вдування ПВП в умовах роботи доменного цеху у 2016 р. зумовив необхідність коригування режиму завантаження на доменних печах. У цих умовах при вдуванні в горн ПВП можуть мати місце такі особливості розподілу газового потоку в печі як недостатньо розвинений центральний газорозподіл і надмірно розвинений периферійний потік газів. При цьому слід зазначити, що технологія вдування ПВП повинна передбачати збільшення продуктивності печі, одним із заходів досягнення цього є забезпечення більш розвиненої газопротисної здатності, в порівнянні з роботою без ПВП, периферійної зони печі. А для досягнення економічності плавки ступінь розвитку центрального газового потоку повинна забезпечувати можливість регулювання розмірами осової коксової віддушини «без ризику втрати центру» [8]. Також важливо відзначити, що при використанні ПВП з великою кількістю шлаку на випуску продуктів плавки (398 кг/т чавуну – на ДП з КЗП та 393 кг/т чавуну – на ДП з БЗП) необхідно використовувати спеціальні режими формування порцій шихти, що перешкоджають попаданню частинок не в повному обсязі згорілого палива в первинні і проміжні розплави, що збільшує ймовірність захаращення горна неплавкими масами.

Тому, при регулюванні розподілу газового потоку по радіусу печі при вдуванні в горн ПВП для досягнення оптимальних техніко-економічних показників плавки, в характерних для досліджуваних ДП умовах роботи, шляхом розподілу шихтових матеріалів по перерізу колошника необхідно:

- забезпечити стійкий центральний газорозподіл з вузькою осовою коксовою віддушиною;
- виключити локалізацію окремих видів залізорудної сировини по перерізу колошника доменної печі;
- забезпечити підвищену концентрацію низькоосновної сировини в зоні локалізації частинок ПВП;
- сформувати склад залізорудних матеріалів в пристінній зоні, що забезпечує самовідновлення гарнісажу в нижній частині шахти доменної печі;
- оптимізувати газопротисну здатність периферійної зони, не допускаючи зайвого «навантаження» її залізорудними матеріалами, яка може призводити до «верхніх підвисань» та нерівного сходу шихти;

- забезпечити розвиток взаємного перетікання газів між периферією і центром.

На підставі викладених положень управління розподілом газового потоку при використанні ПВП, розроблені та реалізовані: нова програма завантаження, розроблена з використанням модельної системи [89] та режим формування порцій ДП з БЗП (рис. 3.17 та 3.18). Необхідність зміни програми завантаження була обумовлена формуванням, в період освоєння ПВП, «газонапруженої» проміжної зони в печі (зони підвищених рудних навантажень), яка сприяла розвитку надмірного периферійного газового потоку, утрудненому переходу газів від периферії до центру та в зворотному напрямку, а також формуванню в печі зайвої «розкритої» осьової зони. Дані особливості розподілу газового потоку були виявлені при аналізі інформації встановлених на печі термозондів [66]. На початку освоєння ПВП також значно збільшилися температури футерівки на рівні середини шахти та теплові навантаження системи охолодження в цій зоні.

Реалізація запропонованих змін програми завантаження (табл. 3.10) та режиму формування порцій дозволила при роботі ДП з БЗП без футерівки на початковому етапі освоєння ПВП знизити температури периферійного газового потоку по всій висоті печі на 13 % – від 432 °С до 377 °С, в середньому, і зменшити окружну нерівномірність температур на 11 % (рис. 3.19).

На ДП обладнаній конусним завантажувальним пристроєм, основними системами завантаження, є КРРК↓ та РРКК↓ при різній частоті використання їх в циклі подач. Виконаний аналіз зміни температур периферійної зони ДП з КЗП за перші п'ять місяців 2016 р. показав, що при збільшенні прямих подач на високих рівнях засипу мали місце зони підвищених температур, що супроводжуються сповзанням гарнісажу, переважно, в секторі чавунної льотки №1. Виходячи з виявлених періодичних порушень газорозподілу в сухій зоні по окружності ДП з КЗП, а також виходячи з необхідності створення помірно розвинутого периферійного газового потоку при використанні технології вдування ПВП, в незадовільних шихтових умовах необхідно було підібрати оптимальні системи завантаження, в тому числі, в залежності від рівня засипу шихти.

Таблиця 3.10. Рациональні програми завантаження ДП з БЗП без та із використанням пиловугільного палива

без ПВП

Кутіві полож. лотка	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
R10				28						28		
R9				25	8	10				25	8	10
R8			13	20	17	28		26	13	20	17	28
R7		25	17	15	22	23		22	17	15	22	23
R6		30	17	12	20	23		17	17	12	20	23
R5	10	17	20		14	16	10	17	20		14	16
R4	10	14	14		19		10	18	14		19	
R3	10	14	19				10		19			
R2	20						20					
R1	50						50					

з ПВП

Кутіві полож. лотка	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р	К	Р
R10				34						34		
R9				17		12		15		17		12
R8		13		14	23	25		22		14	23	25
R7		22	25	12	28	23	30	18	25	12	28	23
R6		26	25	12	26	17	15	15	25	12	26	17
R5		15	28	11	23	13	10	15	28	11	23	13
R4	10	12	22			10	10	15	22			10
R3	15	12					10					
R2	15						25					
R1	60											

Для виявлення особливостей розподілу рудних навантажень по радіусу ДП з КЗП, був виконаний розрахунок розподілу матеріалів, в залежності від системи завантаження та рівня засипу (рис. 3.20 і 3.21). Отримані розрахунки свідчать, що при рівнях засипу $\pm 0,5$ м від рівня 1,8 м (точка зустрічі матеріалів при вивантаженні з великого конуса зі стінкою плит колошникового захисту), рудний гребінь наближається до стінки печі, при цьому система завантаження РРКК↓ забезпечує його максимум в цій зоні.

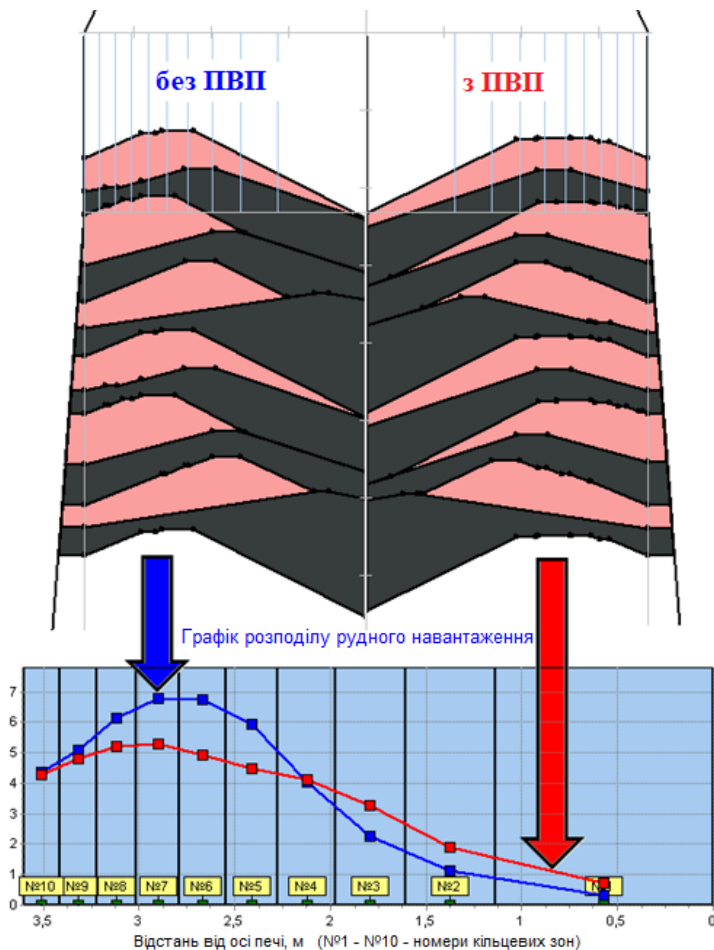


Рис. 3.17. Розрахункова структура шарів шихтових матеріалів та розподіл рудних навантажень по радіусу печі для двох раціональних програм завантаження ДП з БЗП (без ПВП та з ПВП)

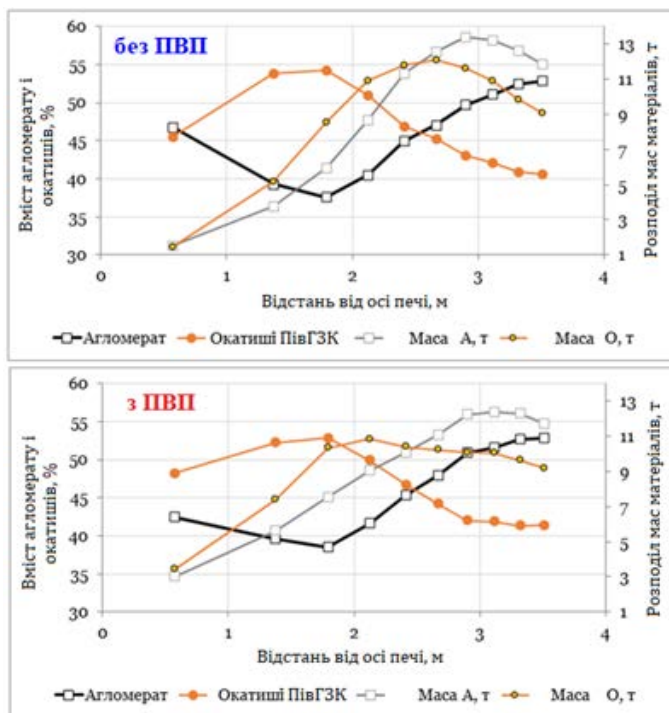


Рис. 3.18. Розподіл компонентів шихти по радіусу печі для двох раціональних програм завантаження ДП з БЗП (без БВП та з БВП)

Отже, для запобігання надмірної «підгрузки» периферійної зони рудними матеріалами для рівнів засипу $1,8 \text{ м} \pm 0,5 \text{ м}$ рекомендовано використовувати систему завантаження:

$$\text{РРКК} \downarrow + \text{КРРК} \downarrow + \text{РРКК} \downarrow + 2\text{КРРК} \downarrow$$

Для рівнів засипу $2,5 \text{ м} \pm 0,5 \text{ м}$ рекомендовано використовувати систему завантаження:

$$2\text{РРКК} \downarrow + \text{КРРК} \downarrow + \text{РРКК} \downarrow + \text{КРРК} \downarrow$$

Тобто, при знижених рівнях засипу необхідно використовувати в циклі завантаження більшу кількість прямих подач, а при високих рівнях засипу – більшу кількість подач КРРК↓. При цьому, комбіноване завантаження таких циклів подач забезпечує в печі зміщення гребенів матеріалів в

проміжно-периферійній зоні, що створює передумови для газорозподілу, що забезпечує рівний сход матеріалів в існуючих шихтових та дуттевих умовах [8]. Запропонована система завантаження може бути використана незалежно від існуючого ступеня розвитку центрального газорозподілу.

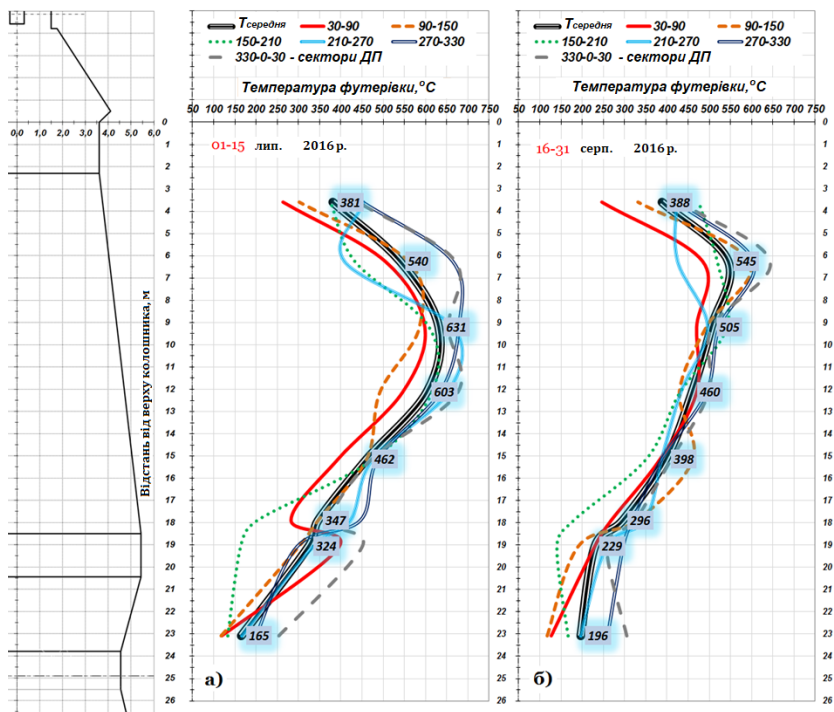


Рис. 3.19. Зміна температури термопар футерівки шахти, розпару та заплечиків ДП з БЗП до (а) та після (б) реалізації рекомендацій щодо завантаження

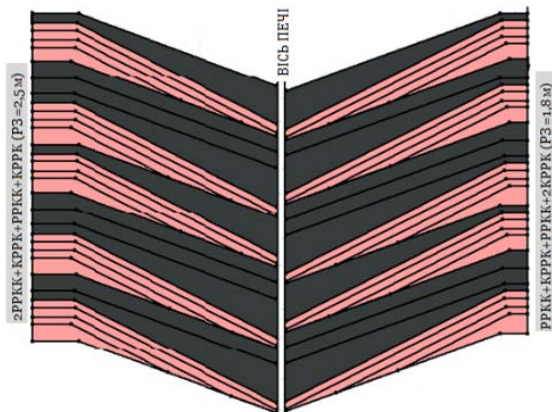


Рис. 3.20. Структури шарів шихтових матеріалів для рекомендованих систем завантаження ДП з КЗП

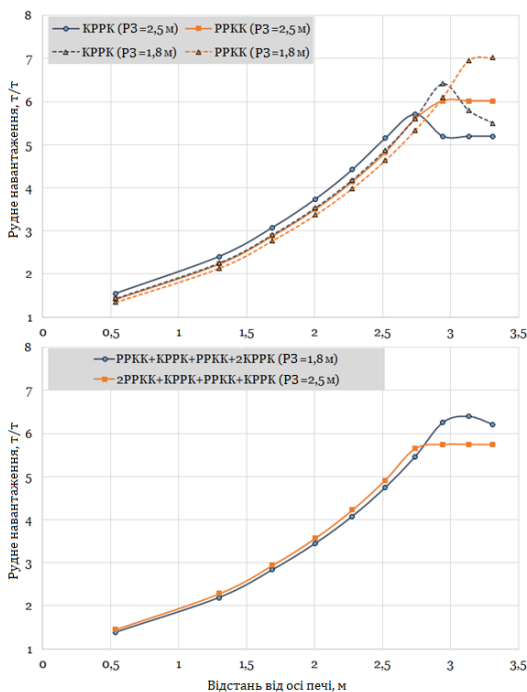


Рис. 3.21. Розподіл рудних навантажень по радіусу ДП з КЗП при різних системах завантаження для рівнів засипу 1,8 і 2,5 м

Висновки до Глави 3.

1. В умовах нестабільної якості шихтових матеріалів розроблено новий підхід до вибору раціональних програм завантаження БЗП, заснований на зменшенні кількості робочих кутових положень лотка та зміщенні від порції до порції умовних «гребенів» (максимумів рудного навантаження) уздовж радіуса колошника. Позитивний досвід реалізації такої програми завантаження показаний на прикладі досліджуваної доменної печі з безконусним завантажувальним пристроєм, де понад три роки вона з деякими коригуваннями використовувалася і забезпечувала, поряд з іншими заходами, високі техніко-економічні показники. На підставі запропонованого підходу були також розроблені та реалізовані варіанти програми завантаження для роздувочного періоду роботи печі і для режимів роботи з високим вмістом окатишів у складі шихти.
2. Представлений досвід вибору раціональних кутів нахилу лотка безконусного завантажувального пристрою при зміні конфігурації футерівки лотка. Розроблено заходи з оперативного управління периферійним газовим потоком, в тому числі, при переході на технологію вдування пиловугільного палива. Розроблено та реалізовано рекомендації з управління окружним розподілом шихтових матеріалів, які дозволили зменшити нерівномірність температур футерівки верхніх горизонтів шахти доменної печі. Сформульовані та внесені доповнення в технологічну інструкцію по доменному виробництву вимоги до програми завантаження задувочної шихти після проведення капітального ремонту з шоткретуванням шахти.
3. Робота доменних печей на багатокомпонентній залізорудній сировині при застосуванні пиловугільного палива обумовила необхідність розробки технологічних прийомів та заходів, спрямованих на виключення можливості локалізації окремих матеріалів по перерізу доменної печі. Виконані лабораторні дослідження та дослідно-промислове випробування показали, що в умовах роботи печі на бідній залізорудній сировині

- (вміст $Fe_{\text{заг}} \leq 56,0 \%$) з високою часткою окатишів і при застосуванні пиловугільного палива основність агломерату недоцільно підвищувати до величини, що перевищує 2,0 од.
4. В умовах роботи доменної печі із застосуванням пиловугільного палива розподілом компонентів залізорудної частини шихти по перерізу колошника необхідно забезпечити підвищену концентрацію низькоосновної сировини в зоні локалізації частинок пиловугільного палива. Введення до складу шихтових матеріалів марганцевмісних добавок призводить до зниження температур плавлення суміші залізорудних матеріалів, в'язкості розплаву, кількості розплаву завислого в коксовій насадці та підвищує технологічну стійкість доменного процесу.
 5. При управлінні газорозподілом по радіусу печі при вдуванні в горні пиловугільного палива необхідно забезпечити достатню газопроникність периферійної зони, не допускаючи зайвого навантаження її залізорудними матеріалами, забезпечити розвинений центральний газорозподіл з одночасним розвиненим взаємним перетіканням газів між периферією та центром, при розвиненому центральному газорозподілі для підвищення економічності плавки необхідно забезпечити вузьку осьову коксову віддушину.
 6. Освоєння технології вдування пиловугільного палива на досліджуваних доменних печах в змінних шихтових умовах і з роботою на коксі зниженої якості при використанні раціональних режимів завантаження, формування порцій і виборі раціонального шлакового режиму дозволили у 2016 р. довести витрату пиловугільного палива, в середньому, до 130 кг/т чавуну. Оперативний контроль стану футерівки шахти доменних печей, який здійснювався за показаннями термопар футерівки, термопар тіла холодильників і теплових навантажень системи охолодження, дозволив своєчасно здійснювати як гарнісажуєтворюючі заходи, так і коригувати розподіл компонентів шихтових матеріалів по радіусу і окружності печі.
 7. Реалізація запропонованих змін програми завантаження та режиму формування порцій дозволила при роботі

доменної печі з безконусним завантажувальним пристроєм без футерівки на початковому етапі освоєння пиловугільного палива знизити температури периферійного газового потоку по всій висоті печі, в середньому, на 13 % і зменшити окружну нерівномірність температур на 11 %. Використання в технології раціональних режимів завантаження при вдуванні пиловугільного палива дозволило до шоткретування забезпечити експлуатаційну стійкість системи охолодження та безаварійну роботу доменних печей.

ГЛАВА 4

РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЗМІНУ ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВОГО ПОТОКУ НАД ПОВЕРХНЕЮ ЗАСИПУ

4.1. Дослідження впливу технологічних факторів на характер зміни температур газового потоку над поверхнею засипу шихти

Як відзначалося у главі 1 в останні роки для оцінки розподілу температури газового потоку все ширше застосовуються термозонди, які встановлюють над поверхнею засипу шихти в ДП по одному або декільком радіусам колошника. Відсутність досліджень впливу технологічних факторів на характер зміни температур газового потоку, а також актуальність розробки способів управління розподілом шихтових матеріалів з використанням інформації термозондів зумовили виконання досліджень, наведених в цієї главі.

На першому етапі досліджень для аналізу зміни температур, що реєструються стаціонарними термозондами, при різних технологічних умовах плавки, був обраний один з періодів роботи ДП з БЗП, в якому в програму завантаження БЗП коригування не вносилися [53]. Цикл завантаження складався з 12 порцій шихтових матеріалів, перша і сьома порції – кокс, що вивантажувався в осьову зону ДП (кутові положення лотка БЗП – 5-1). Аналіз показав, що в періоди роботи печі зі стабільним рівнем засипу розподіл температур поверхні шихти відповідав помірно розвиненому центральному газорозподілу (рис. 4.1). Це відповідає положенням, розробленим раніше в ІЧМ інструкції з ведення доменної плавки з використанням інформації про температуру поверхні шихти, згідно з якою осьовий газовий потік слід вважати надмірно розвиненим, якщо температура поверхні шихти в осьовій зоні радіусом 1,5–1,7 м перевищує температуру в периферійній зоні на 300–350 °С. В аналізованому періоді роботи ДП температура в

осьовій зоні перевищувала температуру в периферійній на 80–160 °С.

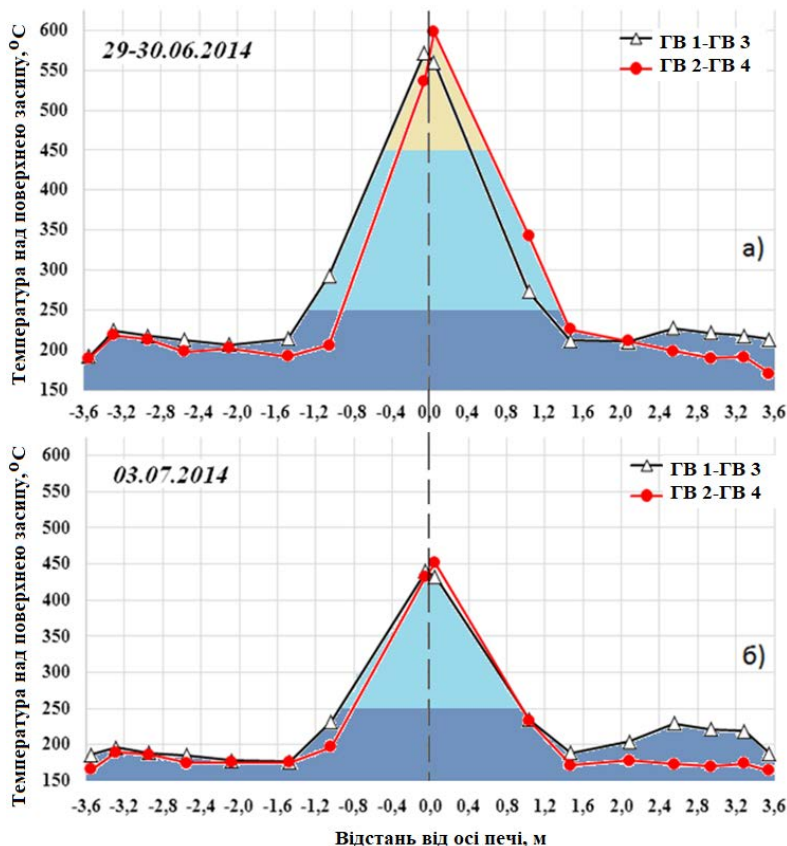


Рис. 4.1. Розподіл температури над поверхнею засипу шихти за двома вимірюваними діаметрами для періодів роботи ДП з БЗП з мінімальною (а) і максимальною (б) витратою палива

Для оцінки впливу техніко-економічних показників плавки на характер розподілу температури поверхні засипу шихти для кожної доби досліджуваного періоду роботи ДП була визначена витрата приведенного до коксу палива, що враховує кількість в шихті коксового горіха і природного газу в дутті. На рис. 4.1 представлено розподіл температур поверхні шихти за діаметрами колошника для двох періодів

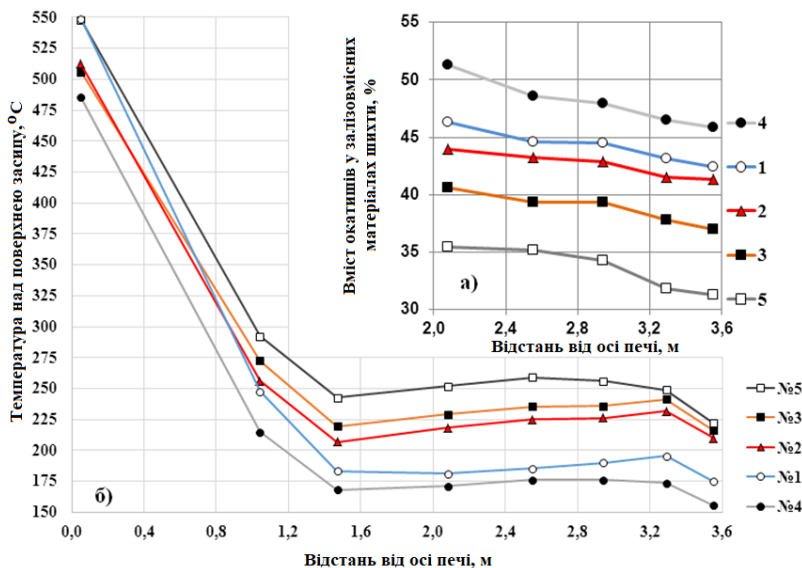
роботи ДП з мінімальною (29–30.06.2014 р., рис. 4.1а) і максимальною (03.07.2014 р., рис. 4.1б) витратою палива; в першому періоді витрата палива була на 3,5% менше, ніж у другому. Як випливає з рис. 4.1, в період роботи ДП з мінімальною витратою палива, температура в осі печі на 128 °С більше, в порівнянні з періодом з максимальною витратою палива. Також в періоді, представленому на рис. 4.1а, відзначена менша окружна нерівномірність температури в периферійній зоні, яка яскраво виражена в другому періоді (рис. 4.1б) з боку третього газовідвіда (ГВ-3).

Таким чином, встановлено, що розміри осьової коксової віддушини та нерівномірність окружного розподілу температур газів, які можуть бути оцінені за інформацією термозондів, свідчать про економічність плавки в різних періодах роботи доменної печі.

Далі була виконана оцінка впливу на розподіл температури над поверхнею засипу вмісту окатишів (ω_{OK}) в суміші з агломератом (А+О), в середньому, і в периферійній зоні (дев'ять і десять рівні по площі кільцеві зони) печі (ПФ) [53]. Для цього було обрано п'ять періодів роботи ДП (далі № 1–5). У періоді № 1 ω_{OK} в (А+О) становив 48,1 %, в ПФ зоні перерізу печі кількість окатишів в залізорудній суміші, за результатами розрахунку за допомогою розроблених в ІЧМ математичних моделей [22, 88, 89, 115], склала, в середньому, 42,8 %. У періоді № 2 – 46,0 % (А+О) і 41,4 % (ПФ), в періоді № 3 – 41,0 % (А+О) і 37,4 % (ПФ), в періоді № 4 – 53,2 % (А+О) і 46,2 % (ПФ), в періоді № 5 – 36,0 % (А+О) і 31,5 % (ПФ). Розподіл температури над поверхнею засипу шихти і вміст окатишів в залізовмісних матеріалах по радіусу колошника для п'яти досліджуваних періодів роботи ДП з БЗП наведені на рис. 4.2. Як випливає з результатів, представлених на рисунку, температури поверхні засипу шихти тим більше, чим менше вміст окатишів як в суміші з агломератом, так і в залізорудній суміші в ПФ зоні. Так, в період роботи печі з ω_{OK} в ПФ зоні 31,4 % (№ 5) температура поверхні засипу в цій зоні склала 236 °С, в періоді з ω_{OK} в ПФ зоні 37,4 % (№ 3) – 229 °С, в періоді з ω_{OK} в ПФ зоні 41,4 % (№ 2) – 221 °С, в періоді з ω_{OK} в ПФ зоні 42,8 % (№ 1) – 185 °С і в періоді з ω_{OK} в ПФ зоні 46,2 % (№ 4) – 165 °С.

Таким чином, встановлено, що збільшення (зменшення) ω_{OK} в ПФ зоні печі на 1% відповідає зменшенню

(збільшенню) температури над поверхнею засипу шихти на 3–8 °С (рис. 4.3). Поясненням отриманої залежності служать як вплив змінної кількості гарячого агломерату (місцевого виробництва), так і збільшення кількості FeO в первинному шлаковому розплаві при збільшенні вмісту окатишів, що супроводжується великими витратами тепла для відновлення заліза, внаслідок чого відбуваються зміни умов плавлення і відновлення, що призводять до зменшення температури поверхні шихти. Таким чином, інформація, що отримується від стаціонарних термозондів, дозволяє контролювати вміст окатишів в периферійній зоні печі, що вкрай важливо при формуванні захисного гарнісажу в печі [53].



№ 1 – 29.06.2014 $\omega_{\text{ок}}$ в суміші з агломератом – 48,1 %, в ПФ зоні – 42,8 %;
 № 2 – 01.07.2014 $\omega_{\text{ок}}$ в суміші з агломератом – 46,0 %, в ПФ зоні – 41,4 %;
 № 3 – 02.07.2014 $\omega_{\text{ок}}$ в суміші з агломератом – 41,0 %, в ПФ зоні – 37,4 %;
 № 4 – 09.07.2014 $\omega_{\text{ок}}$ в суміші з агломератом – 53,2 %, в ПФ зоні – 46,2 %;
 № 5 – 16.07.2014 $\omega_{\text{ок}}$ в суміші з агломератом – 36,0 %, в ПФ зоні – 31,5 %.

Рис. 4.2. Розподіл вмісту окатишів в залізорудній суміші в кільцевих зонах радіусу колошника (а) і приведених до одного радіусу температур над поверхнею засипу шихти (б) для п'яти періодів роботи ДП з БЗП

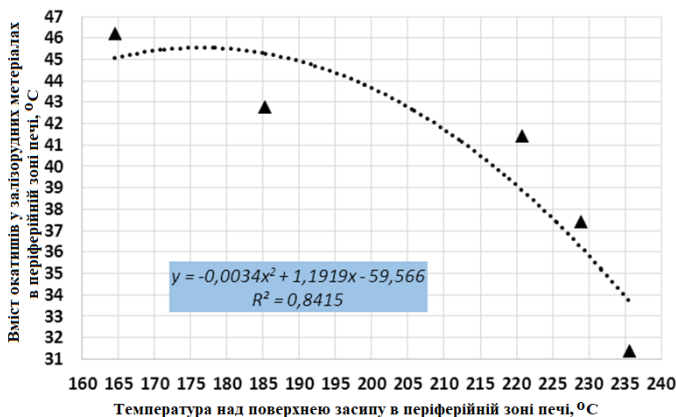


Рис. 4.3. Зв'язок вмісту окатишів у залізистих матеріалах (ЗМ) і температури над поверхнею засипу шихти в периферійній зоні печі

Далі дослідження виконувалися для умов роботи двох досліджуваних доменних печей у 2016 р., технологічні особливості яких характеризувалися декількома основними газо-дугтевими режимами, а також переходом на технологію вдування пиловугільного палива. Як відомо, розподіл шихтових матеріалів по радіусу печі є основним фактором, що впливає на розподіл температури газового потоку над поверхнею шихти [10]. У зв'язку з тим, що протягом п'яти аналізованих місяців роботи ДП з БЗП в програму завантаження змін не вносилося, то в сформованих технологічних умовах виробництва представляло певний інтерес встановлення впливу інших факторів на розподіл температури газового потоку.

Так, аналіз зміни температур, приведених до одного радіусу печі (рис. 4.4), показав, що у січні 2016 р., на відміну від інших місяців, спостерігалися більш низькі температури газів при практично однаковому характеру їх розподілу по радіусу. Це було пов'язано з найбільшою кількістю окатишів (58,6 %) в залізистій частині шихти, яка використовувалась на ДП з БЗП в цей період. Як зазначалося у розділі 1, мають місце суперечливі відомості про вплив температури шихти на показання термозондів. У зв'язку з цим, було виконано аналіз впливу кількісного складу залізистих матеріалів, що мають різну температуру при завантаженні в ДП, на розподіл

температур газового потоку над поверхнею шихти. На рис. 4.5 і 4.6 представлені графіки розподілу температур при різних частці в шихті окатишів та гарячого агломерату, відповідно. А в зв'язку з тим, що у травні 2016 р. в складі залізорудної сировини було використано 19,8 % привізного агломерату, що має значно меншу температуру при завантаженні в ДП, ніж агломерат місцевого виробництва, то дослідження впливу складу шихти на розподіл температур газового потоку виконувалися окремо для періодів зі змінною часткою окатишів і для періодів зі змінною часткою гарячого агломерату місцевого виробництва.

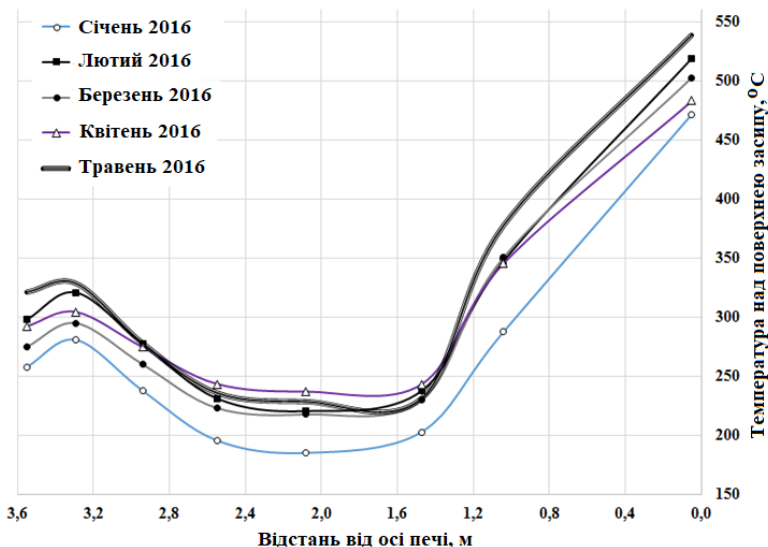


Рис. 4.4. Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу, приведених до одного радіусу ДП з БЗП, за січень–травень 2016 р.

З рис. 4.5 і 4.6 випливає, що в умовах постійного розподілу шихтових матеріалів по радіусу, при змінному вмісті в шихті окатишів і гарячого агломерату, характер розподілу температур по радіусу печі залишається практично однаковим, збільшуються тільки абсолютні значення температур зі збільшенням в шихті кількості гарячого агломерату.

Аналіз зміни температур над поверхнею засипу шихти ДП з КЗП, приведених до одного радіусу печі (рис. 4.7), так

само як і на ДП з БЗП показав, що в січні, на відміну від інших місяців, спостерігаються нижчі температури газів при практично однаковому їх розподілі по радіусу. Це було пов'язано також з найбільшою кількістю окатишів (68,0 %) в залізорудній частині шихти, що використовувувалась на ДП з КЗП у січні 2016 р.

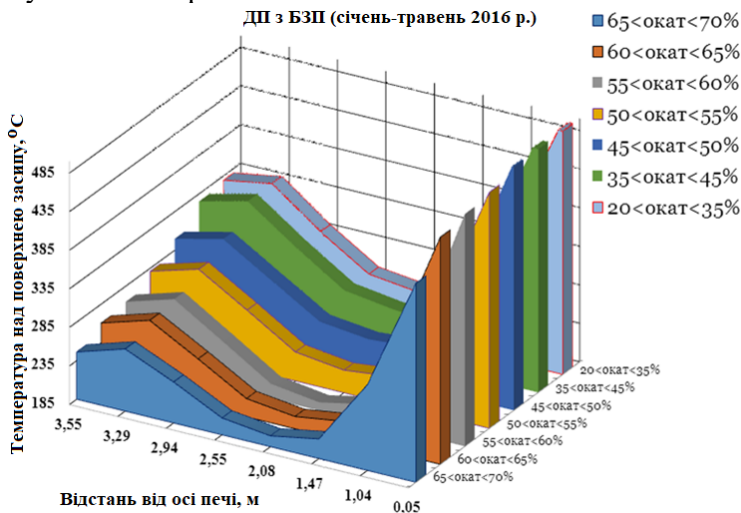


Рис. 4.5. Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу ДП з БЗП при різній частці в шихті окатишів

Встановлені для умов ДП з БЗП особливості зміни розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу при різній частці в шихті агломерату місцевого виробництва були підтверджені в результаті виконання аналогічних досліджень для умов роботи ДП з КЗП (рис. 4.8). Це свідчить про те, що прийняття обґрунтованих управляючих дій на основі інформації термозондів не визначається температурою шихти, що завантажується в ДП [66]. Підтвердженням цьому є отримані з високими коефіцієнтами кореляції залежності (рис. 4.9) температур газового потоку над поверхнею засипу в різних перерізах по радіусу ДП з БЗП від кількості в складі залізорудної частини шихти гарячого агломерату місцевого виробництва. А отримані аналогічні результати для умов ДП з КЗП стали підставою для узагальнення результатів, отриманих для обох доменних печей (рис. 4.10).

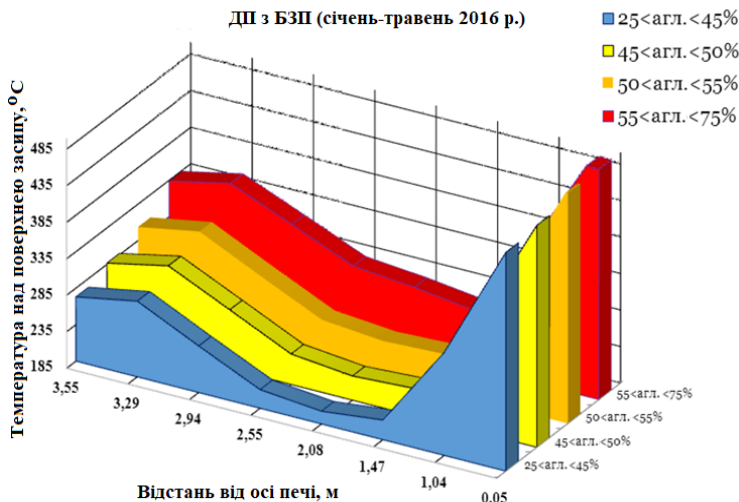


Рис. 4.6. Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу ДП з БЗП при різній частці в шихті гарячого агломерату

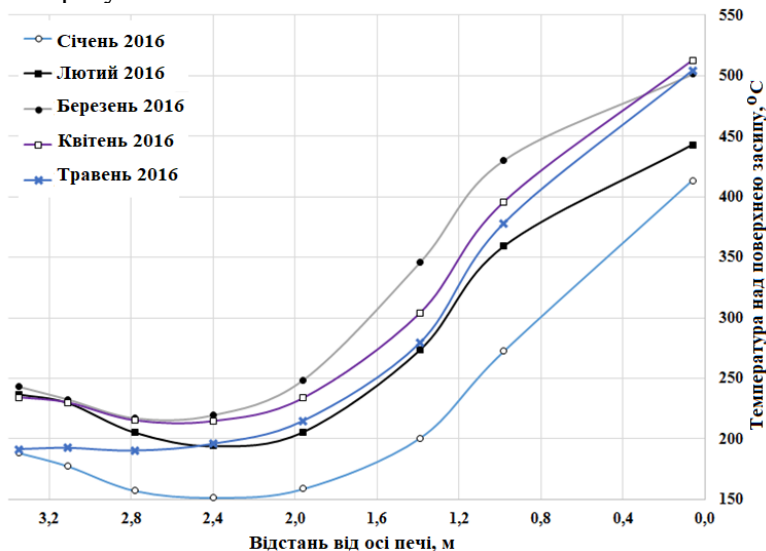


Рис. 4.7. Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу, приведених до одного радіусу ДП з КЗП, за січень-червень 2016 р.

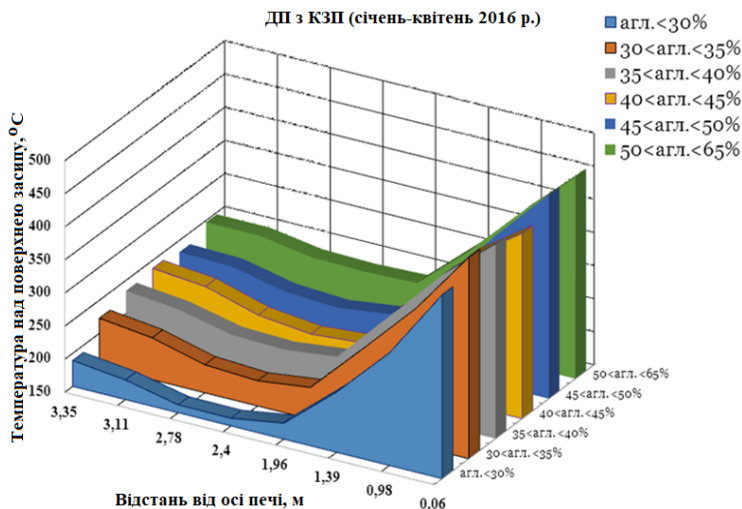


Рис. 4.8. Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу ДП з КЗП при різній частці в шихті гарячого агломерату

Таким чином, отримані результати свідчать про відсутність впливу на характер розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу по радіусу печі температури шихти, що завантажується в піч, як в цілому, так і в окремих зонах перерізу печі по радіусу, температури газового потоку збільшуються пропорційно збільшенню кількості в складі шихти гарячого агломерату. Отримані результати дозволяють використовувати інформацію термозондів для управління завантаженням при різному компонентному складі шихтових матеріалів.

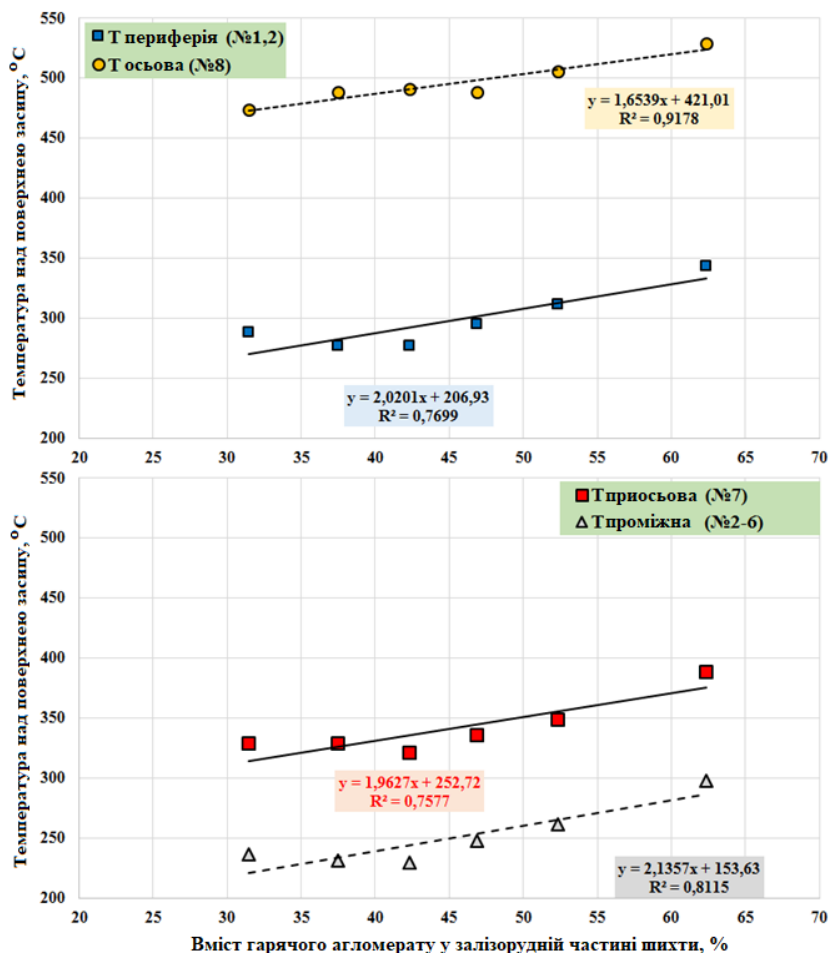


Рис. 4.9. Залежності температур газового потоку над поверхнею засипу ДП з БЗП в різних зонах від кількості в шихті гарячого агломерату

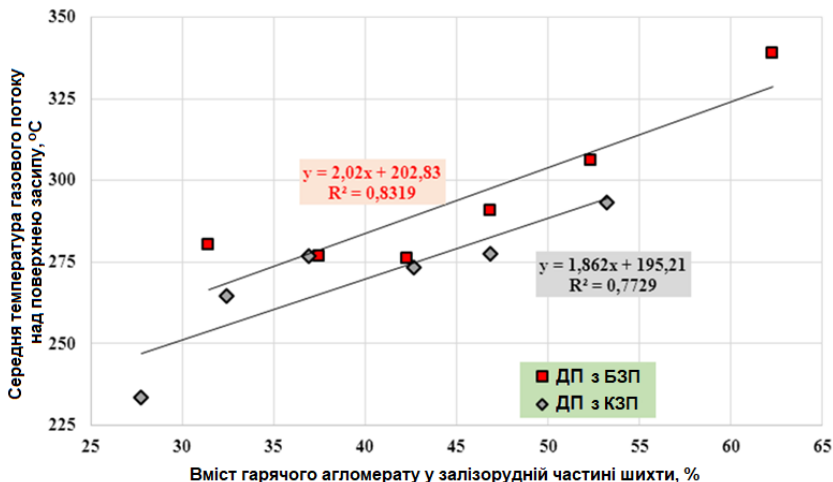


Рис. 4.10. Залежності середньої температури газового потоку над поверхнею засипу ДП з БЗП і ДП з КЗП від кількості в шихті гарячого агломерату

Далі представлені результати досліджень впливу технологічних факторів на розподіл температур газового потоку при різних газо-дуттевих режимах. Робота ДП з БЗП в досліджуваному періоді 2016 р. протягом 8,5 місяців, характеризувалася чотирма основними газо-дуттевими режимами:

1. Режим роботи на «безгазовій шихті» зі зволженим дуттям – витрата пара становила, в середньому, 2,4 т/год (01.01–14.03.2016) – період 1.
2. Режим роботи з природним газом (ПГ) – витрата ПГ становила, в середньому, 58,9 м³/т чавуну (15.03–20.04.2016) – період 2.
3. Режим роботи з ПГ (10,8 м³/т) та з ПВП (91,8 кг/т чавуну) на початковому етапі його освоєння (21.04–03.06.2016) – період 3.
4. Режим роботи з ПВП (129,6 кг/т чавуну) (29.06–13.09.2016) до зупинки ДП з БЗП на шоткретування шахти – період 4.

У табл. 4.1 наведено техніко-економічні та технологічні показники плавки для чотирьох досліджуваних періодів.

Таблиця 4.1. Техніко-економічні та технологічні показники плавки для чотирьох досліджуваних періодів роботи ДП з БЗП

Параметр		Період			
		1	2	3	4
Виробництво, т/доб		2663	3138	3283	3166
КВКО, м ³ ·доб/т		0,646	0,548	0,524	0,543
Витрата ПГ, м ³ /т		0,0	58,9	10,8	1,4
Витрата коксу, кг/т		566	476	438	436
Витрата коксового горіха, кг/т		34,6	34,0	34,0	35,2
Витрата агломерату місцевого виробництва, <u>кг/т</u>		<u>786,8</u>	<u>765,5</u>	<u>754,2</u>	<u>500,6</u>
ОснI		2,292	2,103	1,590	1,578
Витрата агломерату ПівдГЗК, <u>кг/т</u>		<u>0,0</u>	<u>0,0</u>	<u>270,7</u>	<u>333,8</u>
ОснI		-/-	-/-	1,610	1,752
Витрата окатишів, кг/т		947,7	910,0	636,5	798,4
Витрата вапняку, кг/т		45,7	36,6	34,2	53,0
Витрата конвертерного шлаку, кг/т		50,9	92,3	45,1	60,2
Витрата марганцевмісної домішки, кг/т		17,9	4,8	20,7	23,0
Середньозважений хім. аналіз ЗВМ	SiO ₂	8,51	8,46	8,06	8,54
	Al ₂ O ₃	1,44	1,43	1,47	1,25
	Fe ₂ O ₃	68,73	68,64	68,02	68,60
	CaO	11,36	11,15	10,19	9,67
	MgO	1,21	1,30	1,15	0,83
	MnO	0,36	0,30	0,50	0,58
	FeO	6,42	7,52	9,24	8,99
	Fe _{заг}	53,11	53,89	54,79	55,02
	ОснI	1,335	1,317	1,267	1,133
	Осн2	1,263	1,258	1,191	1,074
Витрата дуття, м ³ /хв		3352	3378	3400	3384
Витрата пару на зволоження дуття, т/ч		2,4	0,3	0,5	0,8
Вміст O ₂ в дутті, %		21,0	22,9	22,5	23,7
Вологість дуття, г/м ³		16,58	8,14	12,15	17,99
Витрата ПВП, кг/т		0,0	0,0	91,8	129,6
Теоретична температура горіння, °C		2052	2118	2170	2184
Р _{гд} , аті		2,78	2,82	2,81	2,82
ΔР _Σ , аті		0,95	0,99	0,97	0,96
ΔР _в , аті		0,10	0,11	0,10	0,11
ΔР _н , аті		0,85	0,88	0,88	0,85
Р _к , аті		1,79	1,80	1,80	1,82
Температура колошникового газу, °C		284	277	318	263

Параметр		Період			
		1	2	3	4
Температура периферійних газів, °C		453	442	481	451
Рудне навантаження на кокс+горіх		2,83	3,27	3,52	3,77
Вихід колошникового газу, м ³ /т		2387	2127	2003	2121
Хім. склад чавуну	[Si]	0,58	0,66	0,63	0,65
	[Mn]	0,67	0,53	0,67	0,62
	[S]	0,061	0,073	0,074	0,082
	[P]	0,099	0,098	0,096	0,100
	[C]	4,43	4,27	4,36	4,42
	[Ti]	0,021	0,015	0,017	0,010
Хім. склад шлаку	(MgO)	5,50	5,72	5,62	4,83
	(SiO ₂)	41,19	41,23	39,91	41,53
	(CaO)	47,73	45,19	44,40	44,47
	(FeO)	0,41	0,51	0,44	0,52
	(Al ₂ O ₃)	6,37	6,21	6,17	6,06
	(MnO)	1,01	0,97	1,02	1,22
	$\frac{CaO}{SiO_2}$	1,16	1,10	1,11	1,07
	S	0,95	1,04	1,00	1,05
Вихід шлаку, кг/т чав		420	414	383	393
Якість коксу	W	3,80	3,95	3,91	3,49
	Зола	10,95	10,75	10,67	10,85
	Сірка	0,97	0,98	0,91	0,92
	M25	88,17	88,02	88,10	87,69
	M10	7,46	7,48	7,37	7,44
	> 80	9,44	8,55	7,92	9,05
	0–25	3,23	3,33	3,11	3,16
	CSR	54,2	53,5	51,0	49,0
	CRI	31,9	32,1	32,9	33,4

В результаті досліджень було виконано аналіз зміни температур над поверхнею засипу шихти, що реєструються термозондами, для перших трьох періодів роботи ДП з БЗП, для четвертого періоду дані відсутні⁶, у зв'язку з виходом з ладу до цього часу термозондів після двох років їх

⁶ Дослідження іншого характеру для четвертого періоду, наведеного в табл. 4.1, приведено далі у розділі 5.

експлуатації. На рис. 4.11 представлено розподіл температур газового потоку по радіусу ДП з БЗП для трьох досліджуваних періодів. Як видно з рисунка, другий період роботи печі характеризувався найменшими температурами в периферійній і центральній зонах печі, а в третьому періоді – температури були максимальними, в порівнянні з іншими періодами, по всьому перерізу печі. Основним поясненням цієї особливості є найменша кількість окатишів у суміші з агломератом (38,5 %) в третьому періоді в порівнянні з першими двома (54,8 % і 54,4 %, відповідно), яка сприяє збільшенню газопроникності сухої зони печі. Відмінність температур периферійної і центральної зон першого і другого періоду з практично однаковим вмістом окатишів пояснюється тим, що при роботі на «безгазовій шихті» (період 1) об'єм сухої зони менше, ніж при роботі з природним газом (період 2), що, в кінцевому підсумку, і зумовило збільшення температур в першому періоді в двох найбільш газопроникних зонах – в центрі печі і на периферії.

Далі був виконаний аналіз зміни температур над поверхнею засипу шихти в залежності від кількості ПВП. Протягом третього досліджуваного періоду, що характеризувався початковим етапом освоєння технології вдування ПВП, в режим завантаження шихти зміни не вносилися, а аналіз температур газового потоку над поверхнею шихти в цей період свідчив про надмірно розвинений периферійний газовий потік. Підтвердженням цьому стали результати аналізу зміни температур над поверхнею засипу шихти в залежності від кількості ПВП. Встановлено зв'язок (рис. 4.12) різниці температур газового потоку над поверхнею шихти між периферійною (T2) та проміжною (T5) зонами перерізу колошника від кількості ПВП, що підтверджує властиву вдуванню ПВП інтенсифікацію газового потоку у пристінній зоні з одночасно утрудненим перетіканням газів уздовж радіуса печі (або утрудненим рухом газів в проміжній зоні). Після проведення у вересні 2016 р. ремонту ДП з БЗП, з шоткретуванням шахти і з установкою нових термозондів, встановлена особливість розподілу температур газового потоку над поверхнею шихти, що характеризується утрудненим перетіканням газів по радіусу печі, станом на початок жовтня, не підтвердилася (рис. 4.13). Це свідчить про те, що на розподіл газового потоку над поверхнею засипу при

постійній програмі завантаження впливав знос футерівки шахти печі [66].

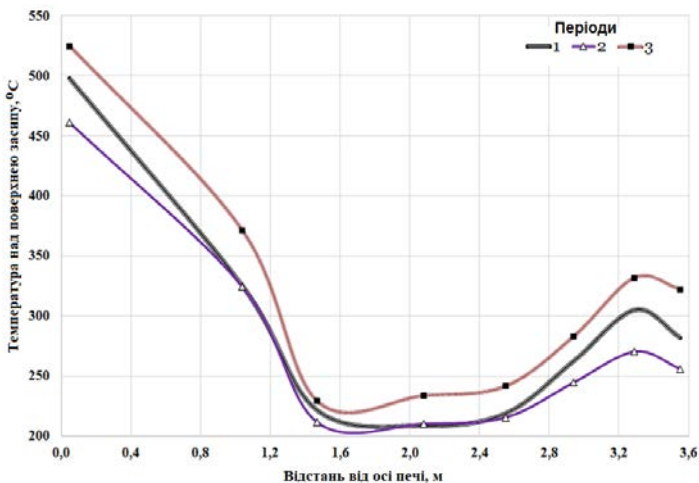


Рис. 4.11. Зміна температури газопотоку над поверхнею шихти по радіусу ДП з БЗП для перших трьох досліджуваних періодів

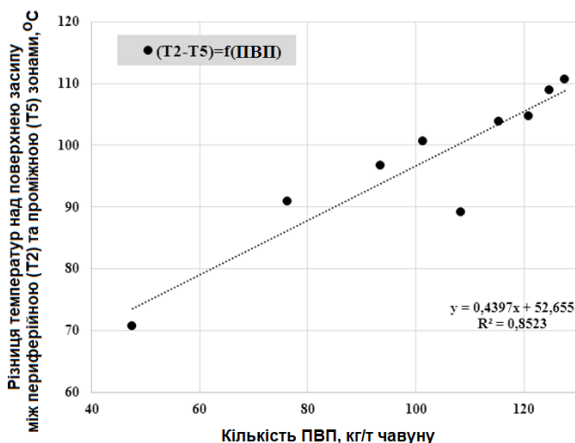


Рис. 4.12. Зв'язок різниці температур газопотоку над поверхнею шихти периферійної та проміжної зон перерізу колошника від кількості ПВП у дутті

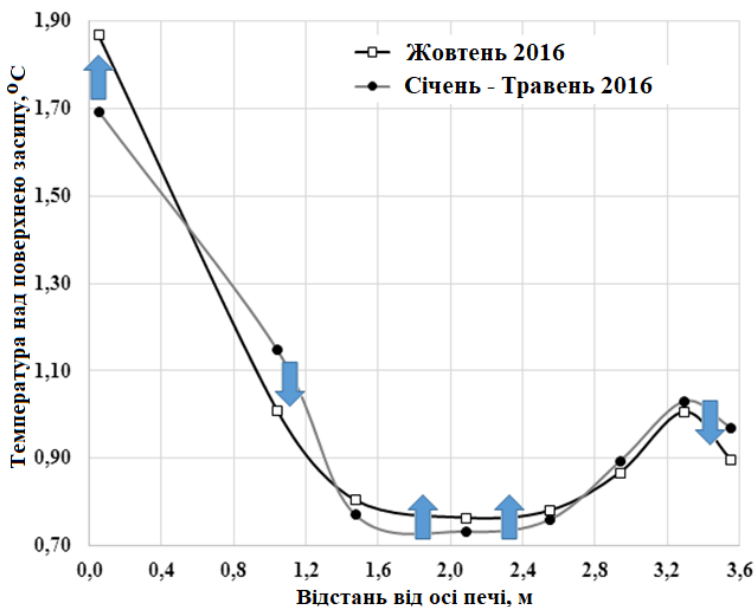


Рис. 4.13. Розподіл температур газопотоку над поверхнею засипу ДП з БЗП в січні–травні 2016 р. і в жовтні 2016 р. після шоткретування шахти

4.2. Розробка показників розподілу інтенсивності газопотоку по радіусу печі і вимог до діапазонів їх зміни в різних технологічних умовах доменної плавки. Розробка експертного модуля системи термозондів для управління завантаженням доменної печі

Наступним етапом досліджень було визначення раціональних діапазонів зміни температур газопотоку по радіусу печі, яке здійснювалося за інформацією нових термозондів того ж виробника, встановлених на ДП з БЗП у вересні 2016 р. після шоткретування шахти (попередні термозонди прослужили два роки). Аналіз виконувався за середньодобовими значеннями температур, приведених до одного радіусу, протягом жовтня 2016 р. який виявився найкращим, за середньодобовим виробництвом чавуну

(3460 т/доб), місяцем роботи ДП з БЗП за п'ять років її експлуатації. Попередньо дані термозондів, реєстровані два рази в хвилину, проходили процес первинної обробки для виключення з аналізу стоянок печі і періодів роботи в режимі з низьким не робочим рівнем засипу. З аналізу виключалися температури менше 100 °С і більше 950 °С, після чого визначалися середньогодинні і середньодобові значення температур.

В якості показників розподілу температур газового потоку були прийняті наступні відносини температур в зонах перерізу печі. Відношення температури периферійної зони (середня температура двох пристінкових термопар термозондів №1 і 2) до середньої температури по радіусу ($K_1 = T_{ПФ}/T_{СЕР}$), відношення температури центральної зони (термопара №8) до середньої температури по радіусу ($K_2 = T_{Ц}/T_{СЕР}$), відношення температури проміжної зони (середня температура термопар №3–6) до середньої температури по радіусу ($K_3 = T_{ПР}/T_{СЕР}$) і відношення температури центральної зони (термопара №8) до температури приосьової зони (термопара №7) ($K_4 = T_{Ц}/T_{Прось}$).

Для визначення раціональних діапазонів зміни запропонованих показників розподілу газового потоку був використаний показник ефективності плавки (e), який визначається виразом:

$$e = P_{від}/T_{від},$$

де $P_{від}$ – добове виробництво ДП відносно середнього в аналізованому періоді, $T_{від}$ – витрата приведенного палива (витрата коксу + 0,9·витрата коксового горіха + 0,95·витрата ПВП + 0,9·витрата ПГ) відносно середнього його значення в аналізованому періоді.

Показник (e) для періодів роботи ДП розраховувався за наступним алгоритмом:

1. Визначення показника (e) для кожної доби відносно середніх значень добового виробництва печі та приведеної витрати палива в рамках одного календарного місяця.
2. Визначення, з використанням принципу ковзного середнього, середніх значень показника (e) за 30 діб роботи печі.

3. Вибір з масиву, отриманого за п.2, кращого періоду тривалістю 30 діб за максимальним значенням показника (e).
4. Визначення середніх значень добового виробництва печі та приведеної витрати палива в обраному по п.3 кращому періоді.
5. Розрахунок щодобових значень показника (e) кожного з досліджуваних періодів відносно отриманих згідно п.4 середніх значень добового виробництва печі та приведеної витрати палива.

За середньодобовими даними значень показників розподілу газового потоку і показника (e), у випадках, коли останній приймав значення більше 1,0 од., були визначені середні значення показників $K_{1..4}$. Діапазони зміни $K_{1..4}$, прийняті в остаточному підсумку в якості раціональних, визначалися відповідно до виразу: $K_{1..4} \pm \sigma$, де σ – середньоквадратичне відхилення значень показників від їх середніх величин, які відповідають прийнятій умові: $e \geq 1,0$ од. в аналізованій виборці. В результаті виконаних розрахунків були отримані наступні раціональні діапазони зміни показників розподілу газового потоку: $K_1=0,85-0,95$ од., $K_2=1,60-2,15$ од., $K_3=0,74-0,87$ од. і $K_4=1,60-2,10$ од.

Відповідно до отриманих діапазонів сформульовані вимоги до розподілу газового потоку. Так, при регулюванні розподілу газового потоку по радіусу печі при вдуванні в горн ПВП для досягнення заданих або високих техніко-економічних показників плавки, в характерних умовах роботи досліджуваної ДП, необхідно:

1. Забезпечити достатню газопроникність периферійної зони, не допускаючи зайвого «підвантаження» її залізородними матеріалами, яке може призводити до «верхніх підвисань» та нерівного сходження шихти (відношення середньої температури газів за двома пристінковими точками термозондів до середньої температури по радіусу має бути в діапазоні 0,85–0,95 од.).
2. Забезпечити розвинений центральний газорозподіл (температура газів над поверхнею засипу шихти в центрі печі повинна в 1,60–2,15 рази перевищувати середню температуру).

3. Забезпечити розвиток взаємного перетікання газів між периферією та центром (відношення середньої температури газів проміжної зони (термопари термозондів №№ 3–6) до середньої температури по радіусу має бути в діапазоні 0,74–0,87 од.).
4. При розвиненому центральному газорозподілі для підвищення економічності плавки необхідно забезпечити вузьку осьову коксову віддушину (температура газів над поверхнею шихти на відстані 1,0 м від осі печі повинна бути менше температури осьової зони, в середньому, в 1,60–2,10 рази).

Розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу шихти ДП, відповідний оптимальним діапазнам зміни температурних показників при вдуванні ПВП, представлено на рис. 4.14.

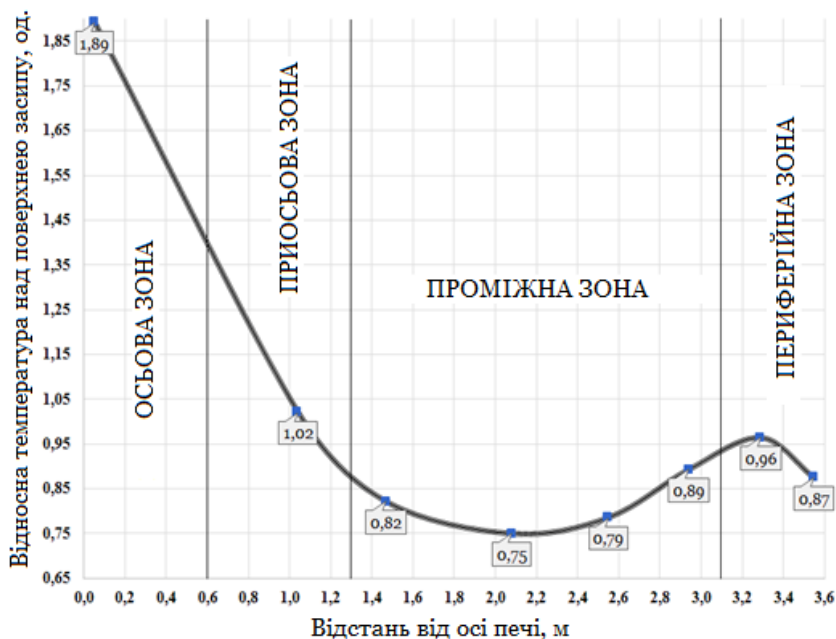


Рис. 4.14. Раціональний розподіл температур газового потоку над поверхнею засипу по радіусу колошника ДП з БЗП при використанні в технології плавки ПВП в кількості 130 кг/т чавуну

На рис. 4.15 представлена зміна середньодобових значень показників $K_{1...4}$ і показника (e) у жовтні 2016 р. З рисунка випливає, що протягом аналізованого періоду кожен із запропонованих показників періодично виходив за межі раціональних діапазонів. Так, K_1 приймав допустимі значення у 61,3 % випадків, K_2 – у 67,7 %, K_3 – у 54,8 % та K_4 – у 71,0 %. В результаті визначення кількості задовольняючих вимогам значень показників можна зробити наступний висновок. Протягом жовтня 2016 р. розподіл газового потоку по радіусу печі більшою мірою характеризувався раціональною величиною осьової віддушини при достатньо розвиненому центральному газорозподілі, периферійна зона характеризувалася надлишковою інтенсивністю газового потоку на початку місяця, причинами цього стала заключна фаза роздувочного періоду ДП після ремонту. Проміжна зона була найбільш нестабільною – до середини жовтня її можна охарактеризувати як газонапружену, з утрудненим перетіканням газового потоку уздовж радіуса, при низьких температурах газів над поверхнею шихти, а в другій половині та ближче к кінцю місяця – навпаки, надмірно розвантажену, з високими температурами газового потоку.

В результаті аналізу зміни $K_{1...4}$ також випливає, що тривалість виходу за межі допустимих діапазонів значень показників в аналізованому періоді не перевищує трьох діб роботи печі, за винятком K_1 на початку місяця, причинами чого, як це було вже сказано, з'явилася заключна фаза роздувочного періоду. З цього випливає, що підставою для зміни програми завантаження може служити більш тривалий вихід показників розподілу газового потоку за межі раціональних діапазонів, наприклад, 5–7 діб. Для точного визначення кількості діб роботи ДП з безперервним виходом показників з допустимого діапазону, необхідного для прийняття рішень щодо коригування програми завантаження, необхідно продовження досліджень в даному напрямку.

Розроблені вимоги до розподілу газового потоку і встановлені раціональні діапазони зміни запропонованих показників розподілу були взяті за основу при складанні «Атласу матриць завантаження», який включений в технологічну інструкцію по веденню доменної плавки на ДП №3 (див. розділ 4.3) [66].

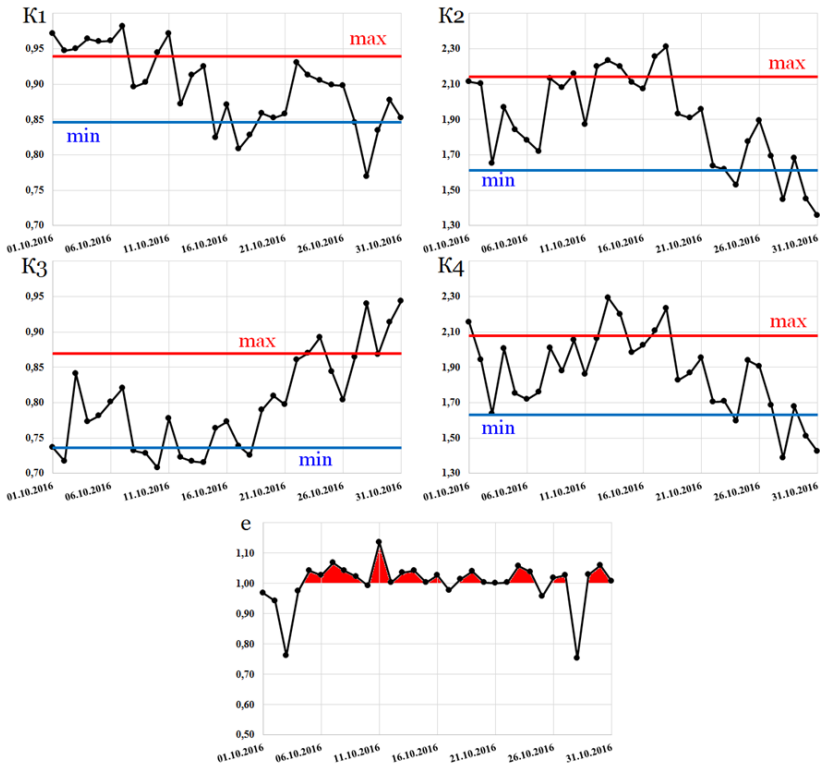


Рис. 4.15. Зміна середньодобових значень показників розподілу газового потоку $K_{1...4}$ і показника (e) на ДП з БЗП у жовтні 2016 р.

Аналогічні дослідження щодо встановлення раціональних діапазонів зміни показників розподілу інтенсивності газового потоку були виконані для режимів роботи ДП з БЗП, до повного переходу на ПВП. Ці режими характеризувалися трьома основними газодинамічними умовами (див. табл. 4.1) – режим роботи ДП на «безгазовій шихті» зі зволженим дуттям, режим роботи з природним газом і режим роботи з природним газом та ПВП. У таблиці 4.2 представлені оптимальні діапазони зміни показників розподілу газового потоку для всіх досліджуваних періодів роботи ДП.

Таблиця 4.2. Оптимальні діапазони зміни показників розподілу газового потоку для досліджуваних періодів роботи ДП з БЗП

Показник розподілу газового потоку	$\frac{K_{\min}-K_{\max}}{K_{\text{сеп}}}$			
	режим роботи ДП на «безгазовій шихті» зі зволоженням дуттям	режим роботи з природним газом	режим роботи з природним газом та ПВП	режим роботи з ПВП
K_1	$\frac{0,92-1,02}{0,97}$	$\frac{0,92-1,00}{0,96}$	$\frac{0,99-1,10}{1,04}$	$\frac{0,85-0,94}{0,89}$
K_2	$\frac{1,63-1,81}{1,72}$	$\frac{1,52-1,89}{1,70}$	$\frac{1,56-1,89}{1,72}$	$\frac{1,61-2,14}{1,88}$
K_3	$\frac{0,76-0,81}{0,79}$	$\frac{0,78-0,88}{0,83}$	$\frac{0,76-0,81}{0,78}$	$\frac{0,74-0,87}{0,80}$
K_4	$\frac{1,43-1,66}{1,55}$	$\frac{1,33-1,53}{1,43}$	$\frac{1,33-1,51}{1,42}$	$\frac{1,63-2,08}{1,85}$

Так, для першого періоду величини добового виробництва печі та приведеної витрати палива, відносно яких розраховувався показник (e), склали – 2633 т і 593 кг/т чавуну, для другого періоду – 3083 т і 559 кг/т чавуну і для третього періоду – 3321 т і 561 кг/т чавуну. На рис. 4.16 представлена зміна показника (e) в кожному досліджуваному періоді роботи ДП з БЗП, червоним кольором показані ділянки, в яких $e \geq 1,0$ од.

У листопаді 2016 р. після шоткретування шахти ДП №5 з КЗП на печі були встановлені нові термозонди. У зв'язку з чим, певний інтерес викликало виконання аналогічних досліджень з встановленням раціональних діапазонів зміни показників розподілу газового потоку по радіусу ДП №5 з КЗП і розробка відповідних рекомендацій щодо коригування режимів завантаження. З огляду на обмежені можливості конусного засипного апарату, подібні рекомендації засновані, в основному, на зміні режимів завантаження з варіюванням рівня засипу, а також на використанні різних комбінацій «прямих» і «зворотних» подач.

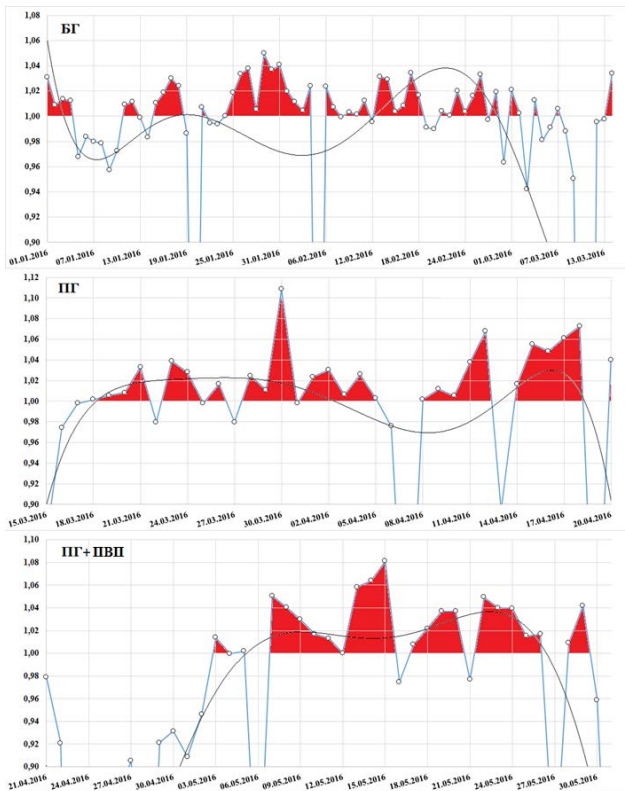


Рис. 4.16. Зміна показника (e) для трьох досліджуваних періодів роботи ДП з БЗП

Визначення раціональних діапазонів зміни показників розподілу інтенсивності газового потоку для ДП №5 з КЗП здійснювалося для трьох основних газодинамічних режимів роботи печі: при роботі на «безгазовій шихті» зі зволоженням дуттям (01.01–29.02.2016), при роботі з природним газом і ПВП (01.03–30.06.2016) та при роботі з ПВП після шоткретування шахти (12.11.2016–18.02.2017) [116].

У другому досліджуваному періоді роботи ДП з КЗП витрати ПГ і ПВП склали 15,1 м³/т чавуну і 75,3 кг/т чавуну, відповідно. У третьому періоді витрата ПВП складала 82,0 кг/т чавуну. Для першого періоду величини добового виробництва печі і сумарної витрати палива, щодо яких розраховувався показник (e), склали – 2544 т і 595 кг/т чавуну, для другого

періоду – 2776 т і 584 кг/т чавуну і для третього періоду – 2748 т і 545 кг/т чавуну.

Особливості визначення діапазонів при цьому були аналогічні їхнім визначенням для ДП №3 з БЗП. У табл. 4.3 представлені отримані діапазони.

Таблиця 4.3. Оптимальні діапазони зміни показників розподілу інтенсивності газового потоку для досліджуваних періодів роботи ДП з КЗП

Показник розподілу газового потоку	$\frac{K_{\min}-K_{\max}}{K_{\text{сеп}}}$		
	режим роботи на «безгазовій шихті» зі зволоженням дуттям	режим роботи з природним газом та ПВП	режим роботи з ПВП
K_1	$\frac{0,83-0,91}{0,87}$	$\frac{0,65-0,86}{0,75}$	$\frac{0,64-0,75}{0,70}$
K_2	$\frac{1,45-1,85}{1,65}$	$\frac{1,57-2,11}{1,84}$	$\frac{1,63-2,42}{2,02}$
K_3	$\frac{0,76-0,84}{0,80}$	$\frac{0,79-0,87}{0,83}$	$\frac{0,73-0,87}{0,80}$
K_4	$\frac{0,98-1,54}{1,26}$	$\frac{1,12-1,46}{1,29}$	$\frac{1,18-1,93}{1,56}$

Далі, з метою поширення методики використання інформації термозондів для управління розподілом шихти для ДП з використанням в технології плавки великих витрат ПВП, дослідження були виконані для ДП №9, обладнаної КЗП, (корисний об'єм 1386 м³) Дніпровського металургійного комбінату (м. Кам'янське) з встановленням оптимальних діапазонів зміни показників розподілу газового потоку по радіусу печі [116]. ДП №9 в досліджуваному періоді 01.01–29.10.2018 р. працювала з використанням в технології плавки ПВП в кількості від 70 до 160 кг/т чавуну. Для досліджуваного періоду величина добового виробництва печі і сумарної витрати палива, щодо яких розраховувався показник (e), склали – 2677 т і 568 кг/т чавуну, відповідно. У табл. 4.4 представлені оптимальні діапазони зміни показників розподілу газового потоку для досліджуваного періоду роботи ДП №9. При цьому, слід зазначити, що для даного об'єкта досліджень

величина витрати ПВП істотно не впливала на межі оптимальних діапазонів зміни температурних показників. На рис. 4.17 представлені графіки розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу шихти для ДП №5 і ДП №9 при використанні технології вдування ПВП, відповідні оптимальним діапазонами зміни температурних показників $K_{1...4}$.

Як видно з рис. 4.17 на ДП №5 спостерігається більш розвинена осьова коксова віддушина при витраті сумарного палива 546 кг/т чавуну, більшої на 9 кг/т чавуну, ніж на ДП №9 (537 кг/т чавуну), при близьких КВКО – 0,51 на ДП №5 і 0,49 на ДП №9. Це пояснюється роботою ДП №9 з більшим рудним навантаженням на колошнику при більшій витраті ПВП, що створює передумови для більшого потрапляння рудних матеріалів до центру печі при обмежених можливостях КЗП, крім цього, ДП №9 працює без відсіву залізрудних матеріалів, і, як наслідок, з великим верхнім перепадом тиску (0,15 аті на ДП №5, 0,27 аті на ДП №9), що сприяє погіршенню газопроникності і перерозподілу газового потоку. Більш економічний режим роботи ДП №9 при менш розвиненій осьовій віддушину пояснюється використанням коксу кращої якості (CSR коксу на ДП №5 – 48,4%, на ДП №9 – 52,9%) і значно меншою кількістю вапняку в шихті (на ДП №5 – 50,6, на ДП №9 – 8,5 кг/т чавуну).

Таблиця 4.4. Оптимальні діапазони зміни показників розподілу газового потоку для досліджуваного періоду роботи (01.01–29.10.2018 р.) ДП корисним об'ємом 1386 м³ с КЗП

Показник розподілу газового потоку	$\frac{K_{\min}-K_{\max}}{K_{\text{сеп}}}$
	режим роботи з ПВП
K_1	$\frac{0,75-0,93}{0,84}$
K_2	$\frac{1,43-1,84}{1,63}$
K_3	$\frac{0,78-0,94}{0,86}$
K_4	$\frac{1,19-1,52}{1,35}$

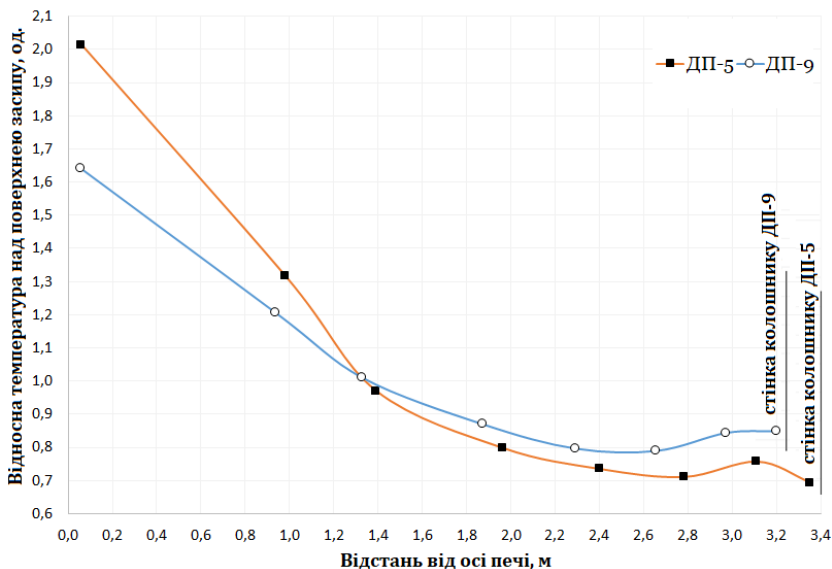


Рис. 4.17. Раціональні розподіли температур газового потоку над поверхнею засипу по радіусу колошника ДП №5 і ДП №9 при використанні в технології плавки ПВП в кількості 82 і 136 кг/т чавуну, відповідно

На підставі встановлених оптимальних діапазонів зміни температурних показників для технології плавки з використанням ПВП розроблений і пройшов дослідно-промислове випробування експертний модуль системи термозондів для управління завантаженням: для ДП №3 з БЗП у 2016 р. і для ДП №9 з КЗП у 2018 р. [116]. Експертний модуль включає розрахунок і відображення у вигляді графіків показників розподілу газового потоку і видачу рекомендацій щодо коригування режиму завантаження в режимі реального часу при стійкому виході показників розподілу з оптимального діапазону.

На рис. 4.19 представлені відеокадри розробленого експертного модуля для ДП №3 з БЗП при виході показників розподілу за межі оптимального діапазону. Як видно з рис. 4.19 при стійкому виході (більше 4-х діб поспіль) температурних показників з оптимального діапазону їх зміни технологу видається рекомендація щодо коригування матриці

завантаження. Розробка різних варіантів матриць завантаження для експертного модуля здійснювалася за допомогою модельної системи ІЧМ [89]. Необхідний набір матриць завантаження входить в блок генерації рекомендацій, що є складовим елементом експертного модуля.

Для умов ДП №9, з огляду на обмежені можливості КЗП з управління розподілом шихтових матеріалів в печі, рекомендації щодо коригування режимів завантаження засновані на використанні різних комбінацій прямих і зворотних подач в циклі [116]. На рис. 4.18 представлені відеокадри розробленого експертного модуля при стійкому виході показників розподілу температур газового потоку за межі встановленого оптимального діапазону.

Важливо відзначити, що при роботі експертного модуля в режимі реального часу необхідне коригування меж оптимальних діапазонів температурних показників, яке повинно здійснюватися при істотних змінах технології доменної плавки, зокрема, після капітальних ремонтів з шоткретування шахти ДП і (або) після заміни холодильних плит системи охолодження, після заміни термозондів, при зміні дуттєвих добавок, при кардинальній зміні складу шихтових матеріалів.



Рис. 4.18. Відеокадр експертного модуля з управління завантаженням ДП №9 з КЗП

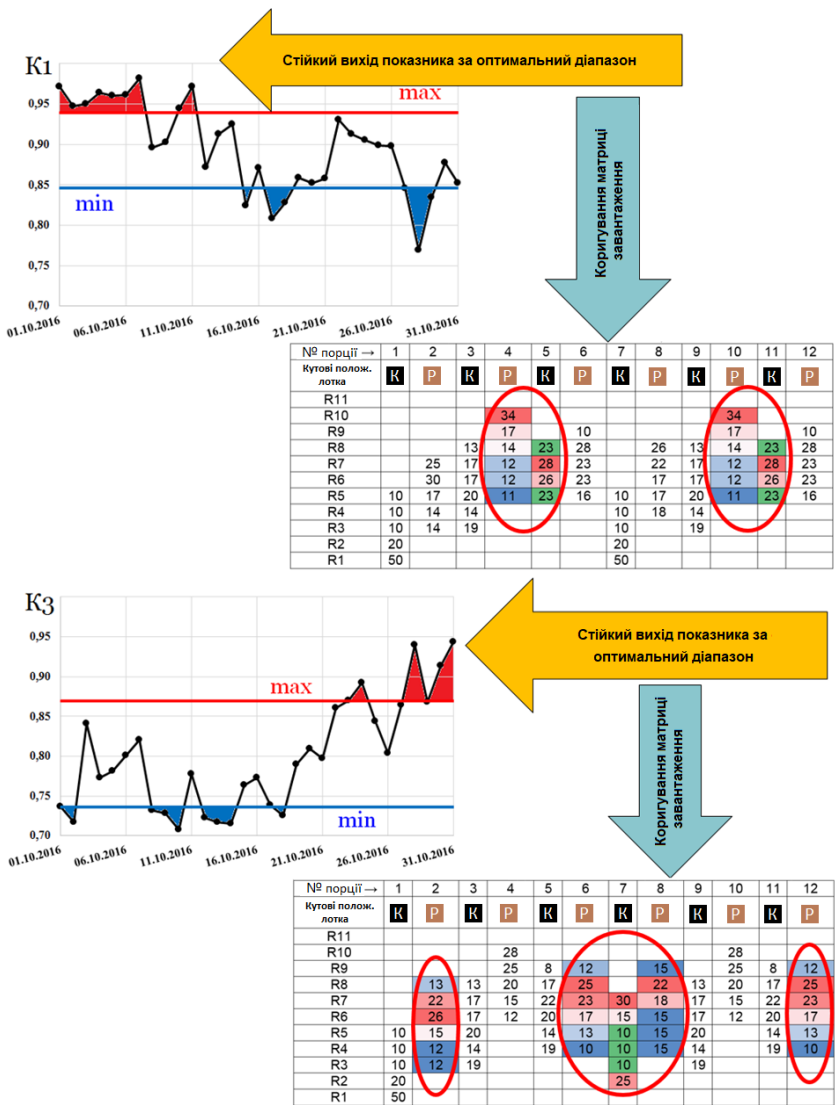


Рис. 4.19. Відеокадри експертного модуля з управління завантаженням ДП №3 з БЗП

4.3. Доповнення до технологічної інструкції по доменному виробництву

Ознаки периферійного ходу печі:

– середньодобова температура газів за двома пристінковими точками термозондів перевищує середню температуру по радіусу більш, ніж у 0,95 рази.

Для зменшення інтенсифікації периферійного потоку газів необхідно вжити таких заходів:

– для умов ДП з БЗП необхідно збільшити кількість залізовмісних матеріалів і зменшити кількість коксу у периферійній зоні печі шляхом зміни розподілу порцій залізородних матеріалів №4 і №10 і коксу №5 і №11 базової матриці завантаження (таблиця ТІ-1).

Таблиця ТІ-1

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кут. полож. лотка	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ
R10				34						34		
R9				17		10				17		10
R8			13	14	23	28		26	13	14	23	28
R7		25	17	12	28	23		22	17	12	28	23
R6		30	17	12	26	23		17	17	12	26	23
R5	10	17	20	11	23	16	10	17	20	11	23	16
R4	10	14	14				10	18	14			
R3	10	14	19				10		19			
R2	20						20					
R1	50						50					

Ознаки центрального ходу:

– середньодобова температура газів над поверхнею засипу шихти за показаннями термозондів в центрі печі більш, ніж в 1,60–2,15 рази перевищує середню температуру.

Для усунення надмірно розвиненого центрального ходу необхідно:

– для умов ДП з БЗП необхідно зменшити кількість коксу в осьовій зоні печі шляхом зміни розподілу коксу порцій №1 і №7 базової матриці завантаження (таблиця ТІ-2).

Таблиця ПІ-2

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кут. полож. лотка	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ
R10				28						28		
R9				25	8	10				25	8	10
R8			13	20	17	28		26	13	20	17	28
R7	30	25	17	15	22	23	30	22	17	15	22	23
R6	15	30	17	12	20	23	15	17	17	12	20	23
R5	10	17	20		14	16	10	17	20		14	16
R4	10	14	14		19		10	18	14		19	
R3	10	14	19				10		19			
R2	25						25					
R1												

Ознаки канального ходу:

– середньодобова температура футерівки по висоті доменної печі в одному або декількох секторах по окружності (окружність ДП розділяється на 4-6 рівних секторів) перевищує середню температуру футерівки по окружності більш ніж у 1,5 рази.

Для усунення канального ходу необхідно:

– забезпечити завантаження гребеня залізорудної частини подачі в сектор розташування каналу зміною програми роботи обертового розподільника для умов ДП з КЗП;

– для умов ДП з БЗП вивантажити зменшену подачу шихтових матеріалів в сектор розташування каналу шляхом реалізації секторного режиму БЗП.

Для реалізації секторного режиму необхідно в сектор розташування каналу вивантажити спочатку порцію залізовмісних матеріалів (агломерат основнію 1,4–1,6 од., переважно не гарячий, без окатишів і інших добавок) з 9-го кутового положення, а потім у цей же сектор вивантажити порцію коксу з 8-го кутового положення. При цьому для запобігання скупчення матеріалів на кордонах сектора, нижній шихтовий затвор вагового бункера БЗП повинен бути відкритий на 100% і маси порцій повинні бути обрані таким чином, щоб при повному відкриванні нижнього шихтового затвора матеріали повністю вивантажувалися в піч при одноразовому проходженні лотком заданого сектора.

Ліквідація каналного ходу краща завантаженням матеріалів з більшим, в порівнянні з робочим, рудним навантаженням. Періодичність використання секторного завантаження вибирається експериментально.

При вдуванні в горн ПВП для забезпечення рівного ходу печі і заданих техніко-економічних показників плавки необхідно:

- забезпечення помірно розвинутого периферійного газового потоку,
- забезпечення раціонального взаємного перетікання газів між периферійною і центральною зонами,
- забезпечення досить розвинутого осьового газового потоку,
- забезпечення вузької осьової коксової віддушини.

Ознаки та усунення недостатньо розвинутого периферійного газового потоку.

Ознака: середньодобова температура газів за двома пристінковими точками термозондів менше середньої температури по радіусу ($T_{ПФ}/T_{СЕР} < 0,85$).

Для забезпечення помірно розвинутого периферійного газового потоку для умов ДП з БЗП необхідно зменшити кількість заліззовмісних матеріалів (порції №4, №6, №10 і №12) і збільшити кількість коксу (порції №5 і №11) в периферійній зоні печі в базовій матриці завантаження (таблиця ТІ-3).

Таблиця ТІ-3

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кут. полож. лотка	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ
R10				20						20		
R9				24						24		
R8			13	26	25	10		26	13	26	25	10
R7		25	17	15	26	28		22	17	15	26	28
R6		30	17	15	26	23		17	17	15	26	23
R5	10	17	20		23	23	10	17	20		23	23
R4	10	14	14			16	10	18	14			16
R3	10	14	19				10		19			
R2	20						20					
R1	50						50					

Ознаки надмірно розвинуеного і недостатнього взаємного перетікання газів між периферійною і центральною зонами, забезпечення раціонального взаємного перетікання газів.

При надмірно розвинуеному взаємному перетіканні газів між периферією і центром відношення середньодобової температури газів над поверхнею шихти до температури проміжної зони (термопари термозондів №№ 3-6) менше 1,15–1,35 од.

Для умов ДП з БЗП необхідно «довантажити» залізовмісними матеріалами проміжну зону (зміни в порціях №2, №6, №7, №8 та №12 базової матриці завантаження) (таблиця ТІ-4).

Таблиця ТІ-4

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кут. полож. лотка	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ
R10				28						28		
R9				25	8	12		15		25	8	12
R8		13	13	20	17	25		22	13	20	17	25
R7		22	17	15	22	23	30	18	17	15	22	23
R6		26	17	12	20	17	15	15	17	12	20	17
R5	10	15	20		14	13	10	15	20		14	13
R4	10	12	14		19	10	10	15	14		19	10
R3	10	12	19				10		19			
R2	20						25					
R1	50											

При недостатньо розвинуеному взаємному перетіканні газів між периферією і центром відношення середньодобової температури газів над поверхнею шихти до температури проміжної зони (термопари термозондів №№ 3-6) більше 1,15–1,35 од.

Для умов ДП з БЗП необхідно «послабити» проміжну зону формуванням шарів коксу збільшеною товщиною в проміжній зоні печі (зміни в порціях №1, №3, №5, №7, №9 та №11 базової матриці завантаження) (таблиця ТІ-5).

Таблиця ТІ-5

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кут. полож. лотка	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ
R10				28						28		
R9				25		10				25		10
R8				20	23	28		26		20	23	28
R7		25	25	15	28	23	30	22	25	15	28	23
R6		30	25	12	26	23	15	17	25	12	26	23
R5		17	28		23	16	10	17	28		23	16
R4	10	14	22				10	18	22			
R3	15	14					10					
R2	15						25					
R1	60											

Ознаки та усунення недостатньо розвинутого осевого газового потоку.

Ознака: середньодобова температура газів над поверхнею засипу шихти в центрі печі менше, ніж в 1,60–2,15 рази перевищує середню температуру по радіусу. Для умов ДП з БЗП необхідно збільшити кількість коксу в осевій зоні (порції №1 і №7) та зменшити кількість залізовмісних матеріалів в проміжно-осевій зоні печі (порції №2 і №8) в базовій матриці завантаження (таблиця ТІ-6).

Таблиця ТІ-6

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кут. полож. лотка	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ
R10				28						28		
R9				25	8	10		15		25	8	10
R8		13	13	20	17	28		22	13	20	17	28
R7		22	17	15	22	23		18	17	15	22	23
R6		26	17	12	20	23		15	17	12	20	23
R5		15	20		14	16		15	20		14	16
R4	10	12	14		19		10	15	14		19	
R3	15	12	19				15		19			
R2	15						15					
R1	60						60					

Ознаки надмірно широкої і забезпечення вузької осьової коксової віддушини.

При надмірно широкій осьовій коксовій віддушині відношення середньодобової температури газів над поверхнею шихти в осьовій зоні до температури на відстані 1,0 м від осі печі становить менше 1,60–2,10 од.

Для умов ДП з БЗП необхідно збільшити рудне навантаження в проміжно-осьовій зоні печі (зміни в порціях №5, №6, №11 і №12 базової матриці завантаження) (таблиця ТІ-7).

Таблиця ТІ-7

№ порції →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кут. полож. лотка	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ	К	ЗВМ
R10				28						28		
R9				25		12				25		12
R8			13	20	23	25		26	13	20	23	25
R7		25	17	15	28	23		22	17	15	28	23
R6		30	17	12	26	17		17	17	12	26	17
R5	10	17	20		23	13	10	17	20		23	13
R4	10	14	14			10	10	18	14			10
R3	10	14	19				10		19			
R2	20						20					
R1	50						50					

Висновки до Глави 4.

1. Встановлено особливості зміни температури над поверхнею засипу шихти в залежності від витрати палива та вмісту окатишів в пристінній зоні, що відкриває можливість подальшого використання інформації термозондів для оперативного управління газовим потоком. Інформація, що отримується від стаціонарних термозондів, дозволяє контролювати вміст окатишів в периферійній зоні печі, що вкрай важливо при формуванні захисного гарнісажу в печі.
2. В результаті досліджень встановлено відсутність впливу на характер розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу по радіусу печі температури доменної шихти при її завантаженні, як в

цілому, так і в окремих зонах перерізу печі по радіусу, температури газового потоку збільшуються пропорційно збільшенню кількості гарячого агломерату у складі шихти. Отримані результати дозволяють використовувати інформацію термозондів для управління завантаженням при різному компонентному складі шихтових матеріалів.

3. Для умов ДП з БЗП на початковому етапі освоєння пиловугільного палива встановлено зв'язок різниці температур газового потоку над поверхнею шихти між периферійною та проміжною зонами перерізу колошника від кількості ПВП, що свідчить про інтенсифікацію газового потоку в пристінній зоні при збільшенні витрати ПВП з одночасно утрудненим рухом газів в проміжній зоні по радіусу печі.
4. Розроблено вимоги до розподілу газового потоку по радіусу печі, необхідні при його регулюванні в умовах вдування в горн пиловугільного палива для досягнення заданих або високих техніко-економічних показників плавки, в характерних умовах плавки досліджуваного об'єкту.
5. Розроблено температурні показники розподілу газового потоку по радіусу доменної печі. Для доменних печей з БЗП і з КЗП встановлені їх оптимальні діапазони зміни при роботі ДП в різних газодинамічних і паливних умовах: при роботі на «безгазовій шихті», з природним газом, з природним газом та пиловугільним паливом, окремо з пиловугільним паливом.
6. Для доменних печей з БЗП і з КЗП розроблений і пройшов дослідно-промислове випробування експертний модуль системи контролю температур газового потоку (системи термозондів) над поверхнею шихти в доменній печі, що генерує коригувальні дії режиму завантаження при виході показників розподілу температур за оптимальний діапазон їх зміни.
7. Розроблено доповнення до технологічної інструкції по доменному виробництву щодо коригування матриць завантаження БЗП при відхиленнях газового потоку від розроблених вимог до його раціонального розподілу по радіусу печі.

ГЛАВА 5

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЗМІНУ ТЕМПЕРАТУР ФУТЕРІВКИ ПО ВИСОТІ ТА ОКРУЖНОСТІ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ ПЛАВКОЮ

5.1. Визначення факторів, що впливають на зміну температур футерівки шахти, розпару і заплечиків доменної печі

5.1.1. Дослідження зміни температур футерівки шахти, розпару і заплечиків доменної печі

Метою виконання досліджень, представлених в цьому розділі, є встановлення впливу технологічних факторів на зміну температур футерівки по висоті та окружності доменної печі, а також встановлення граничних значень температур, які можуть свідчити про частковий або повний знос футерівки шахти за п'ятирічний період експлуатації печі.

Обрана в якості об'єкта досліджень доменна піч з БЗП по конструктивним рішенням і рівню оснащення засобами автоматизації відповідає світовим стандартам [52, 60, 104, 117]. Крім сучасних систем автоматизованого контролю, по висоті і периметру шахти печі на глибині 100 мм, при проектній товщині футерівки – 300 мм, встановлені термопары на шести горизонтах шахти ДП, а також у розпарі, заплечиках і в підфурменій зоні (рис. 5.1). По окружності печі термопары встановлені за таким принципом: на рівні заплечиків, розпару і трьох нижніх горизонтах шахти встановлено по вісім термопар, на наступних вище двох горизонтах – по шість термопар і на верхньому горизонті – чотири термопары [60]. Футерівка по висоті шахти печі виконана з двох типів вогнетривких матеріалів:

- для зони від рівня низу заплечиків до середини шахти – вогнетривкий матеріал з високим вмістом карбід кремнію. Технічно це визначається стійкістю цього матеріалу до контакту з чавуном і шлаком, а також, високою теплопровідністю, що дозволяє зменшити температуру гарячої поверхні футерівки з подальшим формуванням захисного

шару гарнісажу, при цьому маючи високі характеристики міцності в робочих умовах доменного процесу;

- для середньої і верхньої частин шахти – вогнетривкий матеріал з високим вмістом глинозему на основі шамоту. Застосування цього матеріалу дозволяє добитися високої стійкості до хімічного впливу і абразивного зносу у відновному середовищі.

При аналізі температур футерівки прийнято умовний поділ печі по висоті на дві зони, перша з яких (нижня) охоплює пояс розпару, заплечиків і низ шахти, друга (верхня) – середину і верх шахти. Температури для цих зон визначені, відповідно, як середні температури футерівки за показаннями термопар, які перебувають в межах цих зон поясів.

Аналіз виконано для двох кампаній шахти печі. На рис. 5.2 приведена зміна середньомісячних температур протягом першої кампанії шахти (до червня 2014 р.), на рис. 5.3 – протягом другої кампанії шахти (до вересня 2016 р.).

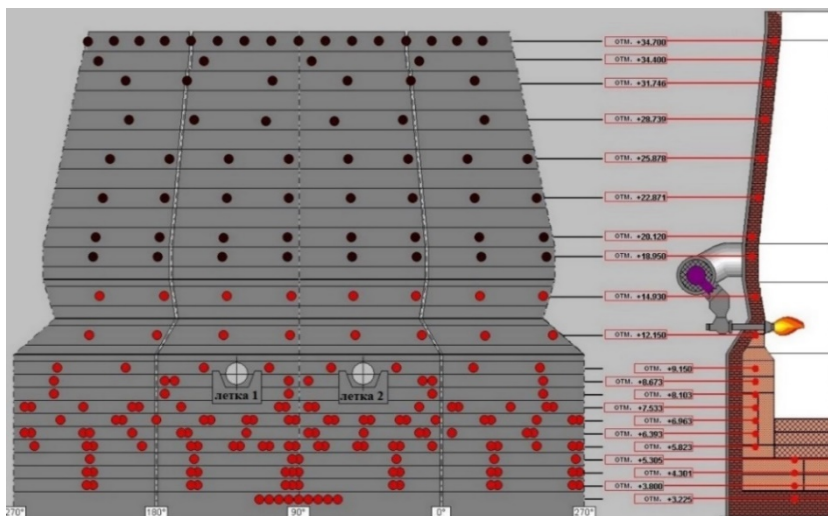


Рис. 5.1. Встановлення термопар по висоті і окружності ДП

Як впливає з аналізу графіка, представленого на рис. 5.2, з моменту задувки ДП (жовтень 2011 р.) величина середньомісячної температури футерівки середини і верху шахти складала 175–200 °С і зберігалася на цьому рівні

протягом восьми місяців, аж до червня 2012 р. Потім почалося поступове збільшення температури на цих рівнях, причиною такого зростання стала нестабільність властивостей шихтових матеріалів, зокрема, використання високоосновного агломерату місцевого виробництва нестабільного хімічного складу, а також відмова від високоякісного коксу класу «Преміум». На додаток до цього, відсутність у складі доменної шихти промивних матеріалів сприяло посиленню периферійного газового потоку, що в сукупності з нестабільністю якості шихтових матеріалів призводило до збільшення середньомісячної температури футерівки середини і верху шахти і зумовило пошук рішень по вибору раціональних режимів завантаження БЗП, спрямованих на стабілізацію розподілу газового потоку в цих умовах [93]. Збільшення температури до рівня 400 °С (в два рази за аналізований період роботи печі) відбувалося протягом семи наступних місяців – до лютого 2013 р. і могло свідчити про значне зменшення товщини футерівки на рівнях середини і верху шахти (рис. 5.2).

Як показав аналіз технологічної ситуації, подальша стабілізація температур (відсутність її зростання більше ніж 400 °С) викликана використанням зміненої програми завантаження [53, 92], а також введенням до складу доменної шихти матеріалів, що містять марганець та володіють дієвими промивальними властивостями. Комплекс цих заходів дозволив шляхом оновлення коксової насадки перерозподілити газовий потік в бік осьової зони і, тим самим, зберегти температуру футерівки шахти з незначними відхиленнями на досягнутому рівні. Незважаючи на прийняті технологічні заходи, температура, починаючи з лютого 2014 р. все ж поступово збільшилася до 450 °С. Виконаний перед шоткретуванням шахти в червні 2014 р. візуальний огляд шахти показав відсутність футерівки, що дозволило зробити висновок про те, що середня температура середини і верху шахти на рівні 450 °С свідчить про повний знос футерівки.

Аналіз динаміки зміни температури середини та верху шахти протягом другої кампанії роботи шахти (рис. 5.3) показав їх поступове зростання від 200–250 °С до 550 °С, що супроводжувалося на початку зупинками ДП на тривалі періоди (87 і 43 доби) без випуску козлового чавуну [112], потім протягом дев'яти місяців з моменту задувки, з липня

2014 р. до березня 2015 р. середньомісячна температура футерівки середини і вершу шахти змінювалася від 200 до 250 °С. Величини 350 °С вона досягла в грудні 2015 р., далі при роботі на «безгазовій» шихті зі зволоженим дуттям, температура на цьому рівні трималася до введення у склад дуття природного газу (ПГ), що сприяло зменшенню температури футерівки до 300 °С.

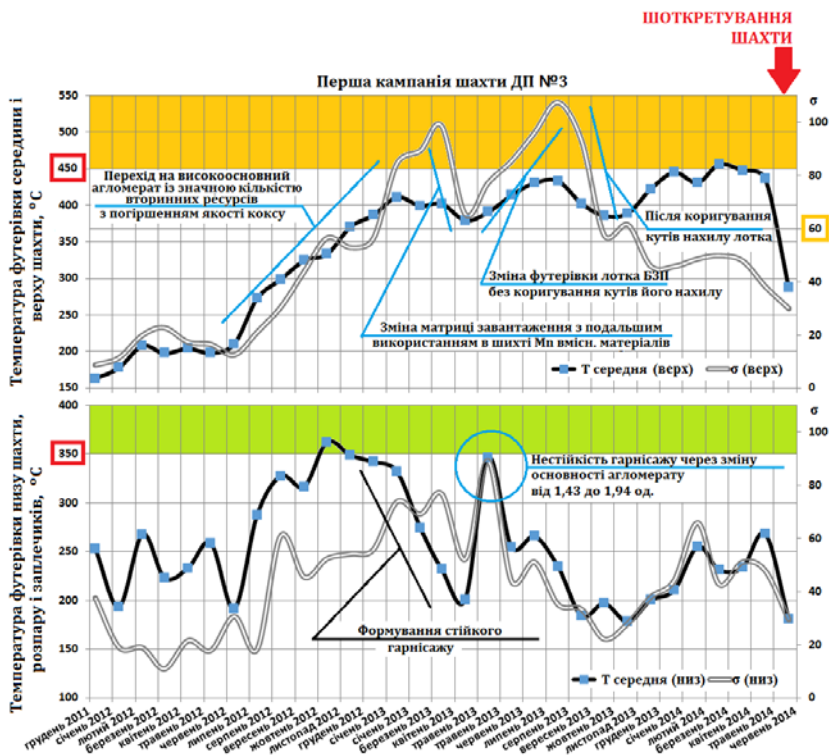


Рис. 5.2. Динаміка зміни температури футерівки ДП протягом першої кампанії шахти

Початок освоєння технології вдування ПВП привів до різкого збільшення температури футерівки середини і вершу шахти. Після перевищення значення 450 °С в липні 2016 р., який є ознакою зносу футерівки, що було встановлено за результатами аналізу першої кампанії футерівки шахти, при цьому, термопари фактично реєстрували вже температуру

периферійного газового потоку, яка досягла величини 550°C перед черговим шоткретуванням шахти.

Освоєння технології вдування ПВП на ДП з виходом на вдування понад 120 кг/т чавуну (18–20 т/год) збіглося із закінченням дворічної кампанії футерівки шахти, що не дозволяє зробити однозначний висновок для даних умов про вплив ПВП на швидкість зносу футерівки шахти. При цьому встановлено, що найбільш теплонагруженою периферійною зоною по висоті ДП при вдуванні ПВП була середина шахти. Це пов'язано, в першу чергу, з впровадженням в доменному цеху нетипового «висову» повітряних фурм в робочий об'єм печі (650–700 мм), а також роботою з високим тиском під колошником (1,75–1,80 аті) [60].

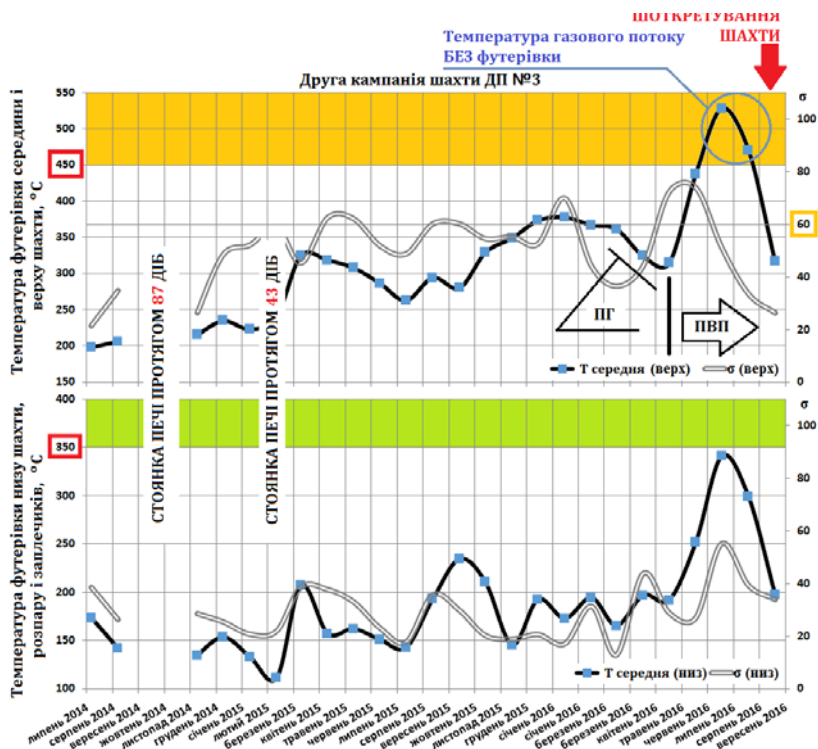


Рис. 5.3. Динаміка зміни температури футерівки ДП протягом другої кампанії шахти

Аналогічний аналіз виконаний при оцінці зміни середньомісячної температури футерівки низу шахти, розпару і заплечиків ДП. Як впливає з аналізу рис. 5.2, з початку кампанії ДП температура футерівки нижньої зони печі змінювалася в діапазоні 200–250 °С. Подальше, починаючи з червня 2012 р., збільшення температур було викликано технологічними умовами (аналогічно з верхніми горизонтами шахти). Це в сукупності з відсутністю формування з агломерату раціональної головної частини порцій шихти при значному (від 30 до 55%) збільшенні вмісту окатишів в залізорудній частині шихти, призвело до порушення оптимального співвідношення агломерату та окатишів в периферійній зоні печі і, як наслідок, до формування нестійкого гарнісажу і далі, ймовірно, до практично повного його оповзання. В результаті цього, середня температура футерівки низу шахти, розпару і заплечиків збільшилася до 350 °С у листопаді 2012 р. (рис. 5.3).

Період з грудня 2012 р. по травень 2013 р. характеризувався зменшенням до 200 °С середньомісячної температури футерівки низу шахти, розпару і заплечиків внаслідок використання раціональних режимів формування порцій. Потім відбулося оповзання гарнісажу внаслідок різкого переходу на високоосновний агломерат (зміна основності CaO/SiO_2 від 1,43 до 1,94 од.), що супроводжувалося збільшенням температури нижньої зони до 350 °С (рис. 5.3). Після цього при запровадженні раціональних режимів формування головної частини порції з агломерату та стабілізації, щодо попередніх періодів роботи ДП, вмісту окатишів в залізорудній частині шихти, значення середньомісячної температури футерівки нижньої зони зменшилися і їх коливання варіювалися від 200 °С до 275 °С аж до кінця першої кампанії футерівки [60].

Протягом другої кампанії футерівки шахти ДП середньомісячна температура футерівки низу шахти, розпара і заплечиків характеризувалася відносно стабільною своєю зміною, значення температури футерівки нижньої зони печі не перевищували 250 °С (рис. 5.3). Це обумовлено використанням на ДП раціональних режимів формування порцій, які забезпечують утворення відносно стабільного гарнісажу при змінній частці окатишів в залізорудній частині шихти. Така тенденція зміни температури футерівки нижньої

зони печі спостерігалася до кінця червня – початку липня 2016 р., коли в технології плавки почали вдувати в горн велику кількість ПВП. У липні 2016 р. середня температура футерівки низу шахти, розпару і заплечиків складала 350 °С, а в серпні зменшилася до 300 °С. Після чого ДП була видута на капітальний ремонт.

Таким чином, в результаті аналізу зміни температур футерівки шахти, розпару і заплечиків ДП протягом п'яти років її експлуатації встановлено, що середньомісячна температура футерівки середини і верху шахти – 400 °С є показником значного її зносу, потім знос футерівки сповільнюється. При перевищенні середньомісячною температурою значення 450 °С, як показали дві кампанії шахти, футерівка середини і верху шахти повністю відсутня. При середньомісячній температурі футерівки низу шахти, розпару і заплечиків – 300 °С має місце утворення в нижній зоні печі нестійкого гарнісажу, що вимагає прийняття рішень щодо коригування складу і режиму формування порцій шихти. Наближення температури футерівки нижньої зони до значення 350 °С свідчить про повну відсутність захисного гарнісажу. Середньомісячні температури футерівки нижньої зони печі понад 350 °С протягом п'яти років експлуатації печі практично не були відзначені, отже, перевищення даного рівня температури може свідчити про руйнування футерівки [60].

5.1.2. Сумарні теплові навантаження системи охолодження ДП

Альтернативним джерелом інформації про стан футерівки шахти можуть бути сумарні теплові навантаження системи охолодження ДП [59, 118–122]. Аналіз зміни сумарних теплових навантажень системи охолодження протягом п'яти років експлуатації ДП (рис. 5.4) показав, що при перевищенні даного показника значення 24000 кВт футерівка шахти печі повністю відсутня. У той же час відсутність футерівки шахти може супроводжуватися і більш низькими значеннями даного показника. Так, протягом першого кампанії шахти ДП тенденція збільшення показника сумарних теплових навантажень системи охолодження з подальшим перевищенням значення 24000 кВт спостерігалася з початку 2014 р. протягом другої кампанії шахти ДП, різке

збільшення показника сумарних теплових навантажень (в 2,0–2,5 рази) збіглося як зі стабільним використанням в технології плавки вдування значної кількості ПВП, так і з тривалістю терміну експлуатації футерівки шахти печі. В кінці другої кампанії шахти ДП збільшення показника сумарних теплових навантажень було незначним – від 9000 до 19000 кВт, в середньому. В кінці першої кампанії шахти печі даний показник приймав значно більші значення, як за абсолютною величиною (до 25000 кВт), так і за тривалістю періоду з високими значеннями цього показника. Поясненням великих значень показника сумарних теплових навантажень системи охолодження в першій кампанії шахти ДП був надмірно розвинений периферійний газовий потік.

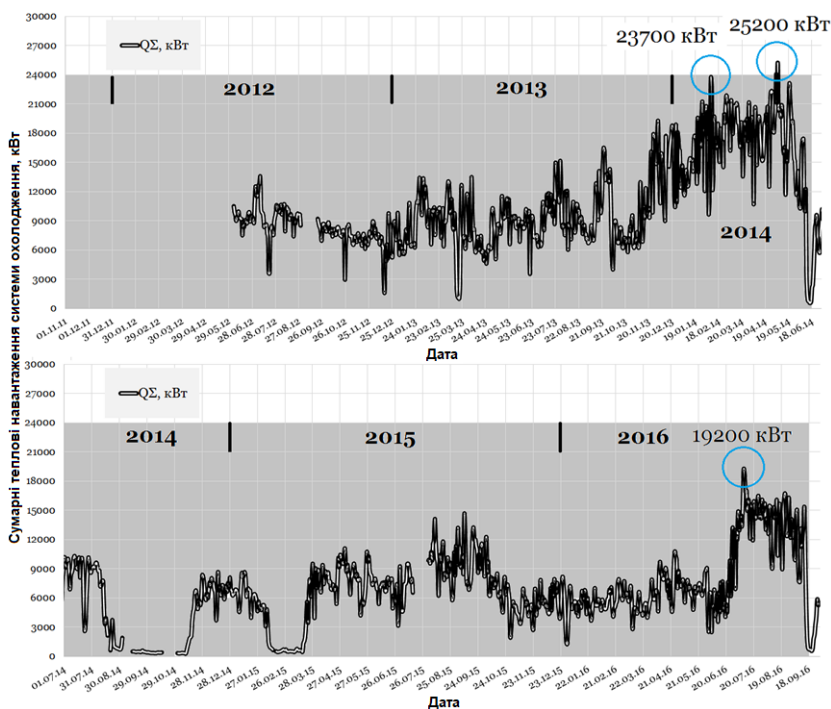


Рис. 5.4. Динаміка зміни сумарних теплових навантажень системи охолодження ДП протягом п'яти років експлуатації печі

Показником впливу виключно зносу футерівки на її температуру є отримані з високим коефіцієнтом кореляції залежності сумарних теплових навантажень системи охолодження від температури футерівки верхньої і нижньої зон печі в другій кампанії (рис. 5.5б), тоді як в першій кампанії при порушеннях технологічного режиму (надмірно розвинений периферійний газовий потік і утворення нестабільного гарнісажу) дана залежність не встановлена (рис. 5.5а). Таким чином, контроль залежності сумарних теплових навантажень системи охолодження від температури футерівки в нижній і верхній зонах ДП дозволяє розмежувати вплив технологічних чинників та зносу футерівки на зміну її температури.

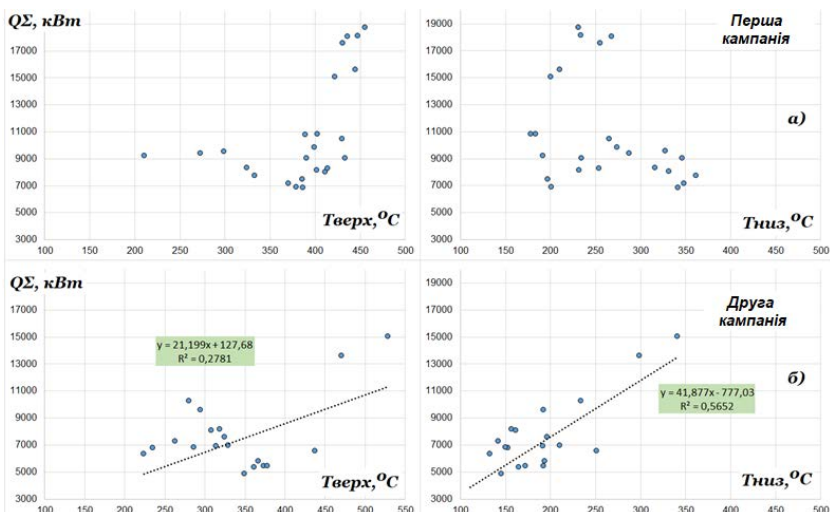


Рис. 5.5. Залежності сумарних теплових навантажень системи охолодження від температури футерівки нижньої і верхньої зон ДП в першій (а) та другій (б) кампаніях футерівки

5.1.3. Визначення допустимого діапазону змін температур шахти по окружності, відповідного до стабільної роботи печі

Важливою, з точки зору подальшого управління процесом, інформацією є визначення зміни температур шахти по окружності, відповідної стабільній роботі печі.

Прийнято, що одним з показників стабільного ходу печі можуть бути середньоквадратичні відхилення температур футерівки по окружності печі (σ). Для досліджуваного об'єкта встановлено, що при порушеннях ходу печі (σ) температур перевищує величину $0,2 \cdot T_{сер}$, де $T_{сер}$ – середньомісячна температура футерівки шахти. Так, для рівнів установки термопар в футерівці середини і верху шахти ДП величина (σ) температур не повинна перевищувати 60 °С, а допустимий рівень (σ) температур низу шахти, розпару і заплечиків становить 40 °С. На рис. 5.6 представлена зміна середньомісячних значень (σ) температур футерівки ДП середини і верху шахти (а), низу шахти, розпару і заплечиків (б) за 5 років роботи печі.

Аналіз зміни даного показника протягом 5 років експлуатації печі показав, що при перевищеннях (σ) температур встановлених граничних значень мали місце наступні технологічні відхилення від нормального ходу печі:

- З другої половини 2012 р. до жовтня 2013 р. – освоєння технології роботи на високоосновному агломераті місцевого виробництва з одночасним погіршенням якості коксу. У цей період робота ДП супроводжувалася частими оповзаннями гарнісажу. Технологічними заходами, спрямованими на стабілізацію ходу печі, були: оптимізація якісного і кількісного складу агломераційної шихти [53, 113], кардинальна зміна робочої програми завантаження [92], випробування прийомів формування порцій шихтових матеріалів, що сприяють утворенню стійкого гарнісажу, використання в складі доменної шихти матеріалів, що містять значну кількість оксидів марганцю.
- З кінця березня по травень 2015 р. – незначне перевищення середньоквадратичного відхилення температур футерівки середини і верху шахти

допустимих значень обумовлено другою, протягом експлуатації печі, роздувкою після тривалої зупинки (43 доби) [112].

- На початку 2016 р. робота ДП на «безгазовій» шихті зі зволоженням дуттям стала причиною збільшення показника середньоквадратичного відхилення температур футерівки середини і вершу шахти.
- В кінці другої кампанії футерівки шахти (з травня 2016 р.) збільшення показника середньоквадратичного відхилення температур футерівки по всій висоті ДП обумовлено роботою із вдуванням значної кількості ПВП та одночасним зносом футерівки шахти.

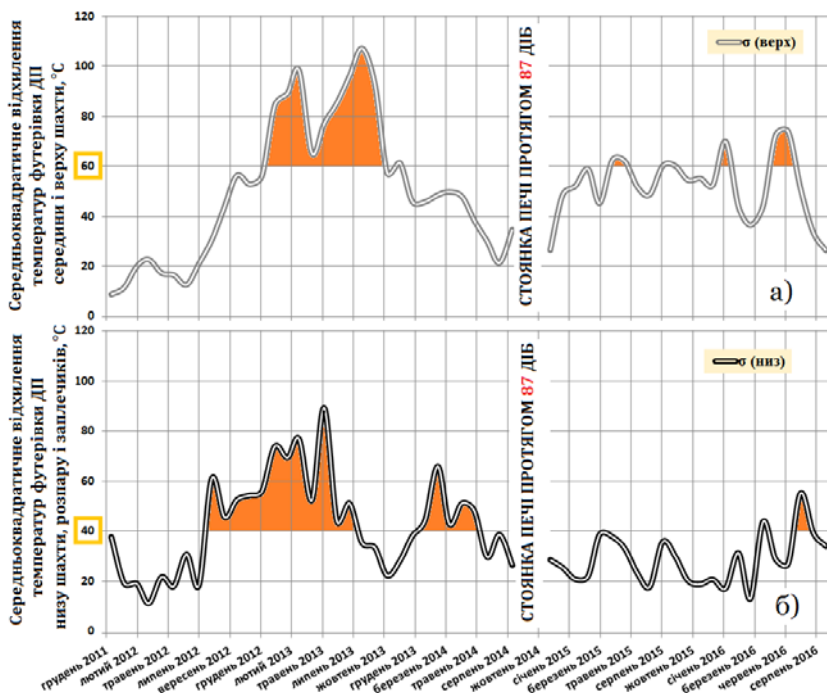


Рис. 5.6. Зміна середньомісячних значень середньоквадратичних відхилень температур футерівки ДП середини і вершу шахти (а), низу шахти, розпару і заплечиків (б) за 5 років роботи печі

Таким чином, результати, отримані при виконанні аналізу зміни середньоквадратичних відхилень температур футерівки по окружності печі протягом п'ятирічного періоду її експлуатації, дозволяють зробити висновок про те, що контроль зміни (σ) температур футерівки доменної печі по окружності дозволяє судити про порушення ходу печі, що може бути використано для комплексної діагностики ходу печі [60].

5.2. Дослідження особливостей розподілу температур периферійного газового потоку в доменній печі при роботі в різних газодинамічних і паливних умовах

Робота з ПВП в сучасних умовах вимагає ретельного підходу при управлінні процесом доменної плавки, що при обґрунтованому використанні інформації, одержуваної сучасними засобами контролю (при наявності таких) дозволяє технологічному персоналу приймати ефективні рішення, як по зміні параметрів завантаження, так і щодо коригування дуттєвого режиму.

Як було сказано вище, перше після пуску ДП в 2011 р. шоткретування шахти виконувалося в червні 2014 р. на момент початку 2016 р. термін служби футерівки становив вже 1,5 роки, і після видувки печі на чергове шоткретування у вересні 2016 р., візуальний огляд показав практично повну відсутність захисної футерівки по всій висоті шахти, а також наявність поясу гарнісажу на рівні заплечиків. Отже, в таких умовах було констатовано, що термопари з січня по вересень 2016 р. реєстрували температуру газового потоку в периферійній зоні по висоті печі і щодо її зміни можна судити як про вплив дуттєвих параметрів на розподіл газового потоку в печі, так і про процеси гарнісажеутворення, що становить певний інтерес для досліджень в змінних умовах роботи, а також з початком освоєння вдування ПВП.

Робота ДП в досліджуваному періоді 2016 р. протягом 8,5 місяців, характеризувалася чотирма основними газодуттєвими режимами:

1. Режим роботи на «безгазовій шихті» при зволоженому дутті – період 1.
2. Режим роботи з ПГ – період 2.

3. Режим роботи з ПГ і з ПВП – період 3.

4. Режим роботи з ПВП – період 4.

Техніко-економічні та технологічні показники плавки для чотирьох досліджуваних періодів роботи ДП з БЗП приведені у розділі 4.1.

На рис. 5.7а представлено розподіл температури газового потоку в периферійній зоні по висоті ДП для чотирьох періодів, що досліджуються, на рис. 5.5б – розподіл температури для четвертого періоду умовно розділеного на три режими із вдуванням різної кількості ПВП.

Як видно з рис. 5.7 характер розподілу температури газового потоку в периферійній зоні по висоті ДП в значній мірі визначається газо-дутьєвим режимом і кількістю використаного ПВП. Так, при аналізі температури газового потоку низу шахти, розпару і заплечиків максимальне значення температури (екстремум кривої) в першому періоді роботи відзначено на рівні 12 м від технологічного нуля (ТН) – верху захисних плит колошника, або 13 м від осі повітряних фурм (п/ф), у другому періоді – на рівні 15 м від ТН (10 м від осі п/ф), в третьому – на рівні 18 м від ТН (7 м від осі п/ф), в четвертому періоді явно вираженого екстремуму в нижній частині печі не спостерігалось, температура газового потоку монотонно збільшувалася від заплечиків до рівня 6 м від ТН.

Екстремуми кривих температур нижньої зони печі для перших трьох періодів роботи ДП можуть характеризувати як положення кореню зони в'язко-пластичного стану (пластичної зони), так і границю утворення в печі стійкого гарнісажу. На користь судження про положення кореня зони в'язко-пластичного стану в точці екстремуму кривої температур свідчать результати досліджень на ДП робочим об'ємом 3594 м³ заводу фірми Тіссен у місті Швельгерн (Німеччина) [56, 57].

Визначення положення і профілю пластичної зони авторами публікації [56] ґрунтувалися на розподілі тисків, температур футерівки і складу газу біля стінки по висоті печі. На цій ДП визначалися температури футерівки шахти на 16 рівнях вище осі повітряних фурм і на 13 рівнях визначалися перепади статичного тиску. Згідно з дослідженнями [56] при незадовільному ході печі висота пластичної зони, її верхня межа, перебувала на відстані 14 м вище рівня фурм, при

середньому ході – на відстані 9 м, при хорошому ході – на відстані 8 м.

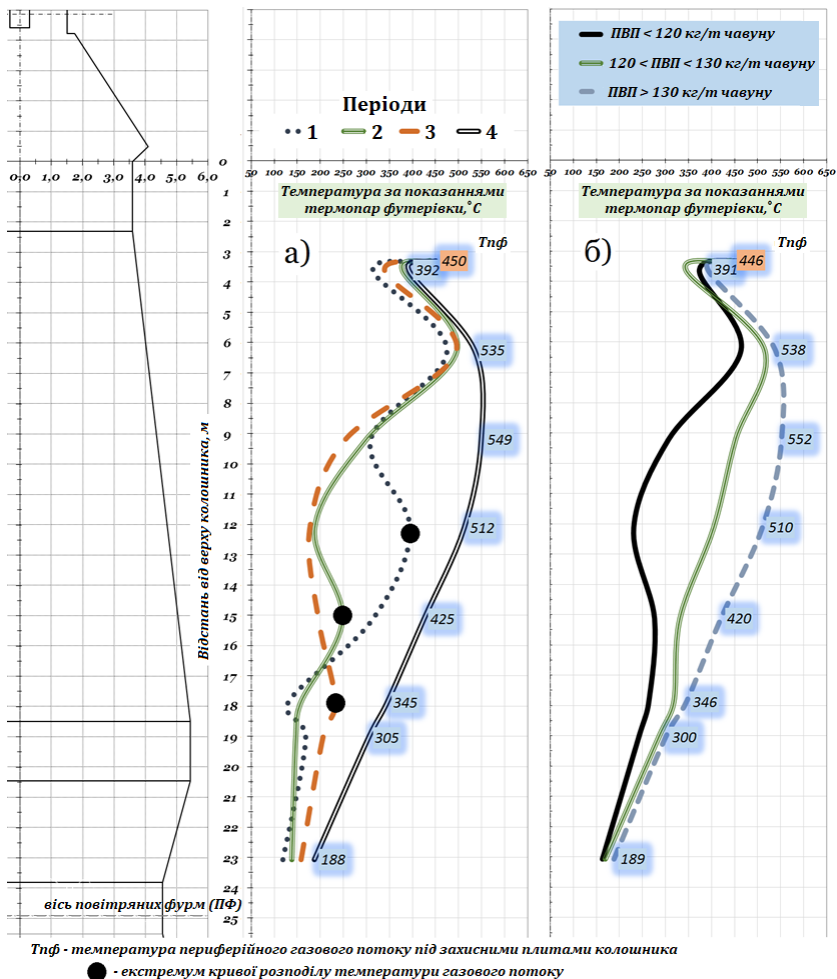


Рис. 5.7. Розподіл температури газового потоку в периферійній зоні по висоті ДП при різних газо-дуттєвих і паливних умовах

Також авторами статті [56] показані графіки зміни температури футерівки шахти по висоті печі для періодів з «незадовільним» і «хорошим» ходом, які в значній мірі узгоджуються з результатами, наведеними в цьому розділі

(рис. 5.7а). Перші три досліджувані періоди роботи ДП також умовно можна охарактеризувати по добовій продуктивності і витраті коксу як періоди з «незадовільним», «задовільним» і «хорошим» ходом. Крім цього, слід також відзначити, що в першому досліджуваному періоді роботи ДП використовувався максимальний, в порівнянні з іншими періодами, вміст окатишів в суміші з агломератом (54,8%), які, як відомо, володіють легкоплавкими властивостями і їх вміст в шихті близький до 50% сприяє утворенню більш розтягнутої по висоті зони в'язко-пластичного стану. А враховуючи, що перший період характеризується максимальною відстанню від рівня повітряних фурм до точки екстремуму кривої температур по висоті нижньої частини шахти, то це може також свідчити про стан верхньої границі зони в'язко-пластичного стану в точці екстремуму [123].

Ще одним підтвердженням гіпотези про положення кореня верхньої границі зони в'язко-пластичного стану в точці екстремуму свідчать графіки зміни середньодобових температур периферійного газового потоку протягом другого досліджуваного періоду (рис. 5.8). З рисунка видно, що найбільш нестабільною є зона на рівні 15 м від технологічного нуля. Це свідчить про те, що корінь зони в'язко-пластичного стану в динаміці (добової) наближався і віддалявся від точки контролю температури, наближення кореня призводило до збільшення температур, віддалення кореня – до їх зменшення. Характер зміни температур в першій третині періоду свідчить про переміщення зони в'язко-пластичного стану після зміни технології плавки на «безгазовій шихті» на технологію з природним газом. При цьому, поясненням максимальної амплітуди зміни температур на рівні середини шахти стали характерна для досліджуваної ДП збільшена відстань від осі повітряних фурм до перегину профілю печі (горн-розпар) і збільшений, у порівнянні з традиційним, «висов» (*tuere insert*) повітряних фурм у робочий простір печі. Слід також зазначити, що нестабільна зона температур могла характеризувати і нестабільність утворення гарнісажу в цій зоні, проте його сповзання сприяло б порушенню газодинамічних умов плавки, чого не було зазначено, причому після видувки печі на шоткретування шахти був виконаний візуальний огляд печі, який показав наявність поясу гарнісажу нижче даної зони – на рівні заплечиків.

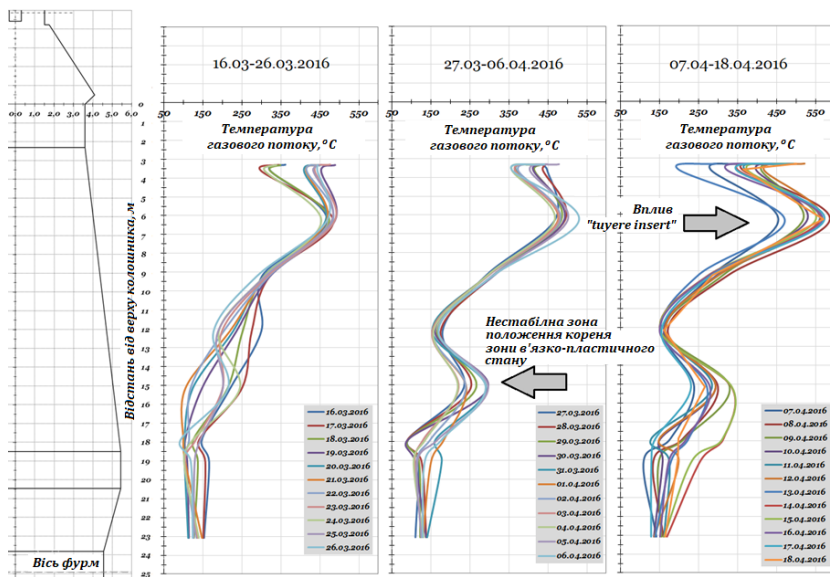


Рис. 5.8. Зміна середньодобових температур периферійного газового потоку по висоті ДП у другому досліджуваному періоді

Встановлені особливості зміни температури периферійного газового потоку по висоті печі у подальшому можуть бути використані при розробці методу визначення форми і положення зони в'язко-пластичного стану, заснованого на інформації термозондів і термопар футерівки ДП.

Аналіз особливостей зміни температури периферійного газового потоку по висоті досліджуваної печі при збільшенні кількості ПВП що подається в горт показав, що зі збільшенням кількості ПВП збільшуються температури газового потоку по всій висоті печі з максимальною амплітудою на рівні середини шахти (рис. 5.76). Збільшення температур пояснюється інтенсифікацією периферійного газового потоку при збільшенні кількості ПВП.

Тому наступним етапом досліджень став аналіз кореляційних зв'язків температур термопар футерівки (газового потоку для умов першої половини 2016 р.) ДП з технологічними параметрами і показниками плавки протягом

200 діб роботи печі, що включають досліджувані, різні газодуттові режими роботи ДП. Кореляційні зв'язки визначалися за середньодобовими даними без згортки параметрів за діапазонами.

Аналіз показав, що коефіцієнти кореляції між кількістю ПВП із середніми температурами футерівки мають досить велику величину: низ шахти ($r_{x,y}=0,78$), розпар ($r_{x,y}=0,67$) і заплечики ($r_{x,y}=0,80$) (рис. 5.9). На рівні середини шахти (відм. 28.739), де температури газового потоку були максимальними їх зв'язок із кількістю ПВП характеризувався коефіцієнтом кореляції ($r_{x,y}=0,62$). Таким чином, отримані зв'язки свідчать про найбільший вплив кількості ПВП на температуру периферійного газового потоку на рівнях заплечиків, розпару і низу шахти.

Крім встановлених зв'язків температур периферійного газового потоку з кількістю ПВП слід виділити також отримані в результаті виконаного кореляційного аналізу інші зв'язки. А саме: зворотний зв'язок температури термопар футерівки заплечиків (відм. 14.930) з витратою скіпового коксу ($r_{x,y}=-0,76$), зв'язок температури футерівки заплечиків (відм. 14.930) з середньодобовим виробництвом печі ($r_{x,y}=0,66$), зворотний зв'язок температури футерівки низу шахти (відм. 20.120) з витратою скіпового коксу ($r_{x,y}=-0,67$), зв'язок середньоквадратичного відхилення (СКО) температур футерівки середини шахти (відм. 25.878) і (відм. 28.739) з витратою скіпового коксу ($r_{x,y}=0,57$) і ($r_{x,y}=0,78$), відповідно, зворотний зв'язок СКО температури футерівки середини шахти (відм. 28.739) з середньодобовим виробництвом печі ($r_{x,y}=-0,62$), зворотний зв'язок температури футерівки середини шахти (відм. 25.878) з кількістю природного газу в дутті ($r_{x,y}=-0,55$), зворотні зв'язки середньої температури футерівки низу (заплечики, распар і низ шахти) ($r_{x,y}=-0,55$) і верху (середини і верху шахти) печі ($r_{x,y}=-0,52$) з вмістом в залізорудній частині шихти агломерату місцевого виробництва, при цьому з найбільшим коефіцієнтом кореляції вміст в ЗРЧ агломерату місцевого виробництва пов'язаний з температурою футерівки середини шахти (відм. 28.739) ($r_{x,y}=-0,59$).

Таким чином, отримані зв'язки свідчать про вплив якості коксу і залізорудної сировини на температуру футерівки, а також про вплив розподілу газового потоку по окружності печі на кількість витраченого коксу і рівень

виробництва [123]. Поясненням зворотних зв'язків температур футерівки заплечиків і низу шахти з витратою коксу є наявність прямих зв'язків цих температур з кількістю ПВП, при вдуванні якого кількість витраченого коксу на печі зменшувалася.

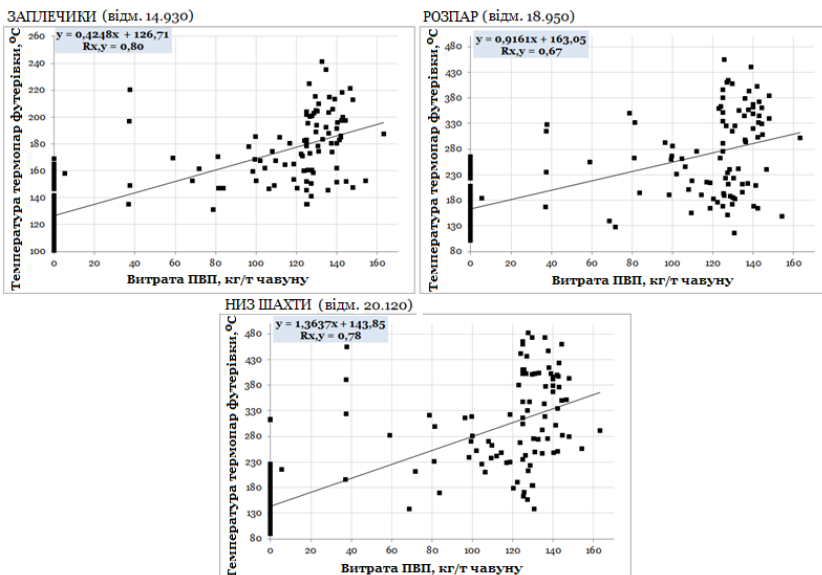


Рис. 5.9. Зв'язки температур футерівки низу шахти, розпару і заплечиків і кількості ПВП, що вдувається в горн ДП

5.3. Розробка системи моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності доменної печі

Автоматизація доменного виробництва — одне з ключових напрямків його подальшого розвитку. В останні роки вдосконалюється оснащення ДП засобами автоматизованого контролю. На сучасних печах контролюються і автоматично регулюються багато параметрів технологічного режиму доменної плавки та роботи обладнання. Однак, при оснащенні ДП засобами контролю процесів плавки і створенні в АСУ систем візуалізації, як правило, не враховуються технологічні аспекти, що дозволяють користувачам цих систем — операторам-

технологам, максимально ефективно і швидко використовувати отриману інформацію для управління технологічними режимами. Так, в більшості випадків, інформація, що надходить від термопар і інших датчиків відображається в системах візуального контролю у вигляді графіків поточних їх показань у часі. Це не дозволяє детально оцінити динаміку зміни контрольованого параметра, як при макроаналізі його зміни, так і при оцінці стану окремих секторів або ділянок по висоті ДП, як у випадку, наприклад, використання інформації термопар, встановлених в футерівці ДП. Отже, для ефективного використання систем контролю, інформація, що надходить від них повинна носити максимально повний характер. Так, дані повинні попередньо оброблятися для усунення недостовірної інформації, що надходить від непрацюючих датчиків (термопар), і виключення при аналізі заданих користувачем таких технологічних ситуацій, як простої печі, тихий хід і ін. Також інформація повинна видаватися, в середньому, за будь-який заданий період часу і для будь-якого, як при використанні інформації термопар, заданого оператором поєднання декількох датчиків по висоті або по окружності ДП [124].

В даному розділі викладено досвід створення системи моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності на досліджуваній ДП з БЗП Єнакієвського металургійного заводу, яка, як уже зазначалося раніше, оснащена великою кількістю термопар по висоті і окружності печі [60, 117, 124].

Створення системи моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності печі було обумовлено необхідністю ефективного використання інформації, що надходить від термопар футерівки для управління плавкою, з огляду на її початкову візуалізацію – у вигляді ліній тренда в режимі реального часу. Під моніторингом теплового стану шахти при створенні системи малися на увазі:

- оцінка залишкової товщини футерівки по зміні середньомісячних значень температур;
- визначення сформованого в нижній зоні печі гарнісажу;
- контроль розподілу периферійного газового потоку по висоті і окружності ДП для оцінки ефективності режимів завантаження і вибору геометричних параметрів повітряних фурм, а також розташування закритих фурм.

Попередньо на даній ДП були виконані дослідження впливу технологічних факторів на зміну температур футерівки шахти протягом п'яти років експлуатації печі, в якому двічі був виконаний ремонт з шоткретування шахти ДП [60]. Були визначені граничні значення температур, які свідчать про частковий або повний знос футерівки шахти, а також граничні значення температур нижньої зони печі, які характеризують наявність стійкого гарнісажу (див. розділ 5.1). Крім цього були виконані дослідження розподілу температур периферійного газового потоку по висоті ДП при практично повній відсутності футерівки – через два роки після шоткретування шахти печі і при використанні в технології доменної плавки різних дуттєвих режимів роботи: на «безгазовій шихті» зі зволеним дуттям, з природним газом і з вдуванням пиловугільного палива. Встановлені в результаті виконаних досліджень особливості розподілу температур газового потоку дозволили ідентифікувати положення кореня зони в'язко-пластичного стану (див. розділ 5.2) [123]. Таким чином, результати, отримані в ході виконання попередніх досліджень дозволили розробити алгоритми системи моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності ДП [124].

Призначення розробленої системи полягає в підтримці прийняття рішень з управління доменною плавкою на підставі контролю розподілу температур футерівки шахти, розпару, заплечиків і верхнього горна. А саме, здійснювати обґрунтований вибір діаметра повітряних фурм, вибір кількості і місць розташування закритих фурм, коригування режиму окружного розподілу шихтових матеріалів, а також контролювати положення кореня зони в'язко-пластичного стану. З огляду на те, що при використанні технології вдування ПВП футерівка печі піддається інтенсивному зносу [8, 106], особливо актуальним стає оперативний контроль стану футерівки і своєчасне прийняття необхідних заходів по коригуванню режиму завантаження або зміни параметрів дуттєвого режиму. У разі, якщо установка із вдування ПВП дозволяє регулювати кількість палива по окремих фурмах⁷, використання інформації системи дозволяє здійснювати

⁷ На даний час така можливість існує тільки в доменному цеху Дніпровського металургійного комбінату, де авторами книги у 2018 р. реалізований рівномірний розподіл теоретичної температури горіння по окружності доменної печі створенням спрямованої нерівномірності розподілу ПВП.

спрямоване його регулювання з урахуванням зміни температур футерівки по окружності печі.

Візуалізація системи полягає в наступному. Данні термопар шахти печі за дев'ятьма рівнями від фурменого поясу до верхнього горизонту шахти наводяться до секторів, відповідних положенням лотка БЗП по окружності: 30°–90°, 90°–150°, 150°–210°, 210°–270°, 270°–330°, 330°–0°–30°. Величина сектора становить 60° для можливості подальшого спрямованого регулювання розподілом шихти і при необхідності може змінюватися, прив'язка секторів до обладнання ДП (повітряних фурм, розташування чавунних льоток, похилого мосту і підведення дуття) показана на рис. 5.10. Представлення інформації температур футерівки секторів може здійснюватися за середньогодинними, середньодобовими і середньомісячними даними на розгортці печі і в динаміці (рис. 5.10). Передбачена можливість вибору одного рівня або декількох усереднених рівнів термопар (на відеокадрі позначено «☑»). У кожному секторі відображається середня температура з палітрою заливки від синього (найнижча температура) до червоного (найвища температура). Крім цього, передбачена візуалізація температур по висоті ДП (див. рис. 5.10, права частина; вибір сектора або секторів позначені «☑») в середньому по печі, або по кожному сектору або за кількома усередненими секторам печі.

5.3.1. Приклад реалізації прийому управління розподілом газового потоку по окружності печі з використанням інформації системи моніторингу

Розглянуто приклад використання інформації системи для регулювання розподілу температур футерівки по окружності ДП. На рис. 5.11 представлені фрагменти відеокадрів системи для двох періодів роботи ДП: до (19–30.08.2016) і після (31.08–12.09.2016) зміни розташування закритих повітряних фурм, причинами чого з'явилися високі температури футерівки в секторі 330°–0°–30° по всій висоті ДП.

Для оцінки впливу розташування закритих фурм на температуру футерівки був запропонований коефіцієнт кількості відкритих фурм в секторі. Значення коефіцієнта рівне 1,0 од. відповідає відкриттю всіх фурм в секторі, 0,0 од. – закриттю всіх фурм.

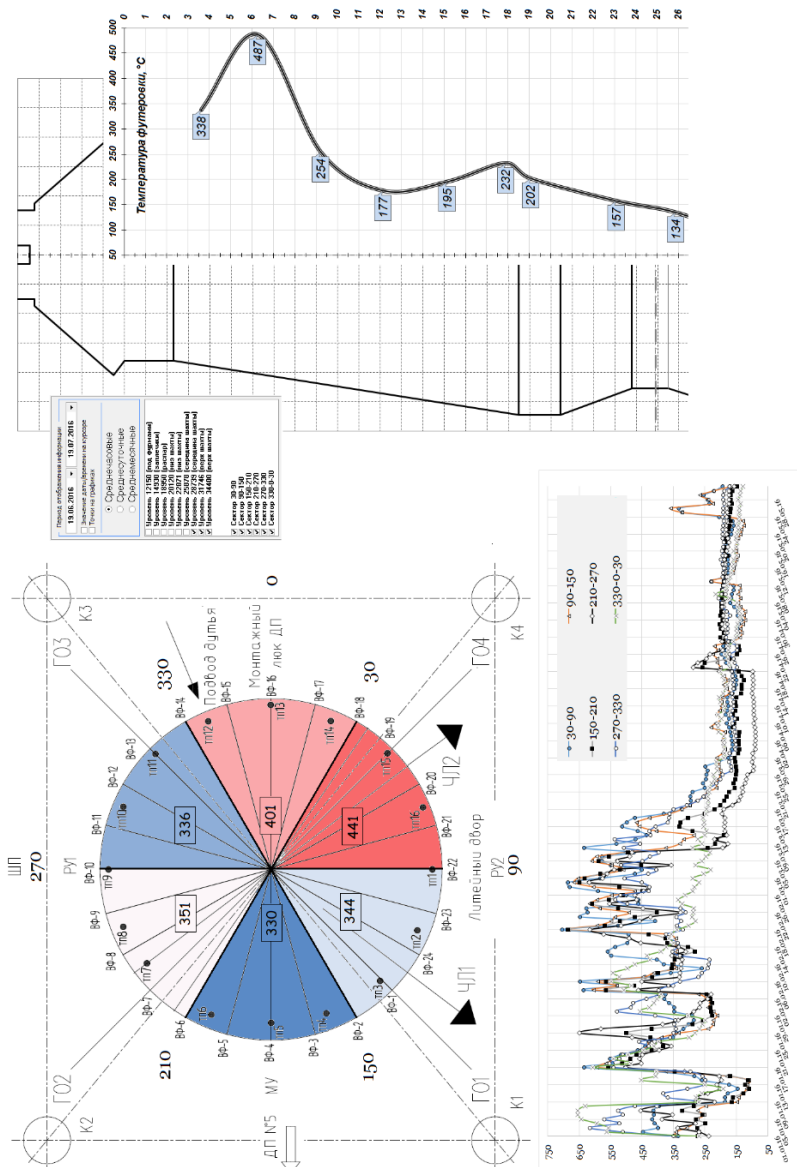


Рис. 5.10. Відеокادر системи моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності доменної печі

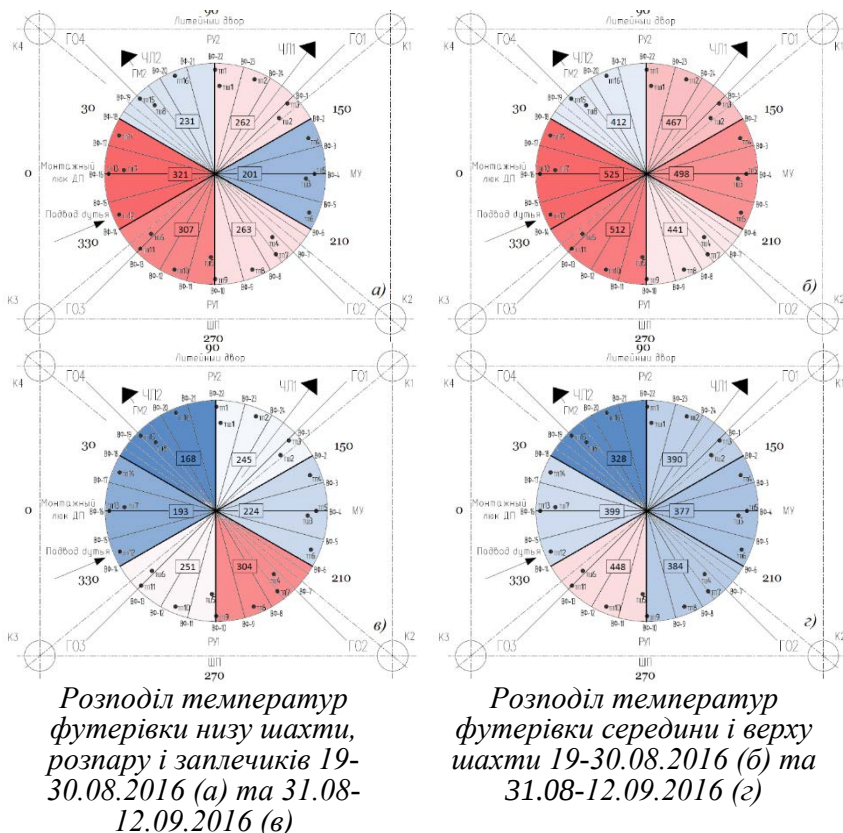


Рис. 5.11. Фрагменти відеокадру системи моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності ДП до (а, б) і після (в, г) зміни розташування закритих повітряних фурм

У розглянутих періодах роботи ДП в секторі 30° – 90° коефіцієнт кількості відкритих фурм був зменшений від 0,67 до 0,52 од., а в секторі 330° – 0° – 30° – збільшений від 0,70 до 0,80 од., в інших секторах коефіцієнт залишився незмінним: в секторі 90° – 150° – 0,62 од., в секторі 150° – 210° – 0,60 од., в секторах 210° – 270° і 270° – 330° – 0,80 од.

В результаті зміни розташування закритих фурм зменшилася як окружна нерівномірність температур футерівки, так і середні значення температур. Так, в розглянутих періодах середня температура футерівки низу

шахти, розпару і заплечиків зменшилася на 33 °С – від 264 до 231 °С, а температура футерівки середини і верху шахти зменшилася на 88 °С – від 476 до 388 °С. Це обумовлено перерозподілом інтенсивності газового потоку від периферії до центру ДП. Крім цього, перерозподіл газового потоку в другому періоді сприяв зменшенню питомої витрати коксу на 1,7% при практично незмінних витратах ПВП і коксового горіха, температури дуття, а також якісних і кількісних характеристик залізорудної сировини і коксу [124].

5.4. Аналіз термограм футерівки ДП з БЗП в різних умовах роботи

На розподіл температур по висоті печі, починаючи від повітряних фурм до захисних колошникових плит, і окружності печі основний вплив має розподіл газового потоку по перерізах печі по висоті. При цьому на розподіл температур впливає не тільки температура горнових і шахтних газів, а й їх кількість, склад і теплоємність. Створювана на колошнику спрямована радіальна і окружна нерівномірність розподілу залізорудної частини шихти і коксу дозволяє в значній мірі управляти також і розподілом газового потоку по перерізах печі, що зумовлює форму в'язкопластичної зони (зони плавлення і початку перетворення матеріалів залізорудної частини (ЗРЧ) у напіврідкий стан) [117].

Ряд заходів і способів завантаження дозволяє оперативно реагувати на розподіл газового потоку по окружності ДП, а також створювати раціональну для даних умов радіальну нерівномірність [10]. Положення зони в'язкопластичного стану по висоті печі визначається, здебільшого, тепло-енергетичними параметрами дуття (температурою, вмістом кисню, складом і кількістю паливних добавок до дуття) і газодинамічними параметрами (кількістю дуття і нерівномірністю його розподілу за окремими повітряними фурмами, швидкістю витікання дуття, складом горнових газів, відносним розташуванням і геометричними характеристиками окислювальних зон). Ці параметри тісно взаємопов'язані між собою (через теоретичну температуру горіння і величину кінетичної енергії дуття на виході з фурм), але також на них значний вплив мають якість шихтових

матеріалів, особливо коксу, склад і розподіл по радіусу печі ЗРЧ шихти [117].

Наявність і збільшення частки в ЗРЧ шихти гематитових руд і кислих окатишів при початку їх відновлення в верхніх горизонтах шахти (сухій зоні печі) зі збільшенням їх об'єму значно спотворюється сформована на колошнику пошарова структура стовпа шихти зменшуючи газопроникність цієї зони. Висока хімічна агресивність первинних шлаків з цих легкоплавких матеріалів витребує необхідність розподілу їх в проміжну зону по радіусу печі, внаслідок цього, відбувається погіршення газопроникності в цій зоні, і створюються передумови значного переміщення пічних відновлювальних газів у вузьке затиснуте кільце периферійної зони. Це негативно впливає на стійкість шахти і роботу печей, особливо при низьких величинах кутів нахилу шахти ($83^{\circ}42'44''$ для ДП №3). Погіршення якості шихтових матеріалів ЗРЧ також значно погіршує газопроникність проміжної зони в верхніх горизонтах шахти і сприяє посиленню периферійного потоку газів, збільшення кількості дрібнодисперсного дріб'язку з високим вмістом закису заліза знижує високотемпературні характеристики коксу та значно погіршує газодинамічні характеристики фурменної зони провокуючи периферійний хід печі.

Використовувати інформацію про розподіл поля температур (у вигляді термограм) за показаннями стаціонарних термопар у футерівці для контролю ходу доменної печі було запропоновано у роботі [58, 59, 125, 126]. На рис. 5.12–5.14 наведені ізотерми розгортки ДП №3 за показаннями термопар, встановлених в шахті, розпарі, заплечиках та в області повітряних фурм. Довжина розгортки взята за максимальним діаметром печі в розпарі – 10670 мм, точка нуль на осі абсцис – вісь ливарного двору (між льотками), по осі ординат відлік починається від висоти 8103 мм до висоти 34400 мм. Відмітки елементів печі по висоті: заплечики 14200–17200, розпару 17200–19500, шахти 19500–35400 мм (низ плит колошникового захисту). Пояси термопар закладених на однакову глибину щодо внутрішньої поверхні футерівки доменної печі – 260 мм.

У першому аналізованому періоді (01.01–01.06.2012) піч працювала в пріоритетних шихтових умовах після задувки у середині жовтня 2011 р. Як видно з рис. 5.12, найбільш

розігріта сторона доменної печі (температура футерівки) розташована в області чавунних льоток та між ними. Такий розподіл температур по окружності характерний для всіх доменних печей малого і середнього об'ємів, льотки яких розташовані по одну сторону печі. У цих секторах спостерігається найбільша інтенсивність сходу матеріалів, особливо на випуску продуктів плавки. Зона максимальних температур по висоті печі знаходиться на рівні 22870 мм з тенденцією до зміщення в нижню частину. Загальний рівень температур відповідає стану печі після роздувочного періоду.

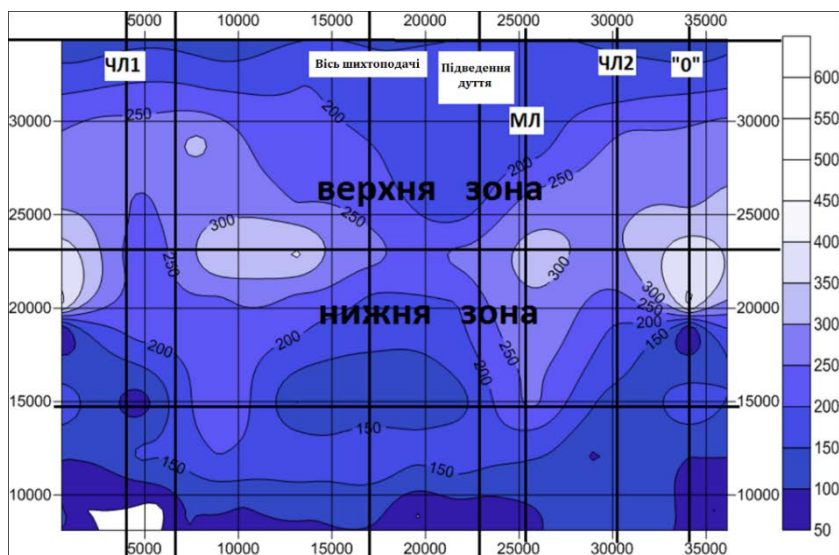


Рис. 5.12. Термограма показань термопар ДП в січні – червні 2012 р. після роздувочного періоду при використанні шихтових матеріалів задовільної якості

У другому півріччі 2012 р. горизонт підвищених температур футерівки мав більш виражений характер і відповідав відмітці 22870 мм і нижче (рис. 5.13). Зона високих температур з боку чавунних льоток була розтягнута по висоті печі в районі відміток 22870–25878 мм. Такий розподіл температур по висоті печі характерний для підвищеної інтенсивності плавки і гарного стану робочої поверхні шахти.

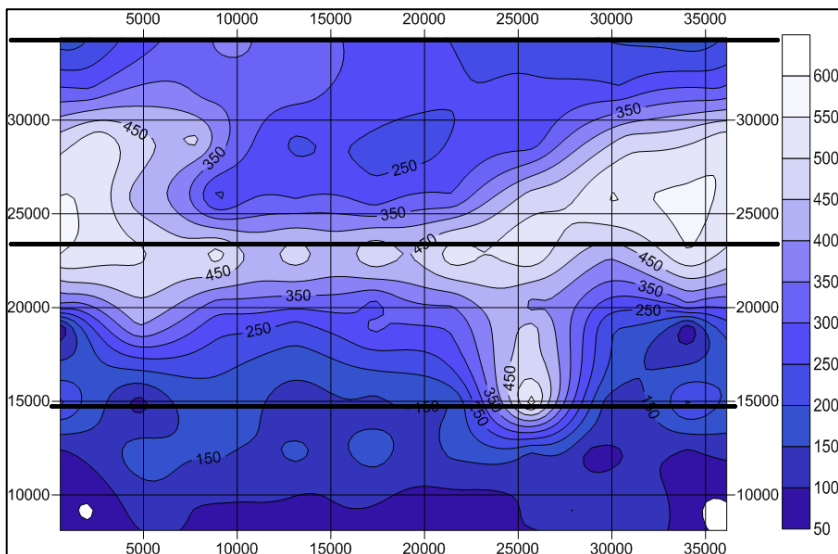


Рис. 5.13. Термограма показань термопар ДП при середній інтенсивності плавки на комбінованому дутті і задовільній якості шихтових матеріалів за період липень – грудень 2012 р.

При роботі доменної печі на комбінованому дутті і задовільній якості шихтових матеріалів, що дозволяють витримувати нормальну інтенсивність плавки, корінь в'язко-пластичної зони повинен бути максимально зміщений в зону розпару. При раціональному розподілі матеріалів по радіусу печі такий розподіл температур відповідає центральному газорозподілу і перевернутій "V-подібній" зоні в'язко-пластичного стану, що забезпечує максимальну газопроникність матеріалів по висоті печі і інтенсивність плавки. Для цієї ДП – зона повинна відповідати відміткам 18950–20120 мм. Зміна шихтових умов (погіршення якості коксу, збільшення частки окатишів в ЗРЧ з відповідним збільшенням основності агломерату місцевого виробництва), змінність газо-енергетичних параметрів дуття і виявлений в наступному збій в АСУ робочих кутів нахилу лотка під час вивантаження матеріалів, а також зміна конструкції розподільного лотка без коригування кутів його нахилу не дозволили в достатній мірі організувати найбільш ефективну роботу доменних печей [60].

Подальше погіршення шихтових умов і зниження теплоенергетичних параметрів дуття (близьким до роботи на атмосферному дутті) в значній мірі визначили зміни температурного розподілу по висоті печі. Зона високих температур змістилася до позначки 28878 мм, за рахунок зменшення вмісту кисню в дутті і відповідного збільшення впливу фізичного нагріву дуття. Це призвело до збільшення протяжності зони високих температур по висоті печі і зміщення її в верхню частину шахти. По окружності печі зона максимальних температур відповідала району чавунних льоток зі зміщенням її до сторони монтажного люка. Це зміщення спостерігалось в період всієї експлуатації ДП. Збільшення температур в цій зоні по всій висоті доменної печі пояснюється декількома факторами. По-перше, в цій зоні був розташований термозонд для виміру температур над поверхнею засипу шихти конструкції, встановленої до червня 2014 р., термозонди створювали значну нерівномірність розподілу матеріалів на колошнику за рахунок розсічення потоку шихти при завантаженні в піч [52, 83]. По-друге, в процесі розгляду можливих чинників створення окружної нерівномірності розподілу шихти, виявленої при проведенні передпускових досліджень, був оброблений великий обсяг інформації про роботу БЗП, який показав неможливість позиціонування лотка при початку розвантаження матеріалів близьким до нульового положення лотка по окружності печі (монтажного люка).

Зміни програми завантаження і їх подальші коригування відповідно до змін шихтових умов роботи ДП [53, 92–94, 104, 105], коригування кутів нахилу лотка БЗП після внесення змін до його конструкції, зміщення на 30° кутів початку вивантаження матеріалів по окружності печі, обґрунтований вибір діаметра, розташування і кількості закритих фурм дозволили зменшити нерівномірність температур футерівки по окружності печі в різних секторах (рис. 5.12 та 5.14).

При цьому робота ДП супроводжувалася малою газодинамічною стійкістю через поступальне погіршення якості шихтових матеріалів і збільшення частки окатишів в ЗРЧ, зменшення частки кисню в дутті і витрат природного газу з кон'юнктурних причин. Компенсація зменшення теоретичної температури горіння при зменшенні частки кисню в дутті і ПГ

збільшенням температури гарячого дуття збільшило частку складової фізичного тепла дуття і горнових газів. Ці фактори призвели до збільшення динамічної в'язкості горнових газів і опору при їхньому проходженні через коксову насадку і, як наслідок, до зменшення їх кількості в печі, в цілому, а також збільшення частки периферійного потоку. Збільшення частки азоту в фурмених газах при плавлі на дутті, близькому до атмосферного, призвело до розтягування по висоті печі зони високих температур і зміщення її в більш високі горизонти шахти [117].

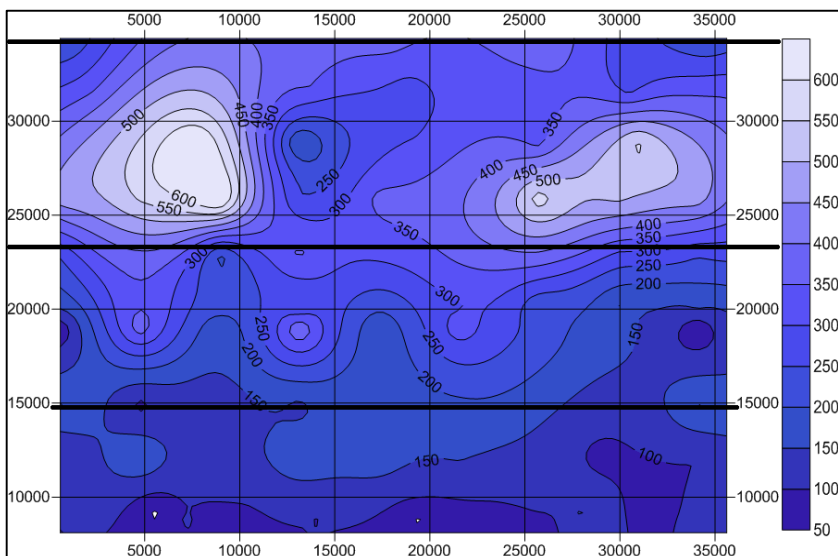


Рис. 5.14. Термограма показань термопар ДП при середній інтенсивності плавки на комбінованому дутті і задовільному якості шихтових матеріалів за період січень–жовтень 2013 р.

В наступні періоди роботи ДП (рис. 5.14) і перед зупинкою її на шоткретування у червні 2014 р. (рис. 5.15) відзначено послідовне зменшення нерівномірності розподілу температур по окружності і висоті печі, а також зменшення температури футерівки з боку підведення дуття до кільцевого повітря-проводу – чавунна льотка №2, що говорить про правильність та ефективність запропонованих і реалізованих заходів, спрямованих на зменшення окружної нерівномірності. Збільшення температури футерівки з боку шихтоподачі на

відм. 25878 мм в березні 2014 р. з подальшим зменшенням її до 400–450 °С в травні – вказує на схід надмірного гарнісажу в цій зоні при зміні газорозподілу по окружності печі.

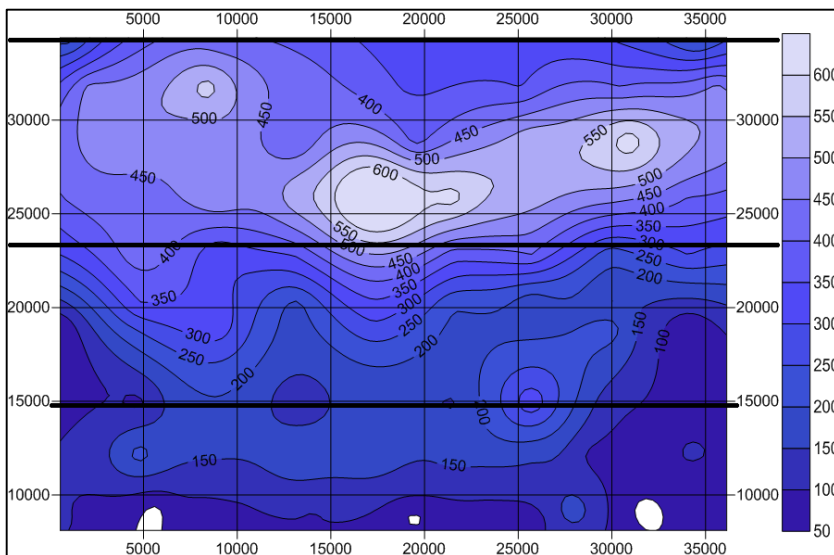


Рис. 5.15. Термограма показань термопар ДП при зменшенні інтенсивності плавки на комбінованому дутті і малому збагаченні дуття за період січень – червень 2014 р.

5.5. Дослідження зміни температур периферійної зони доменних печей при освоєнні технології вдування ПВП

До початку освоєння технології вдування ПВП з моменту останнього шоткретування шахти на ДП №5 пройшло 27 місяців, на ДП №3 – 22 місяці. Візуальний огляд стану шахт доменних печей після видувки на шоткретування показав практично повну відсутність футерівки, що для умов ДП №3 дозволило зробити висновок про те, що термопари шахти реєстрували в період освоєння ПВП температуру периферійного газового потоку (див. розділ 5.2).

5.5.1. Аналіз зміни температур тіла холодильників ДП №5 при різних газо-дутьєвих і паливних режимах в період освоєння технології вдування ПВП

Під час проведення розширеного ремонту ДП №5, перед впровадженням технології вдування ПВП, були відновлені і підключені до бази даних АСУ ТП термопари, що вимірюють температуру тіла холодильних плит. Закладені ще при капітальному будівництві печі у 2007 р. термопари розподілені рівномірно по окружності печі: по 6 термопар на 5-ти відмітках по висоті печі в заплечиках і зоні низ – середина шахти (рис. 5.16). Спай цих термопар розташований в спеціальних нішах холодильних плит з боку кожуха печі.

Слід зазначити, що температури холодильних плит залежать, в першу чергу, від можливості відведення теплового навантаження системою охолодження при впливі теплового навантаження на холодильні плити з боку печі в процесі плавки, що залежить, в свою чергу, від стану футерівки і гарнісажу, температури середовища на периферії в різних паливних і сировинних умовах. Система охолодження ДП №5, як і ДП №3, передбачає охолодження хім. очищеною водою в замкнутих контурах (по 4 контури на кожний холодильник) з можливістю переходу на випарне охолодження з природною циркуляцією, і при значному збільшенні локального теплового навантаження, збільшення температури води системи охолодження ДП не може перевищити температуру кипіння 130–140 °С, а збільшення температури тіла холодильника вище цієї температури пов'язано з обмеженням теплопровідності чавунного тіла холодильника.

На початковому етапі дослідження розподілу температур холодильних плит по висоті ДП №5 на початку освоєння технології вдування ПВП, були обрані три періоди з різними умовами:

1. робота з застосуванням ПГ і ПВП на початковому етапі його освоєння з витратами ПГ=22 м³/т, ПВП=130 кг/т чавуну і вмістом О₂ в дутті ~ 23,1%;
2. дискретна робота в умовах низької продуктивності <60% від номінальної, при середніх витратах ПГ=15 м³/т, ПВП=50 кг/т і О₂=21,7%;

3. без ПГ з витратою ПВП=112 кг/т чавуну, при середній інтенсивності плавки і збагаченні дуття киснем до вмісту $O_2=22,8\%$.

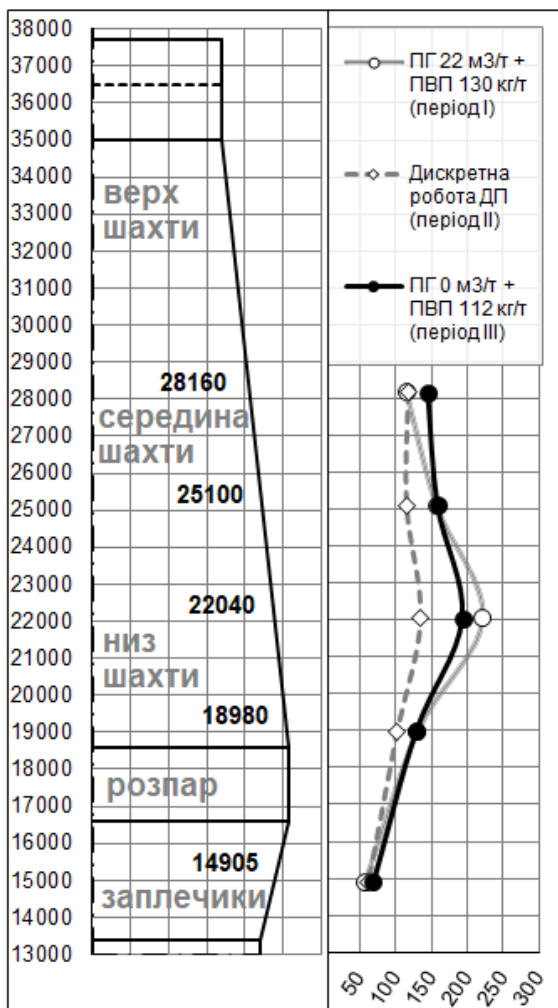


Рис. 5.16. Розподіл температур холодильних плит ДП №5 в характерних періодах роботи

Як видно з рис. 5.16, найнижча і рівномірно розподілена по висоті шахти температура холодильних плит спостерігалася при низькому рівні виробництва чавуну (період II). Найбільш значне збільшення температур – до 225 °С на третьому горизонті установки термопар – при роботі з відносно високою витратою ПВП і з невеликою кількістю ПГ (період I). При роботі ДП з відносно невисокою витратою ПВП (період III) – температури в найбільш теплонавантажених точках, в середньому, не перевищували 200 °С, при цьому спостерігалася деяке збільшення температур на 5-му горизонті середини шахти (відм. 28 160).

Як випливає з рис. 5.16 найбільший вплив на температури тіла холодильних плит надали показники інтенсивності плавки і відповідне збільшення паливно-дутьових добавок. Ці дані кореспондуються з розподілом температур футерівки ДП №3 при роботі з різною кількістю паливних добавок (див. розділи 5.2 і 5.5.2). Зі збільшенням інтенсивності плавки і при збільшенні витрат паливних добавок, що заміщають кокс, екстремум температур футерівки, відповідний кореню зони в'язкопластичного стану, зміщується в нижні горизонти і набуває більш яскраво виражений характер. Поява більш яскраво вираженого кореня в'язкопластичного стану в периферійній зоні створює умови перетікання газів до стінки печі, що призводить до збільшення теплових навантажень і температур тіла холодильників.

Температури тіла холодильних плит заплечиків і низу шахти практично не змінювалися у всіх трьох періодах, це пов'язано з добре розвиненим центральним газорозподілом в печі і малому перетіканні фурмених газів поблизу холодильників заплечиків, що дозволяє утримувати на них гарнісажеподібні маси значної товщини, які були виявлені при видувці доменної печі на капітальний ремонт з шоткретуванням шахти.

Динаміка зміни температур холодильників на різних рівнях, протягом квітня–жовтня 2016 р. до зупинки ДП на шоткретування шахти, показала значні коливання (рис. 5.17).

Середня температура тіла холодильних плит змінювалася від 80 °С до 220–230 °С при пікових навантаженнях, при цьому найбільше за абсолютною величиною і відхиленням температурно-теплове навантаження у всьому періоді зафіксовано на відм. 22 040, найменше – на

заплечиках. Для аналізу змін температур холодильних плит ДП №5 в умовах освоєння технології вдування ПВП в квітні–жовтні 2016 р., цей період був розбитий на 5 окремих підперіодів (рис. 5.17), в яких переважали різні чинники.

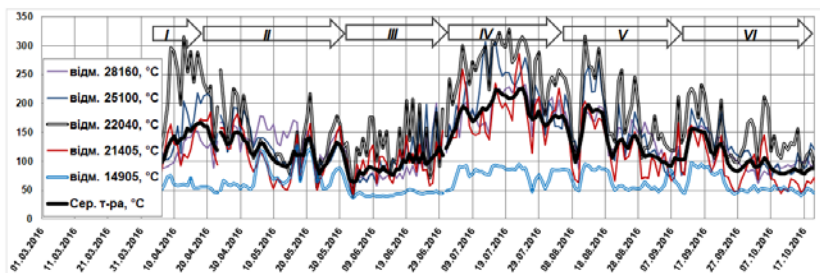


Рис. 5.17. Зміна температур термодатчиків тіла холодильних плит ДП №5 в період освоєння технології вдування ПВП

Як було показано раніше, збільшенню місцевих теплових навантажень на систему охолодження сприяють збільшення тепло-газодинамічних параметрів дуття і інтенсивності процесу плавки, збільшення рудного навантаження при заміні коксу паливними добавками до дуття. Так, підвищення O_2 в дутті сприяє збільшеному виходу горнових газів і збільшенню теоретичної температури горіння, що вимагає температурно-теплової компенсації у вигляді паливних добавок, ці фактори призводять до збільшення виробництва чавуну при збереженні витрати дуття і стійкості сходу шихти. Основні фактори, які постійно впливають на температуру холодильних плит, наведені на рис. 5.18, інші параметри і шихтові умови змінювалися різноспрямовано або незначно. На рис. 5.19 приведені розподіли температур тіла холодильників для шести аналізованих періодів по висоті ДП №5.

Як видно в періоді I на зростання температури холодильних плит впливало збільшення вмісту кисню в дутті і поступове нарощування витрат ПВП в попередньому періоді, йшов пошук оптимальних умов плавки і формування газорозподілу в умовах вдування ПВП при нормальній інтенсивності плавки. Як показано на рис. 5.19, зміна розподілу температур по висоті ДП №5 не призводить до значної зміни середньої температури тіла холодильників. Середня температура досягала $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальна на

відм. 22 040 – 300 °С, температура заплечиків при цьому залишалася незмінною завдяки гарній газопроникності центральної зони ДП №5.

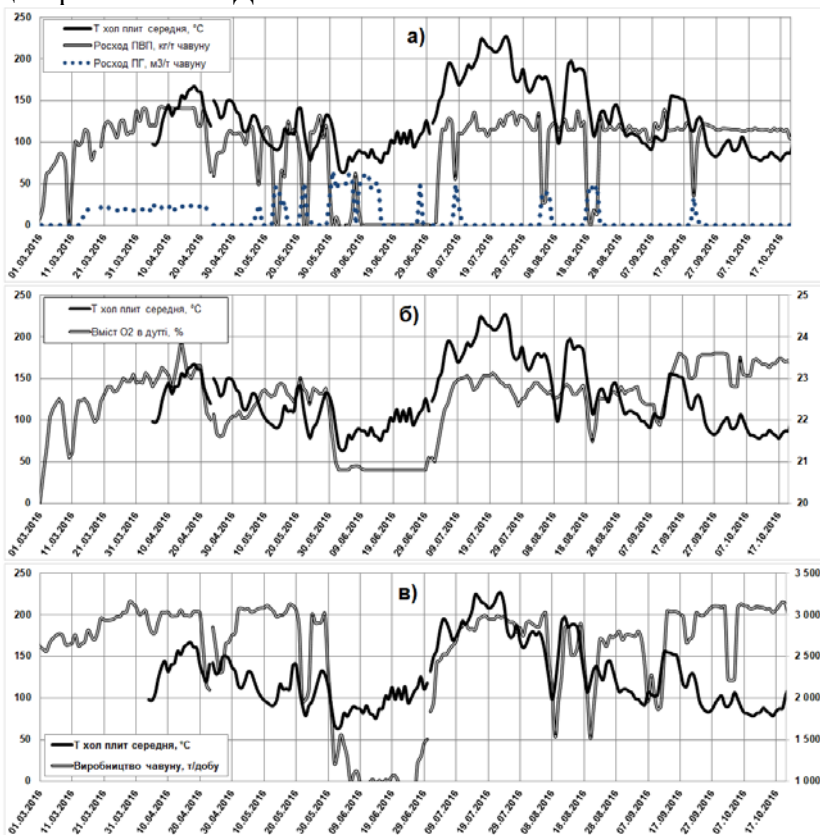
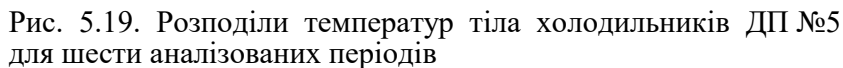


Рис. 5.18. Зміна температур термопар тіла холодильних плит в період освоєння технології вдування ПВП і паливно-дуттєвих добавок (а), вмісту кисню в дутті (б), виробництва чавуну (в)

На початку періоду II – 20–30.04.2016 р. температури почали зменшуватися, багато в чому, завдяки зменшенню інтенсивності плавки, потім спостерігалися значні коливання температури, пов'язані з дискретною роботою ДП №5 (роботою неповну добу) в умовах обмеження постачання сировини при нормальній інтенсивності плавки, коливання температур заплечиків свідчили про схід гарнісажу. Також в



У періоді III піч працювала дискретно, з низькою інтенсивністю, середня температура зменшилася до 100 °С. У першій половині цього періоду використовували ПГ, після чого перейшли на атмосферне дуття, що призвело до незначного зростання середньої температури холодильних плит. При цьому, незважаючи на низьку середню температуру, відхилення температури на відм. 22 040 від середньої становили 50 °С при використанні ПГ, і понад 100 °С при атмосферному дутті. Це свідчить про значне перетікання горнових газів з центральної зони на периферію через широкі коксові вікна при зменшеному рудному навантаженні і недостатності газо-дуттєвих параметрів для створення врівноваженої системи різноспрямованих сил ваги шихти і підпору газу, що призводило до зменшення порозності стовпа шихти.

У періоді IV почалося значне нарощування газодуттєвих параметрів і інтенсивності плавки, що зумовило значне зростання температур тіла холодильників. Подача ПВП і збільшення його витрати до 120 кг/т чавуну 03–05.07.2016 р. привели до зростання середньої температури від 130 до 195 °С за рахунок температур по всій висоті печі, а потім температури трохи зменшилися до 165 °С – 08.07.2016 р. Подальше зростання температури і її коливання були пов'язані зі збільшенням виробництва при нарощуванні газодуттєвих параметрів. Після стабілізації температур, вони почали знижуватися 25.07–05.08.2016 р., в основному, за рахунок температури на відм. 22 040 в процесі формування газопроникного стовпа шихти з центральним газорозподілом.

Нижні і верхні піки, які спостерігаються при загальній тенденції зниження середньої температури в періоді V, пов'язані зі стоянками на ремонт з подальшою задувкою і зниженням витрати ПВП з компенсацією природним газом. При цьому верхні піки продиктовані, в основному, збільшенням температур на відм. 22 040 і 25 100, що пов'язано з формуванням газорозподілу в ДП. Після зменшення температур холодильників заплечиків від 90 до 50 °С почало спостерігатися зменшення середньої температури холодильних плит в нижній і середній частині шахти по висоті при середній інтенсивності доменної плавки.

На початку періоду VI збільшилася інтенсивність плавки, вміст O_2 в дутті збільшився від 22,7% до 23,4%,

витрата ПВП застабілізовано і становила 120–130 кг/т чавуну, виробництво чавуну становило, в середньому, 3050 т/добу. Середні температури зросли на 50 °С – до 150 °С і потім, протягом 10–15 діб, зменшилися до 100 °С і менше. Розкид температур по висоті при цьому зменшився, і без урахування підвищень після стоянок, не перевищував 50 °С (рис. 5.19). Зменшення середніх значень температур тіла холодильників забезпечувалося заходами, спрямованими на створення центрального газорозподілу.

5.5.2. Аналіз зміни температур футерівки ДП №3 в період освоєння технології вдування ПВП

Аналіз зміни температур футерівки (периферійного газового потоку) на ДП №3 при освоєнні технологи вдування ПВП показав наступне. При вдуванні високих витрат ПВП (15–18 т/год) температури середини шахти на двох рівнях установки термопар збільшилися від 215 °С до 550 °С, в середньому. Температури термопар футерівки першого ряду низу шахти характеризувалися невеликою своєю зміною на початку 2016 р., після чого, при переході на ПВП, на цьому горизонті був відзначений нестабільний характер зміни температури. На другому ряді низу шахти спостерігалася протилежна картина, що характеризується стабілізацією температур і середньоквадратичного їх відхилення по окружності з початком вдування ПВП. Така особливість зміни температур в нижній частині шахти печі свідчить про зміну положення кореня зони в'язко-пластичного стану при переході від режиму роботи ДП на «безгазовій шихті» зі зволоженням дуттям на початку 2016 р. на технологію з використанням природного газу і потім ПВП (див. розділ 5.2). При цьому, в умовах вдування великих витрат ПВП всі температури низу шахти на двох рівнях збільшилися від 215 °С до 390 °С, в середньому.

На рівні розпару при збільшенні витрат ПВП температури термопар футерівки збільшилися, в середньому, у 1,8 рази (до 310 °С), в порівнянні з початком 2016 р. Температура термопар футерівки на рівні заплечиків змінювалася стабільно, це свідчило про наявність стійкого гарнісажу на цьому рівні, що було потім підтверджено при візуальному огляді шахти після видувки. За абсолютною своєю величиною температури на рівні заплечиків

збільшилися незначно – від 125 °С до 175 °С. Зміну температур футерівки шахти по висоті ДП №3 представлено на рис. 5.17–5.21.

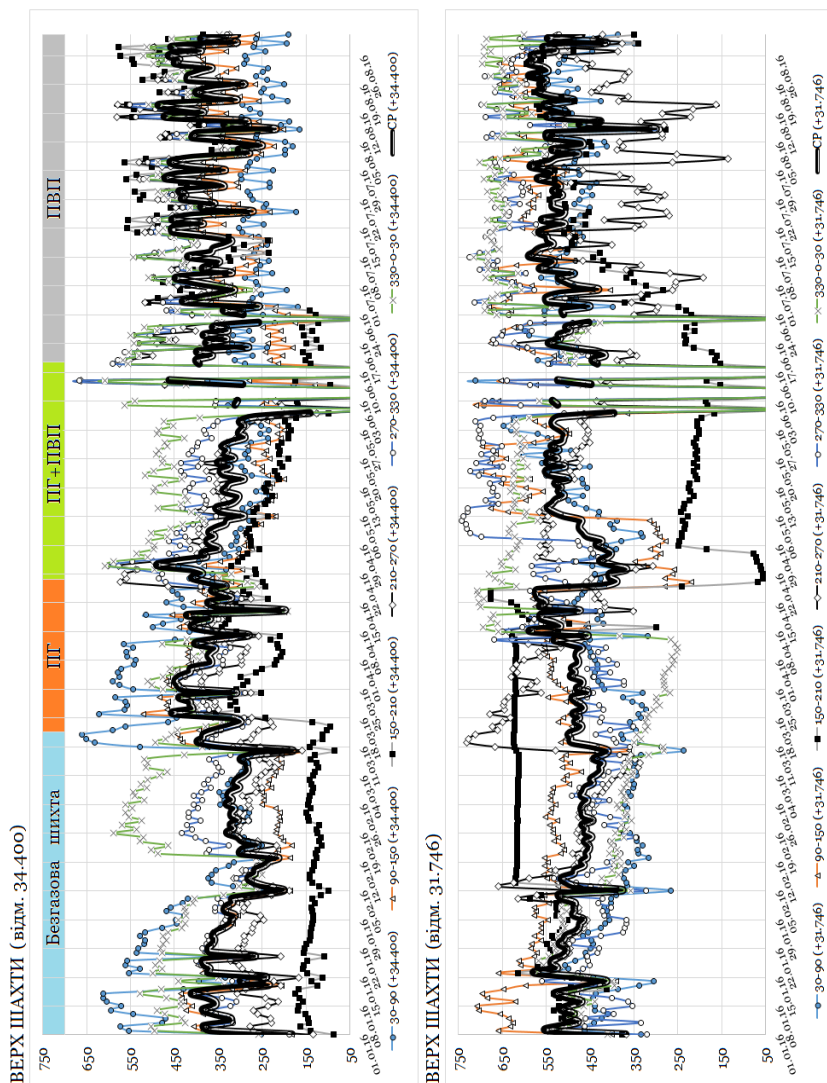


Рис. 5.17. Зміна температури футерівки верху шахти ДП №3 за січень–серпень 2016 р.

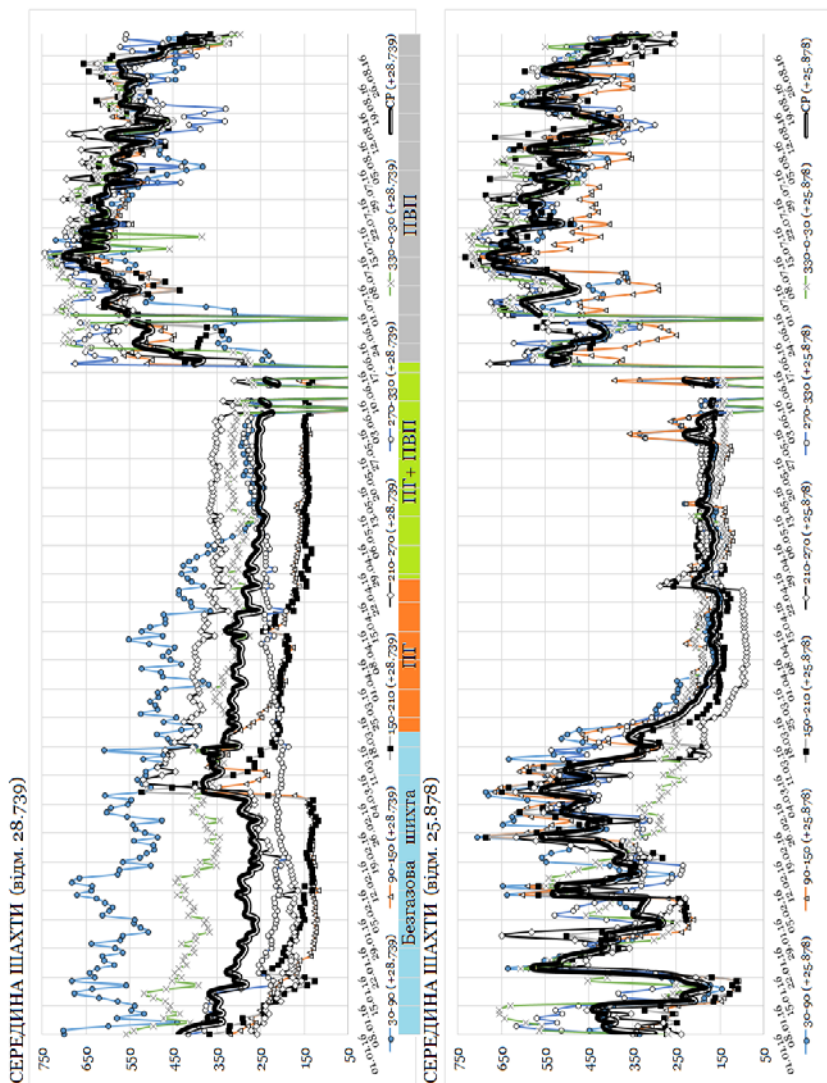


Рис. 5.18. Зміна температури футерівки середини шахти ДП №3 за січень–серпень 2016 р.

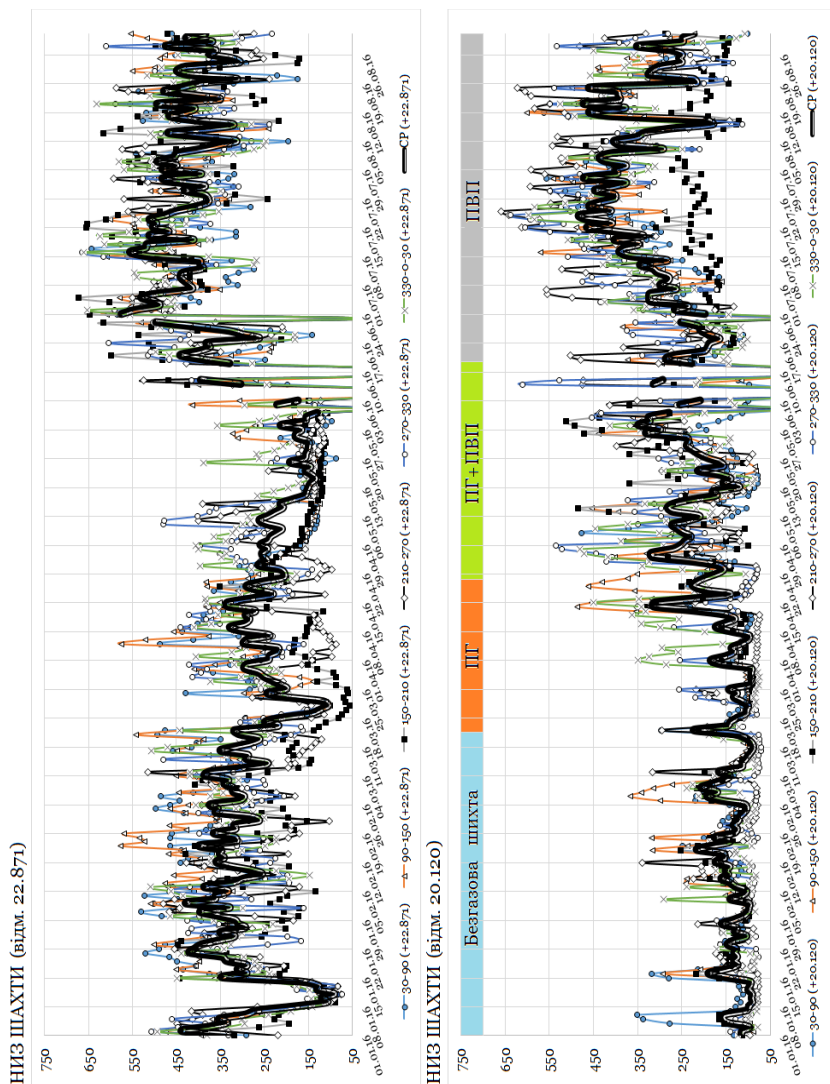


Рис. 5.19. Зміна температури футерівки низу шахти ДП №3 за січень–серпень 2016 р.

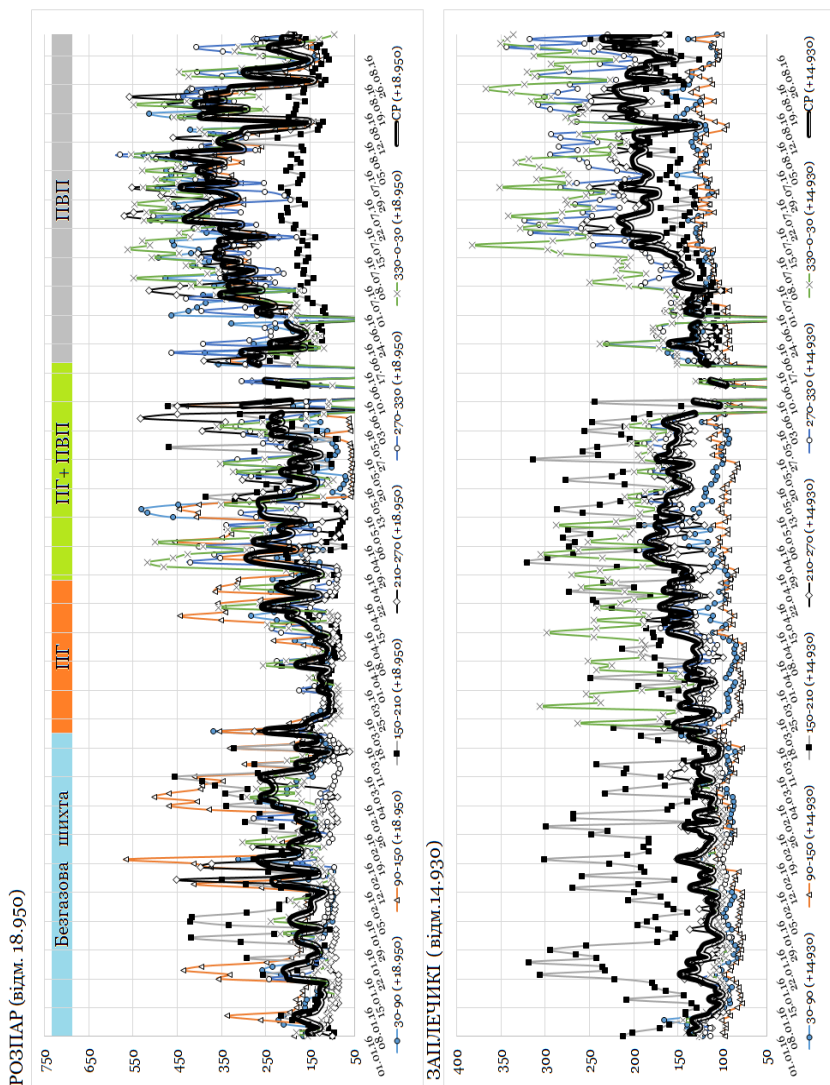


Рис. 5.20. Зміна температури футерівки розпару і заплечиків ДП №3 за січень–серпень 2016 р.

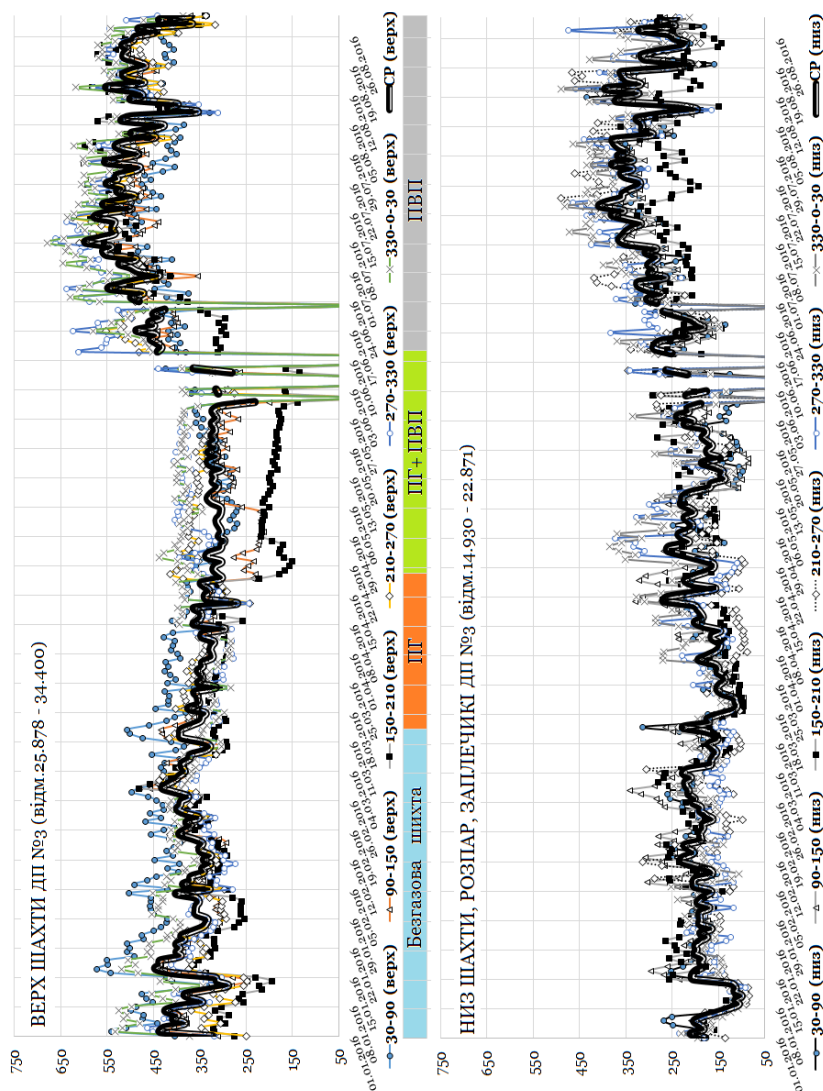


Рис. 5.21. Зміна температури футерівки по висоті ДП №3 за січень–серпень 2016 р.

В результаті виконаного аналізу встановлено, що на рівнях середини, низу шахти і розпару в перехідних дуттевих і паливних режимах роботи ДП №3, в тому числі, з початком вдування ПВП спостерігалися істотні зміни як абсолютних значень температур термопар футерівки, так і їх середньоквадратичних відхилень по окружності печі. Це стало наслідком як зміни положення кореня зони в'язко-пластичного стану, так і зносу футерівки шахти, враховуючи, що на момент вдування великих витрат ПВП кампанія шахти печі становила вже два роки, що обумовлювало необхідність проведення чергового шоткретування [60]. Використання в технології плавки раціональних режимів завантаження при вдуванні ПВП дозволило на ДП №3 без футерівки шахти забезпечити експлуатаційну стійкість системи охолодження і безаварійну роботу доменної печі. Після шоткретування шахти ДП №3 у вересні 2016 р. розподіл температур футерівки від рівня заплечиків до верхнього горизонту шахти вирівнявся, значення температур змінювалися в межах від 100 °С до 200 °С, до січня 2017 р. включно.

Висновки до Глави 5.

1. Виконано аналіз динаміки зміни температур футерівки заплечиків, розпару і шахти ДП за п'ять років її експлуатації – з грудня 2011 р. по вересень 2016 р. В результаті аналізу зміни температур футерівки виявлені технологічні чинники, що впливають на середньомісячні значення температури футерівки ДП. Так, на температури футерівки верхньої зони в більшій мірі впливає знос футерівки, на температури футерівки нижньої зони – формування стійкого гарнісажу. Встановлено фактори, що впливають на зміну середньоквадратичних відхилень температур футерівки по окружності печі: якість залізовмісних матеріалів і коксу, програма завантаження печі і режим формування порцій, захарашення горна і використання промивних матеріалів, параметри дуттевого режиму з використанням різних паливних добавок, знос футерівки.
2. Визначено граничні значення середньомісячних температур, які свідчать про частковий (~50%) або

повний знос футерівки шахти, а також граничні значення температур нижньої зони печі, які характеризують наявність стійкого гарнісажу. Встановлено, що середньомісячна температура футерівки середини і верху шахти – 375–400 °С свідчить про її знос на ~50% (підтверджено геодезичними вимірюваннями двічі – в середині 2013 р., та на початку 2016 р.), потім руйнування футерівки сповільнюється. При перевищенні середньомісячною температурою значення 450 °С, як показали дві кампанії ДП, футерівка середини і верху шахти повністю відсутня. При середньомісячній температурі футерівки низу шахти, розпару та заплечиків – 300 °С має місце утворення в нижній зоні печі нестійкого гарнісажу, що вимагає прийняття рішень щодо коригування складу і режиму формування порцій шихти. Перевищення температурою футерівки нижньої зони значення 350 °С свідчать про повну відсутність захисного гарнісажу та (або) футерівки.

3. Прийнято, що одним з показників стабільного ходу печі можуть бути середньоквадратичні відхилення температур футерівки по окружності печі. Встановлено, що при порушеннях ходу печі середньоквадратичні відхилення температур перевищують величину $0,2 \cdot T_{\text{СЕР}}$, де $T_{\text{СЕР}}$ – середньомісячна температура футерівки шахти. Так, для рівнів установки термопар футерівки середини і верху шахти ДП величина середньоквадратичного відхилення температур по окружності печі не повинна перевищувати 60 °С, а допустима межа середньоквадратичного відхилення температур футерівки низу шахти, розпару та заплечиків становить 40 °С.
4. Виконано аналіз зміни температур, що реєструються термопарами футерівки шахти в періодах роботи доменної печі при практично повному зносі футерівки. Дана температура була ідентифікована як температура периферійного газового потоку і аналіз її зміни було виконано при роботі доменної печі в різних газодинамічних і паливних умовах: на «безгазовій шихті», з природним газом, з природним газом і

пиловугільним паливом, з пиловугільним паливом. У досліджуваних різних газодинамічних і паливних умовах визначено екстремум кривої зміни температури периферійного газового потоку в нижній частині доменної печі, який прийнятий за положення кореня зони в'язко-пластичного стану. Результати, отримані раніше німецькими дослідниками свідчать на користь цієї гіпотези.

5. Розроблено та реалізовано у складі АСУ систему моніторингу теплового стану шахти ДП. З використанням інформації системи розроблений і випробуваний метод обґрунтованого вибору розташування закритих повітряних фурм або фурм різного діаметру. У досліджуваних періодах роботи ДП, при використанні методу, в результаті зміни розташування закритих фурм зменшилися як окружна нерівномірність температур футерівки, так і середні значення температур. Так, середня температура футерівки низу шахти, розпару та заплечиків зменшилася на 33 °С – від 264 до 231 °С, а температура футерівки середини і верху шахти зменшилася на 88 °С – від 476 до 388 °С, що обумовлено перерозподілом інтенсивності газового потоку. Крім того, в результаті використання запропонованого методу перерозподіл газового потоку сприяв зменшенню питомої витрати коксу на 1,7% при практично незмінних витратах ПВП і коксового горіха, температури дуття, а також якісних та кількісних характеристик залізорудної сировини та коксу.
6. Встановлено, що зміни температури футерівки і тіла холодильників ДП свідчать про зміну напрямку руху газового потоку в стовпі шихти по радіусу і окружності печі при істотних відхиленнях в процесі плавки і при зміні опору стовпа шихтових матеріалів. Встановлено також, що зниження інтенсивності плавки і погіршення якості шихтових матеріалів при збільшенні частки окатишів в залізорудній частині шихти призводять до збільшення висоти і протяжності зони високих температур, яка характеризує стан кореня в'язкопластичної зони.

ГЛАВА 6

РОЗВИТОК СПОСОБІВ ЗАДУВКИ ДОМЕННІЙ ПЕЧІ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЗУПИНКИ

6.1. Класифікація стоянок доменних печей та технологічні положення задувок⁸

Зупинка доменних печей відповідальний і неекономічний захід, якого, по можливості, намагаються уникати. Зупинки печей здійснюють переважно для проведення капітальних ремонтів, які за об'ємом виконуваних робіт поділяються на ремонти I, II і III-го розрядів. Рідше, під впливом економічних і організаційно-технічних факторів проводять вимушену зупинку печей на консервацію. Залежно від тривалості і проведених заходів стоянки можна умовно розділити на три види: «холодна» (без козлового чавуну в горні); «гаряча» (нетривалі стоянки з частковою або повною видувкою шихти); «умовно гаряча» або «тепла» (тривала стоянка без випуску або з частковим випуском козлового чавуну і вигрібанням матеріалів з горна ДП).

Відповідно до виду стоянки вибираються режими завантаження і задувки ДП, які регламентуються технологічними інструкціями. Задувки після капітального будівництва можна віднести до задувок після холодної стоянки з рядом особливостей. Задувка ДП після стоянок протягом 5–10 діб добре вивчена і не представляє складнощів для персоналу доменного цеху, так само відпрацьовано велику кількість способів таких задувок, що дозволяють виводити ДП на нормальний режим роботи вже через 36–48 годин при форсованій роздувці [112, 127–131]. Труднощі новозбудованих печей і видутих на консервацію або капітальний ремонт I-го розряду пов'язані з налаштуванням і пуском механізмів, проведення промислових випробувань і налагодженням нового обладнання.

При задувці ДП після холодної або гарячої стоянки дотримуються таких основних технологічних положень:

⁸ Автори вдячні к.т.н., с.н.с. М.М. Можаренко за участь у виконанні досліджень

1. Забезпечення на початковому етапі прогріву горновими газами нижньої та центральної частини ДП по висоті. Створення та підтримка температурно-теплого рівня, що забезпечує фільтрацію шлакових розплавів з перших шихт, накопичення і випуск рідких продуктів плавки.

2. Прогрівання верхніх шихтових матеріалів, забезпечення надходження необхідного тепла на теплоаккумуляцію і плавлення. Продукти плавки, що надходять з перших шихт повинні забезпечити необхідний ступінь офлюсовування золи коксу і перенести достатню кількість тепла з зони нагріву-плавлення в горн ДП [132, 133], для виключення «закозління» і забезпечення помірного прогріву футерівки по висоті ДП, уникаючи при цьому «теплового удару».

3. Збільшення порозності шихти по висоті ДП за рахунок горіння коксу на фурмах і підпору, що створюється дуттям, формування стійких фурмених вогнищ, що забезпечують рівний схід шихти.

4. Формування чавуну і шлаку відповідно до задач роздувочного періоду, забезпечення їх дренажу, накопичення і видалення з печі.

5. Формування дуттєвого і газодинамічного режимів роботи печі, які задовольняють заданий рівень виробництва, витратні показники і забезпечують стійкий технологічний стан в ході роздувки.

При традиційній задувці ДП після холодної або гарячої стоянки з повною видувкою шихти задувочні шихти розташовують за наступним принципом: «0» та «1»-і шихти складаються лише із коксу і заповнюють нижній об'єм печі по висоті, включаючи заплечики і розпар; «2»-а шихта розташовується по висоті печі вище рівня розпару – низу шахти (не менше 8 м від осі повітряних фурм) і включає в себе кокс і флюси, та має низьке рудне навантаження 0,55–0,70; «3»-тя і наступні шихти вже містять крім коксу і флюсів також «робочі» метало-шлакові складові шихти з поступовим збільшенням рудного навантаження до колошника ДП, це забезпечує прогрів чавуну із вмістом в ньому кремнію 2,5–3,0% і вихід шлаку близько 1 т/т чавуну. При цьому загальне рудне навантаження задувочної шихти в печі може значно відрізнятись на різних комбінатах в залежності від технології роздувки і застосовуваних матеріалів в якості задувочних

шихт, зазвичай рудне навантаження змінюється в межах 0,6–0,9 од.

Дуттеві параметри при задувці печі в перші 8 годин мають забезпечувати теоретичну температуру горіння 1800–2000 °С, що створює умови для прискореної акумуляції тепла в нижній (горн) і середній (заплечики, розпар) областях по висоті печі. За умови досягнення стійкого сходу шихтових матеріалів і нормальної роботи фурм, через 8 годин з моменту задувки печі, проводиться подача через них паливних добавок – теплових компенсаторів, при цьому теоретична температура горіння знижується до 1650–1750 °С. Це сприятиме переміщенню області високих температур в верхню частину печі, де розташована основна маса залізорудних матеріалів, а також прискореному їх прогріванню. Витрата природного газу збільшується кожні 4–6 годин. Після першого або другого випуску і за умови сталого температурно-теплогового стану печі (головним чином, температури і складу продуктів плавки, стійкого сходу шихти, нормальної роботи тракту шихтоподачі і завантажувального пристрою) слід починати форсування ходу печі зі збільшенням витрати дуття до 1,35–1,45 м³/м³ об'єму печі при закритті додатково 15–25% повітряних фурм, доведенням температури дуття до 950–1000 °С і теоретичної температури горіння до 2000–2050 °С.

Основні вихідні дані для розрахунку задувочної шихти і вибору дуттєвого режиму для «традиційної» задувки наведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1. Вихідні дані для вибору задувочної шихти і дуттєвого режиму при задувці домених печей [131]

п/п №	Параметр	Рекомендації для розрахунку задувочної шихти і вибору дуттєвого режиму
1.	Шихтові матеріали	Кокс, агломерат задувочний і поточного виробництва, залізна руда, конвертерний шлак, шлаковий щебінь, вапняк
2.	Рудне навантаження на весь об'єм задувочної шихти, т/т	0,60–0,75

п/п №	Параметр	Рекомендації для розрахунку задувочної шихти і вибору дутцевого режиму
3.	Рудне навантаження у верхній залізородній шихті, т/т	2,2–2,8
4.	Склад чавуну, %: [Si]; [S]; [Mn], [P]	3,0–3,5 до 0,05 не задаються *)
5.	Основність шлаку 1 (CaO/SiO ₂)	0,95–1,10
6.	Кількість шлаку, кг/т чавуну	750–1000
7.	Підготовка горна	На лещаді формують захисний шар, в умовах України найчастіше завантажують щебінку або шлакопемзу шаром 350–400 мм або залишають частину матеріалу на лещаді при неповному вигрібанні матеріалів; в умовах наявності в регіоні дешевого лісу або залізничних шпал, захист лещаді, горна і фурм викладають цими матеріалами; в льотки встановлюють труби з перфорацією діаметром 80–120 мм і тримають їх відкритими до появи рідкого розплаву.
8.	Повітряні фурми	Піч зазвичай задувають на всі повітряні фурми робочого діаметру. При повільному темпі роздувки з витратою дуття 0,4–0,5 од. об'єму печі в хвилину її зупиняють через 12 годин на закриття 15–25% фурм. При більш інтенсивному темпі роздувки, в залежності від прийнятого ступеня форсування, піч зупиняють на закриття повітряних фурм через добу.

п/п №	Параметр	Рекомендації для розрахунку задувочної шихти і вибору дутцевого режиму
9.	Швидкість дуття, м/с	Не менш 150, необхідно взяти всіх заходів для досягнення швидкості дуття 175 м/с і більше.
10.	Температура дуття, °С	При задувці 700–750 °С, після запалювання коксу знизити до 450–550 °С, потім повільно підвищується згідно з прийнятим графіком роздувки.
11.	Витрата дуття, од. об'єма печі в хвилину	Початкова витрата дуття 0,5–0,6. До кінця першої доби роздувки печі витрата дуття повинна досягати 0,9–1,0. Витрату дуття необхідно збільшувати з випередженням порівняно з температурою дуття.
12.	Подача природного газу	Для умов України не раніше ніж через 12 годин після задувки. Зазвичай подача природного газу здійснюється після першого випуску.
13.	Теоретична температура горіння, °С	До першого випуску 1800-2000 °С. Регулюється параметрами комбінованого дуття

*) – сучасні положення задувок регламентують вміст [Mn] в чавуні

Пуск ДП після «умовно гарячої» стоянки близько 30 діб або після шоткретування шахти ДП з великим відсотком відскоку без вигрібання матеріалів з горна і випуску козлового чавуну являє більшу складність і вимагає обговорення і узагальнення досвіду задувок в таких умовах. У першому випадку в горні залишається частково або повністю застиглий чавун, причому рівень чавуну в горні підходить до рівня чавунних льоток, а коксова насадка в горні може бути заповнена грузлими або затверділими шлаками, у другому – щільний тугоплавкий шар на поверхні шихти, що твердне при нагріванні і перешкоджає проходженню пічних газів і опусканню матеріалів з верхніх горизонтів. В таких умовах інтенсифікація газодутцевих і шихтових умов у період роздувки може призвести до негативних наслідків: значних обривів шихти, «закозління» металопріймача і як наслідок,

порушення суцільності футерівки, розривів броні і системи охолодження ДП, усунення яких призводить до збільшення часу виведення печі на нормальний технологічний режим, втрат виробництва і зниження подальшої експлуатаційної надійності ДП. В даний час загальноприйнятими вимогами при задувці печей після тривалої умовно-гарячої стоянки і ремонту з шоткретуванням шахти є – секторна задувка на зменшеній кількості повітряних фурм і знижений темп нарощування газодуттєвих параметрів.

Нормативними документами та технологічними інструкціями підприємств допускається зупинка з частковою видувкою на термін не більше 45 діб при задовільному технічному стані ДП. У разі зупинки на термін більше 45 діб піч повинна бути повністю видута з випуском верхнього «козлового» чавуну і вигрібанням шихти [112, 134]. У рідкісних випадках, під впливом форс-мажорних чинників, проводять аварійну зупинку і консервацію ДП, тривалість якої може перевищити нормативно допустиму [112, 135]. При значній тривалості стоянки ДП (понад регламентованої) без випуску «козлового» чавуну, шихтові матеріали в нижній частині печі, в «звичайних умовах» виконують роль теплоізоляційного і теплоаккумуляційного шару, не забезпечують збереження мінімально необхідного температурно-теплогового резерву. Більшість відомих випадків збереження чавуну «мертвого шару» в рідкому текучому стані відносяться до ДП малого об'єму початку-середини минулого століття, в яких застосовувався концептуальний підхід до систем охолодження і футерівки, який відрізняється докорінно від сучасних печей. Сучасні ДП оснащуються водяним підлещадним охолодженням і більш інтенсивним охолодженням холодильних плит, які при наявності футерівки низу печі, яка має гарну теплопровідність, забезпечують більш низькі температури по товщині блоків і на їх внутрішній «робочій» поверхні. Тому, незважаючи на еволюційне збільшення об'єму «мертвого шару» сучасних ДП, створюються умови затвердіння розплавлених мас у металоприймачі і «закозління» печей в разі тривалої стоянки. При розігріві печі в процесі задувки відбувається термічне розширення затверділого чавуну, що залишився в печі і створення значного внутрішнього тиску, в тому числі і на стінки горна, і може привести до порушення суцільності

огорожі ДП. На процес термічного розширення «козлового» чавуну впливають багато факторів – розподіл температур по його висоті і радіусу, зміна хімічного складу чавуну і ін.

При достатньому підводі тепла до застиглих «козлових» мас проплавленими продуктами плавки до верхньої поверхні «козла», найбільший розігрів їх буде відбуватися в центральній-проміжній зоні, найменший – в периферійній, таким чином максимальні сили за рахунок термічного розширення чавуну при нагріванні будуть зосереджені на периферії в напрямку стінок горна ДП. Виходячи з цього, необхідно створити умови для максимального підведення тепла до периферійної частини одного сектора по окружності [136], який, при переході в ньому чавуну у в'язко-пластичний стан, буде виступати компенсатором термічних напружень «периферійного» кільця. Потім необхідно забезпечити поступове збільшення розігрітості частини сегмента кільця в більшій мірі, ніж прогрів центральної частини. З огляду на те, що найбільший розпал горна і скупчення продуктів плавки розташовується в секторах чавунних льоток, а також необхідність створення і підтримки дренажу між фурмами і льоткою, задувку печі необхідно проводити в секторі чавунної льотки з більшою тривалістю і малою кількістю відкритих повітряних фурм, зосередити в цій зоні накопичення продуктів плавки і їх видалення. Продукти плавки, на цьому етапі повинні мати підвищену плинність для більшого гідравлічного впливу на застигли маси в цій зоні.

6.2. Удосконалення методів задувки доменних печей після тривалої зупинки в сучасних економічних умовах

Бойові дії на Донбасі у 2014 р., які потягли за собою практично повне припинення поставок сировини та енергоресурсів, привели до екстреної незапланованої зупинки ДП цеху [8, 112, 131]. У підсумку, тривалість стоянки ДП значно перевищила нормативно допустиму тривалість у 45 діб практично в два рази. Наведений в цій главі позитивний досвід задувки ДП фахівцями доменного цеху, технічного управління підприємства за участю авторів цієї книги дозволив узагальнити ці результати і на їх основі сформулювати основні технологічні положення задувки після стоянок, що

перевищують 45 діб без випуску «козлового» чавуну і вигрібання матеріалів. Практичне використання цих технологічних положень при задувці печей після вимушених тривалих стоянок дозволило уникнути виникнення надмірного термічного розширення охолонувших матеріалів, і, як наслідок, прориву броні ДП. ДП №5 була зупинена на тривалу стоянку в режимі гарячої консервації з видувкою її до рівня заплечиків без видачі «козлового чавуну» і вигрібанням матеріалів з горна 28.07.2014 р., а 15.08.2014 р. аналогічним чином була видута на гарячу консервацію ДП №3. У жовтні-листопаді 2014 р. після поліпшення ситуації, що склалася з поставками сировини було прийнято рішення про задувку ДП цеху, 16.10.2014 р. почалася задувка ДП №5 після стоянки 80 повних діб, 10.11.2014 р. – почалася задувка ДП №3 після стоянки 87 діб.

6.2.1. Вибір шихтових матеріалів задувочної шихти

Для формування задувочної шихти були використані традиційні для задувки компоненти шихти: кокс (переважно Авдіївського коксохіму), конвертерний шлак наявний, переважно, в останніх задувочних шихтах і гранульований шлак доменного виробництва. В цілому, задувочна шихта забезпечила рудне навантаження на об'єм ДП на рівні 0,10–0,15 од. Вибір на користь доменного шлаку був обумовлений його властивостями, а саме низькою, порівняно з шлаком конвертерного виробництва, температурою і теплотою плавлення. Малий вихід продуктів плавки з задувочної шихти дозволив значно збільшити тривалість прогріву печі горновими газами, сход шихти забезпечувався, в основному, за рахунок горіння коксу на фурмах, продукти плавки що залишились у металоприймачі після видувки дозволили частково офлюсовати золу коксу і захистити горн. Також на підготовчому і початковому етапах задувки печей, проводилося допоміжне завантаження плавикового шпату безпосередньо через повітряні фурми, який маючи низьку температуру плавлення і високу рухливість при низьких температурах забезпечив додатковий розмиваючий вплив на матеріали між повітряними фурмами і льоткою, поліпшивши таким чином фільтрацію продуктів плавки.

6.2.2. Раціональне завантаження шихти в робочий простір ДП

Режими завантаження у задувочний і роздувочний періоди вибиралися з метою зменшити рудне навантаження на периферії ДП при розвантаженому центрі. Такий підхід був обраний з огляду на необхідність підтримки постійного сходу шихти для накопичення більшої кількості продуктів плавки в периферійній зоні в районі відкритих повітряних фурм при низькій інтенсивності ходу роздувки і прогріву нижньої зони печі. На ДП №5 використовувалася традиційна для цієї печі система завантаження КРРК↓. На ДП №3 при завантаженні задувочної шихти і на протязі всього роздувочного періоду використовувалися, рекомендовані авторами книги, програми завантаження БЗП [104], на початковому етапі роздувки використовувалася програма завантаження, що характеризується зменшеним рудним навантаженням в периферійній зоні ДП для забезпечення помірно розвинутого периферійного газорозподілу.

6.2.3. Динаміка відкриття повітряних фурм по окружності ДП

Задувка ДП №5 почалася 16.10.2014 р. на одну повітряну фурму (п/ф) №5, 17.10.2014 р. о 07:10 та о 21:00 були відкриті по дві сусідні фурми, через добу ще дві, таким чином у другу добу від початку задувки було відкрито п'ять п/ф (25%). Через добу роботи відкрили ще дві п/ф і продовжували задувку на 7 фурмах (30%) протягом 1,5 доби (рис. 6.1а та 6.1б) При досягненні стабільної появи значних мас чавуну на льотках протягом наступних трьох діб збільшили динаміку відкриття п/ф (до досягнення 70% від загальної кількості) та здійснили перезакриття їх для переходу від секторної задувки до рівномірного відкриття п/ф по окружності ДП №5.

Задувка ДП №3 почалася з відкритими п/ф № 19 та № 20, розташованими в секторі чавунної льотки №2 (рис. 6.1в та 6.1г). Робота з малою кількістю відкритих п/ф тривала п'ять діб, потім динаміка відкриття п/ф склала близько двох п/ф у 12 годин. Відкриття п/ф проводилося рівномірно щодо осі

чавунної льотки №2 у роздувочному секторі, потім, по закінченню сьомих діб від початку задувки, з невеликим зсувом у бік чавунної льотки №1 (рис. 6.1в). Після досягнення 75% відкритих п/ф, на десяту добу від початку задувки було проведено їх перезакриття і перехід до більш рівномірного розташування відкритих і закритих п/ф по окружності ДП, кількість відкритих п/ф, при цьому, було зменшено до 16 шт.

Як видно з представлених схем (рис. 6.1), динаміка відкриття п/ф на ДП №5 була інтенсивніше, ніж на ДП №3. Це було пов'язано насамперед з обмеженнями постачань доменної сировини в період роздувок і неможливістю забезпечення безперебійної роботи обох ДП цеху. Така ситуація негативно позначилася на тривалості подальшого періоду роздувки і виведенні печей на робочі параметри роботи.

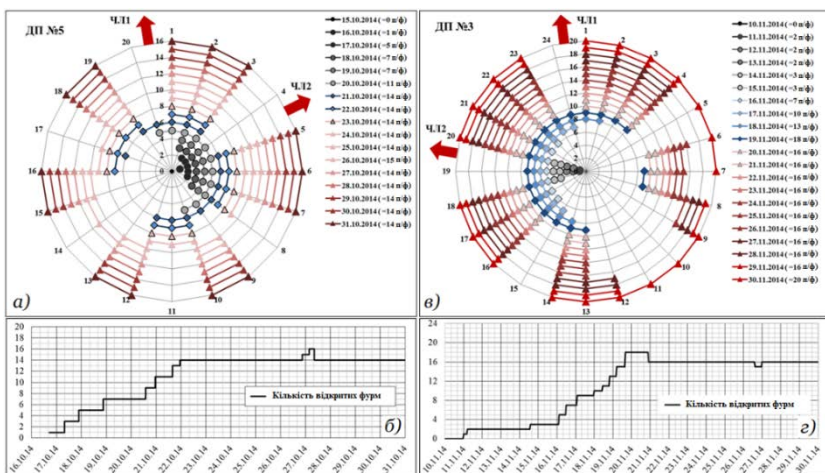


Рис. 6.1. Схема розташування (а і в) та динаміка відкриття повітряних фурм (б і г) по окружності ДП в період задувки і роздувки ДП №5 (а і б) та ДП №3 (в і г)

6.2.4. Газо-дутьєві параметри в період задувки і роздувки ДП

Перевищення критичних значень внутрішньої напруги металевих конструкцій і розриви броні при задувці «заморожених» ДП відбуваються, в основному, на 10–15 добу від початку задувки [137]. При цьому зростання термічних

напружень в системах огорожі починається значно раніше. Тому обраний регламент роботи на початку задувочного періоду передбачав стриманий темп нарощування газодуттєвих і теплоенергетичних параметрів, для ослаблення впливу термічних розширень і їх деконцентрації в нижній зоні ДП. Для запобігання погіршеного дренажу через зменшення швидкості прогріву в нижній частині ДП і можливого приходу недостатньо нагрітих продуктів плавки (в основному золи коксу, у відсутності в перших задувочних шихтах, традиційного в таких випадках, конвертерного шлаку і малого загального рудного навантаження) необхідно забезпечити розігрів коксу і матеріалів в зоні «робочої» чавунної льотки і вище – до рівня п/ф до початку задувки. Це було досягнуто шляхом установки в чавунну льотку труб, через які подавався природний газ і повітря для його горіння. Як було сказано раніше, обмеження поставок сировини обмежили необхідний рівень робочих параметрів після роздувочного періоду на ДП №5 і збільшили тривалість виведення ДП №3 на робочі параметри. Динаміка зміни основних газодинамічних параметрів представлена на рис. 6.2 та 6.3.

Роздувка на малій кількості відкритих п/ф на ДП №5 та ДП №3 забезпечила зменшену витрату холодного дуття протягом перших трьох і п'яти діб, відповідно, потім після прогріву сектора чавунної льотки і початку опускання перших полегшених подач в піч (рис. 6.2), почалося поступове нарощування витрат дуття і відповідного відкриття п/ф. Температура гарячого дуття в задувочному періоді плавно збільшувалася від 400–500 °С в першу добу роботи печей до 600–750 °С в наступні 4–5 діб. Знижена температура дуття 750–850 °С зберігалася до початку збільшення інтенсивності сходу подач і збільшення рудного навантаження до 2 од. и більше. Такий режим задувки забезпечив досягнення теоретичної температури горіння у 2000 °С на ДП №5 в першу добу роботи (рис. 6.2).

В процесі роздувки ДП №3 теоретична температура горіння плавно збільшувалася до 1900 °С в перші дві доби, потім її зростання сповільнилося до ~ 50 °С/добу і досягла значення 2000 °С після п'яти діб від початку задувки печі. Подальше її збільшення при початку форсування задувки печі компенсувалося подачею природного газу на п/ф (рис. 6.2). Швидкість дуття на п/ф на початку задувки ДП

забезпечувалася за рахунок малої кількості відкритих п/ф в поєднанні зі зниженою витратою холодного дуття. На ДП №5 в початковому періоді швидкість дуття становила ≈ 200 м/с і в міру відкриття п/ф зменшилася до 150 м/с (рис. 6.2). На ДП №3 швидкість дуття на початковому етапі збільшувалася від 250 до 350 м/с, потім у міру відкриття п/ф і форсування задувки зменшилася до ~ 200 м/с.

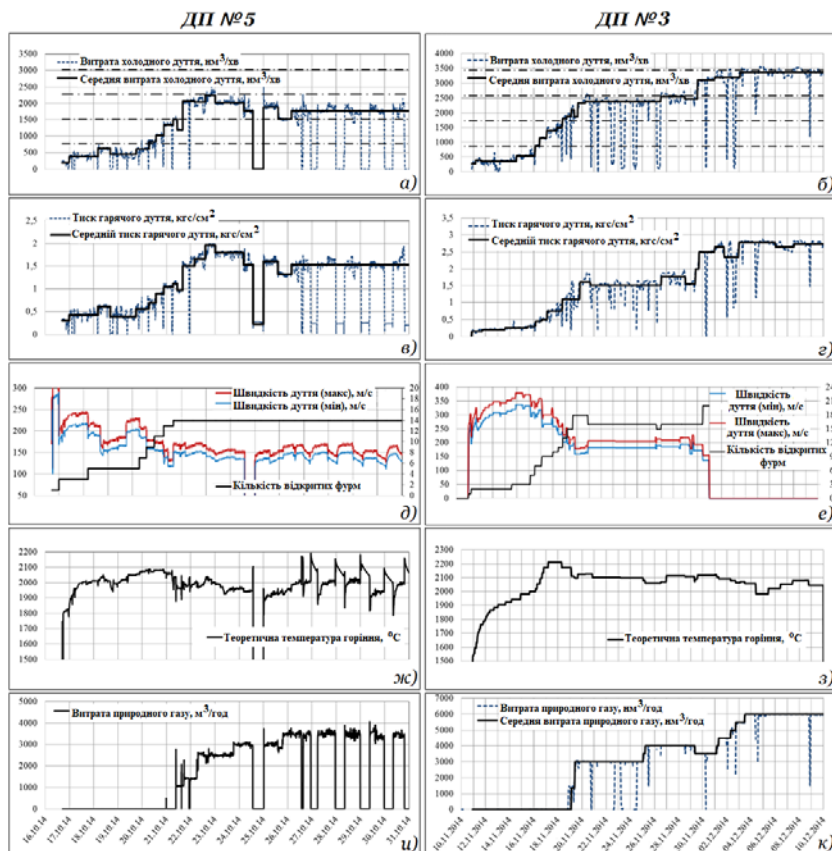


Рис. 6.2. Витрата холодного дуття (а і б), тиск гарячого дуття (в і г), швидкість дуття (д і е), теоретична температура горіння (ж і з) та витрата природного газу (и і к) в період задувки та роздувки після тривалої стоянки ДП №5 і ДП №3.

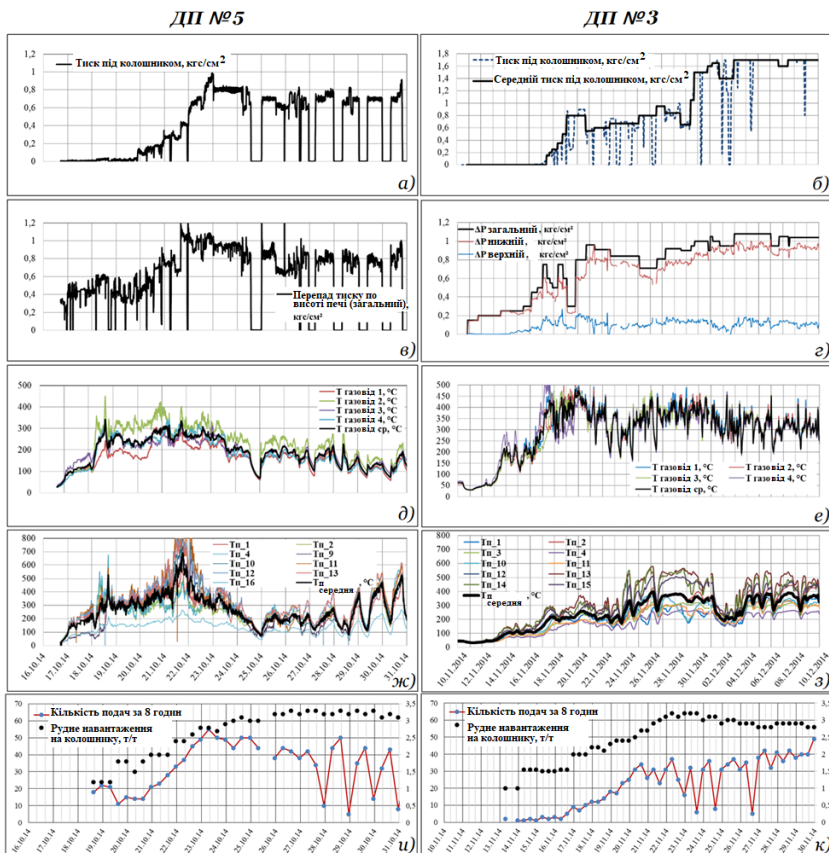


Рис. 6.3. Тиск під колошником (а і б), перепади тиску (в і г), температура колошникового газу (у газовідводах) (д і е), температура периферійних газів (ж і з), рудне навантаження і кількість подач в зміну (8 годин) (u і к) в період задувки та роздувки після тривалої стоянки ДП №5 і ДП №3.

Спільно з початком збільшення витрати дуття, доменні печі були підключені до заводських систем доменного газу на третю і сьому добу від початку задувки для ДП №5 та ДП №3, відповідно, ще через добу на п/ф був поданий природний газ. На даному етапі почав формуватися газорозподіл в стовпі шихти і відповідний загальний та верхній і нижній перепади тисків на ДП (рис. 6.3). Верхній перепад тиску на ДП №3

почав формуватися на четверту добу від початку задувки печі і на сьому добу досяг $\sim 0,17\text{--}0,19$ кгс/см². У міру збільшення кількості завантаженої шихти та рудного навантаження і формування стійкого газорозподілу в стовпі шихти верхній перепад тиску встановився на рівні $0,12\text{--}0,15$ кгс/см².

Швидкість збільшення температури колошникового газу в період роздувки ДП почала значно підвищуватися після прогріву всього стовпа коксу, зважаючи на малу кількість рудної складової задувочної шихти. Значне її збільшення компенсувалося опусканням в піч подач і збільшенням рудного навантаження (рис. 6.3). Мала швидкість дуття на п/ф при подачі через них природного газу, поряд із загальним збільшенням опору шихти при збільшенні рудного навантаження, як і слід було очікувати, викликала перетікання пічних газів до периферії і збільшення протяжності по висоті високотемпературної периферійної зони і підвищення температури периферійних газів на колошнику (рис. 6.3).

Після початку сходу шихти при завантаженні ДП №5 у роздувочний період, в якості залізорудної шихти застосовувався агломерат місцевої аглофабрики зі зниженою, щодо звичайної, основністю (CaO/SiO_2), а як флюс і шлакоутворюючий матеріал – гранульований шлак. Після першого тижня роздувки, в залізорудну частину шихти почали вводити окатиші в кількості до 20% і шлак конвертерного виробництва в якості флюсу. На ДП №5 використовувалася традиційна в таких випадках система завантаження $\text{KPPK} \downarrow 3,5 \rightarrow \downarrow 1,7$ м. Шихтові матеріали задувочної шихти і використані протягом перших семи діб забезпечили вихід шлаку більше 1 т/т чавуну. Як видно з рис. 6.3 ДП №5 вже на другу добу почала «брати» до 20 подач в зміну (8 годин) при рудному навантаженні $\sim 1,2$ т/т. Після підвищення тиску дуття під колошником сход шихти в третю-четверту добу трохи сповільнився, після чого інтенсивність подач почала зростати на ~ 12 подач/зміну, рудне навантаження при цьому теж збільшували до 2,7 т/т. Відсутність достатньої кількості рудної сировини позбавила змоги надалі збільшувати інтенсивність плавки, рудне навантаження при цьому було близьке до робочого значення і становило $\approx 3,2\text{--}3,4$ т/т.

На початковому періоді роздувки ДП №3 залізорудна частина шихти складалася з окатишів виробництва ПівнГЗК і агломерату місцевої аглофабрики основністю $1,11\text{--}1,33$ од в

співвідношенні 50/50÷70/30%. В якості флюсу і шлакоутворюючої складової використовувався гранульований доменний шлак в невеликій кількості, в подальшому – шлак конвертерного виробництва. Протягом початкового етапу роздувочного періоду використовувалася, розроблена авторами книги, програма завантаження, що характеризується зменшенням, порівняно з базовою програмою, рудним навантаженням в периферійній зоні ДП для забезпечення помірно розвинутого периферійного газорозподілу.

В кінці листопада 2014 р. у складі шихти було використано більше 50% окатишів в суміші з агломератом, для мінімізації концентрації окатишів у пристінній та центральній зонах печі авторами книги було рекомендовано зміни програми завантаження з дотриманням основних положень розроблених раніше підходів до вибору раціональних режимів завантаження при зміні компонентного складу шихти [53, 92, 104, 105, 138–140]. Розподіл рудних навантажень по радіусу печі для трьох використаних варіантів програми завантаження роздувочного періоду представлено на рис. 6.4. Для порівнянності трьох використаних варіантів програми завантаження, на рис. 6.4 прийнято однаковою середнє рудне навантаження.

Через знижений рівень інтенсивності задувки, нарощування газодуттєвих параметрів в перший тиждень від початку задувки здійснювалося в міру опускання шихти, інтенсивність плавки становила 2–3 подачі за зміну (рис. 6.3). У наступні п'ять діб, у міру інтенсифікації процесів, приріст становив близько 9 подач за зміну і на протязі 10–15 діб від початку задувки досяг, в середньому, 35 подач/зміну. Рудне навантаження збільшували в темпі з іншими параметрами і необхідністю підтримки підвищеного нагріву чавуну. Воно збільшувалось від ~ 1 т/т в перших подачах до $\sim 3,2$ т/т на 12-у добу від початку задувки печі, приріст рудного навантаження склав $\approx 0,25$ т/т на добу (рис. 6.3).

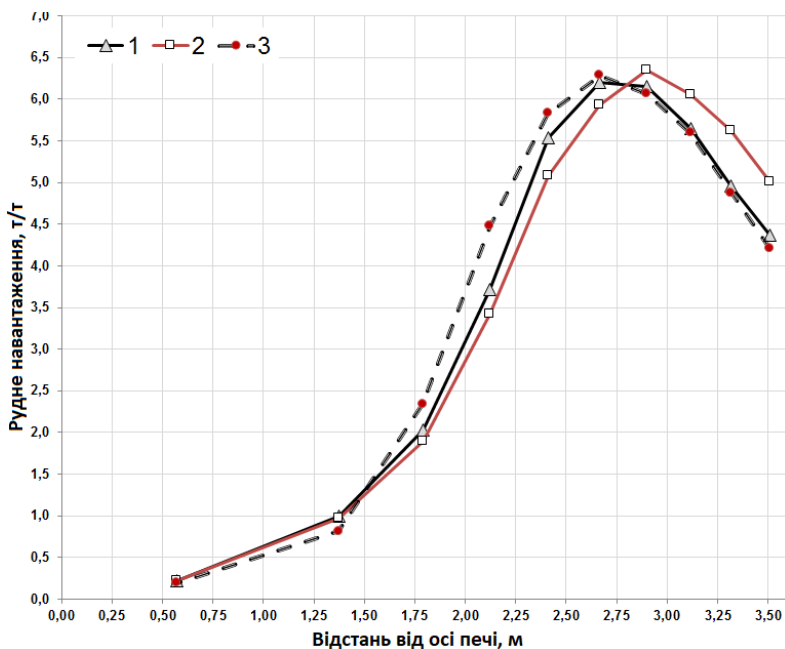


Рис. 6.4. Розподіл рудних навантажень по радіусі ДП для 3-х варіантів використаних програм завантаження: 1 — із «розвантаженою» периферією, 2 — робочої (базової) і 3 — зі збільшеною часткою окатишів

6.2.5. Склад продуктів плавки в період задувки ДП

На ДП №5 18.10.2014 р. (через ~ 30 годин від початку задувки) видали перші випуски шлаку загальною масою 202,38 т. Основність першого шлаку становила 0,83 од, вміст оксидів магнію і заліза 3,31 та 9,29%, відповідно. У наступну добу було проведено п'ять випусків, 250,57 т шлаку і 2 канави чавуну, хім. склад першого чавуну наступний: $[Si] = 3,01\%$, $[Mn] = 0,33\%$, $[S] = 0,3\%$, $[C] = 2,53\%$, $[Ti] = 0,12\%$. 20.10.2014 р. був злитий перший чавун у чавуновізний ківш. Середньодобові дані хім. аналізів продуктів плавки наведені в табл. 6.2.

З огляду на подальші невизначені обставини і перебої з поставками сировини, щоб уникнути непідготовлених

зупинок, ДП в цей період перевели на чавун з вмістом кремнію в чавуні близько 1,0–1,2%. Підвищений тепловий резерв горна печі дозволив, після прогріву і плавлення «козлових» мас, прискорити гідравлічне оновлення в «мертвому шарі» і інтенсифікувати нагрів футерівки по всій її товщині.

Таблиця 6.2. Середньодобовий склад продуктів плавки на ДП №5 в період задувки після тривалої стоянки 16.10–05.11.2014 р.

Дата	[C]	[Si]	[Mn]	[S]	[P]	Вихід чавуну, т/доб	Вихід шлаку, т/доб	Вихід шлаку, кг/т
16–17. 10	–	–	–	–	–	0	0	–
18.10	–	–	–	–	–	1-канавка	202	–
19.10	3,35	5,18	0,42	0,18	0,27	2-канавка	251	–
20.10	3,07	5,77	0,72	0,104	0,212	3-канавка +30 т	203	2256
21.10	3,38	5,23	0,60	0,112	0,166	211	247	1173
22.10	3,69	4,58	0,60	0,059	0,140	799	459	784
23.10	4,10	2,50	0,83	0,069	0,134	1097	538	1185
24.10	4,24	1,83	0,74	0,045	0,129	1576	582	490
25.10	4,27	1,56	0,63	0,046	0,087	831	256	308
26.10	4,06	0,91	0,59	0,046	0,154	1768	644	364
27.10	4,37	1,23	0,69	0,026	0,086	1000	246	246
28.10	4,36	1,26	0,67	0,030	0,084	1270	361	284
29.10	4,31	1,16	0,57	0,034	0,086	1081	311	288
30.10	4,31	1,44	0,43	0,033	0,059	1034	362	350
31.10	4,43	1,29	0,56	0,030	0,096	804	294	365
01.11	4,27	1,27	0,86	0,032	0,078	940	320	340
02.11	4,27	1,27	0,86	0,032	0,078	940	320	340
03.11	3,73	1,19	0,55	0,106	0,094	1052	425	404
04.11	3,84	0,66	0,69	0,076	0,131	1120	411	367
05.11	3,95	1,20	0,63	0,061	0,094	1710	496	290

На ДП №3 14.11.2014 р. (понад 60 годин від початку задувки) видали перші два випуски шлаку. У наступну добу до появи чавуну було проведено ще чотири випуски шлаку. 16.11.2014 р. був злитий перший чавун у чавуновізний ківш. Середньодобові хім. склади продуктів плавки в наступному періоді були близькі до ДП №5. У роздувочному періоді перший чавун був хімічно досить прогрітий, вміст [Si] у перші

три доби на обох печах витримувався більше 5%, потім 2–3 доби вміст кремнію становив понад 2%. Надалі для підтримки підвищеного теплового стану ДП вміст $[Si]$ в чавуні витримували на рівні 1,0–1,25%. З початку грудня 2014 р. ситуація з поставками сировини і відвантаженням продукції на підприємстві стабілізувалася і на ДП почали збільшувати виробництво, вміст $[Si]$ при цьому знизився до $\sim 0,65\%$.

6.3. Основні технологічні вимоги до задувки доменної печі після її тривалої зупинки

На підставі позитивного досвіду задувок доменних печей Єнакієвського металургійного заводу після тривалої понад нормативної стоянки без випуску «козлового» чавуну і вигрібання матеріалів з печі, сформульовані наступні основні вимоги до задувки [112, 127, 134]:

1. Зменшене, в порівнянні з традиційним, рудне навантаження на об'єм задувочної шихти ($\sim 0,10\text{--}0,15\text{ т/т}$).
2. Використання в шихті першого об'єму і перших робочих шихт легкоплавких матеріалів невисокої основності (наприклад, доменний шлак 50–100%, плавиковий шпат в перших шихтах), в тому числі, передбачити можливість подачі легкоплавких матеріалів через повітряні фурми.
3. Секторна «лобова» задувка з боку розташування чавунної льотки на малій кількості повітряних фурм (на початку задувки 1–2 фурми), забезпечення до початку задувки впевненого прогріву по висоті льотка-повітряна фурма, шляхом установа в чавунну льотку труб, через які подається природний газ і повітря для його горіння, забезпечення швидкості потоку дуття на виході з повітряної фурми не менше 150 м/с.
4. Низька інтенсивність нарощування газодуттєвих параметрів на початковому етапі задувки (витрата 1,0 м³ дуття/м³ об'єму на 5–7 добу та нарощування до 1,6–1,8 м³ дуття/м³ об'єму через 10–15 діб).
5. Низька інтенсивність відкриття повітряних фурм в одному секторі (по 1–2 фурми на добу до досягнення 50% відкритих фурм через 7–10 діб) та перехід до

секторного окружного відкриття фурм до досягнення 75% відкритих фурм, тривалістю 3–5 діб при забезпеченні нарощування кількості проплавляємої шихти і газодинамічних параметрів дуття.

6. Зменшене, в порівнянні з прийнятим, рудне навантаження перших робочих шихт при пониженому вмісті заліза в шихті (1,0–1,5–2,0 т/т, що забезпечує утримання $[Si]$ в чавуні $\sim 5,0\%$ в перші три доби, перехід на ливарний чавун в наступні 2–4 доби).

Заходи, виконані перед і в процесі задувок доменних печей Єнакієвського металургійного заводу після тривалої стоянки сприяли виведенню печей на задані планово-економічні показники, забезпечили при цьому збереження вогнетривкої футерівки, конструкцій і обладнання. На підставі наведених основних положень задувок з урахуванням підготовчих заходів і технологічних особливостей розроблено регламент задувок доменних печей після тривалих зупинок без попереднього випуску «козлового» чавуну, які внесені доповненням в технологічну інструкцію по доменному виробництву.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

В останні роки доменне виробництво України знаходиться в умовах постійного зниження собівартості виплавки чавуну, яке здійснюється шляхом використання низькоякісних залізорудної сировини і коксу, а також при практично повній відмові від коштовного природного газу з переходом на технологію вдування пиловугільного палива (ПВП). В окремі періоди роботи доменних печей, у випадках зниження інтенсивності плавки, переходять на технологію без природного газу та ПВП із зволоженням дуттям, яка сприяє суттєвій витраті коксу на виплавку чавуну. Крім цього, у зв'язку з перебоями поставок сировини, доменні печі вимушено зупиняють на термін, що перевищує регламентований. Це вимагає вдосконалення технологічних рішень, спрямованих на підготовку печей до консервації і подальшу безаварійну задувку.

Данна книга присвячена удосконаленню діагностики і управління доменною плавкою в сформованих змінних шихтових і паливних умовах, а також в перехідні періоди роботи доменних печей Єнакієвського металургійного заводу. Використання представлених в книзі нових підходів до управління плавкою дозволило отримати високі техніко-економічні показники в сучасних умовах виробництва чавуну. Необхідною умовою розробки нових методів діагностики і управління стало оснащення доменних печей заводу сучасними засобами контролю процесів: стаціонарними термозондами, термопарами футерівки шахти, розпару та заплечиків, тощо, на підставі інформації яких встановлені нові залежності і зв'язки, що пояснюють протікання в об'ємі доменної печі різних процесів.

В книзі представлені результати, виконаних перед пуском сучасної доменної печі після її реконструкції, досліджень параметрів потоків шихтових матеріалів, що завантажуються в піч за допомогою безконусного завантажувального пристрою (БЗП), розподілу маси порцій і їх компонентів на колошнику, визначені витратні характеристики шихтового затвору бункера БЗП, а також представлені результати досліджень формування профілю поверхні засипу шихти, гранулометричного і компонентного складів шару залізовмісних матеріалів по радіусу колошника.

Виконаний комплекс досліджень дозволив після задувки печі визначити і реалізувати режими роботи механізмів БЗП, необхідні для ефективного застосування раціональних програм завантаження доменної печі.

Розроблено та реалізовано на доменній печі модельну систему для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження, що дозволяє технологічному персоналу приймати адекватні управляючі рішення по зміні режимів завантаження печі. Крім основної функції, використання системи націлене було також на навчання персоналу в умовах освоєння нового завантажувального пристрою.

В умовах нестабільної якості шихтових матеріалів розроблено новий підхід до вибору раціональних програм завантаження БЗП, заснований на зменшенні кількості робочих кутових положень лотка і зміщенні від порції до порції в рамках циклу завантаження максимумів рудного навантаження уздовж радіуса колошника. Позитивний досвід реалізації такої програми завантаження показаний на прикладі ДП №3 Єнакієвського металургійного заводу, де понад трьох років (з 2013 р.) вона з деякими коригуваннями використовувалася і забезпечувала поряд з іншими заходами високі техніко-економічні показники. На підставі запропонованого підходу були також розроблені та реалізовані варіанти програми завантаження для роздувочного періоду печі і для режимів роботи з високим вмістом окатишів в складі шихти.

Представлено досвід вибору раціональних кутів нахилу розподільного лотка БЗП при зміні конфігурації його футерівки. Розроблено заходи з оперативного управління периферійним газовим потоком, в тому числі, при переході на технологію вдування ПВП. Розроблено та реалізовано рекомендації з управління окружним розподілом шихтових матеріалів на ДП, які дозволили зменшити нерівномірність температур футерівки верхніх горизонтів шахти доменної печі. Сформульовані і внесені доповненням в технологічну інструкцію по доменному виробництву вимоги до програми завантаження задувочної шихти після проведення капітального ремонту з шоткретуванням шахти.

Розроблено вимоги до розподілу газового потоку по радіусу печі, необхідні при його регулюванні в умовах

вдування в горн ПВП для досягнення заданих або високих техніко-економічних показників плавки. Показано, що при управлінні газорозподілом по радіусу печі при вдуванні в горн ПВП необхідно забезпечити достатню газопроникність периферійної зони, не допускаючи зайвого навантаження її залізородними матеріалами, забезпечити розвинений центральний газорозподіл з одночасним розвиненим взаємним перетіканням газів між периферією і центром, при розвиненому центральному газорозподілі, для підвищення економічності плавки, необхідно забезпечити вузьку осьову коксову віддушину.

Освоєння технології вдування ПВП на досліджуваних ДП в змінних шихтових умовах і з роботою на коксі зниженої якості при використанні раціональних режимів завантаження, формування порцій і раціонального шлакового режиму дозволило у 2016 р. довести витрату ПВП, в середньому, до 130 кг/т чавуну. Оперативний контроль показань термопар футерівки дозволив своєчасно здійснювати як гарнісажеутворюючі заходи, так і коригувати розподіл компонентів шихтових матеріалів по радіусу і окружності печі. Реалізація змін програми завантаження, згідно до розроблених вимог і режиму формування порцій, дозволила при роботі ДП без футерівки на початковому етапі освоєння ПВП знизити температури периферійного газового потоку по всій висоті печі, в середньому, на 13% і зменшити окружну нерівномірність температур на 11%. Використання в технології раціональних режимів завантаження при вдуванні ПВП дозволило до шоткретування забезпечити експлуатаційну стійкість системи охолодження і безаварійну роботу ДП.

В результаті досліджень встановлено відсутність впливу на характер розподілу температур газового потоку над поверхнею засипу по радіусу печі температури доменної шихти при її завантаженні, як в цілому, так і в окремих зонах перерізу печі по радіусу, температури газового потоку збільшуються пропорційно збільшенню кількості гарячого агломерату у складі шихти. Отримані результати дозволяють використовувати інформацію термозондів для управління завантаженням при різному компонентному складі шихтових матеріалів.

Розроблено температурні показники розподілу газового потоку по радіусу доменної печі. Показники характеризують

чотири основні характеристики температури газового потоку над поверхнею шихти: інтенсивність периферійного газового потоку, інтенсивність осьового газового потоку, газопроникність проміжної зони, ширину осьової коксової віддушини. Для доменних печей з безконусним і з конусним завантажувальним пристроєм встановлені їх оптимальні діапазони зміни при роботі доменних печей в різних газодинамічних і паливних умовах: при роботі з використанням в дутті збільшеної кількості водяної пари (на т.зв. «безгазовій шихті»), з природним газом, з природним газом та ПВП, окремо з ПВП. Для доменних печей з БЗП і з КЗП розроблений і пройшов дослідно-промислове випробування експертний модуль системи контролю температур газового потоку (системи термозондів) над поверхнею шихти в доменній печі, що генерує коригувальні дії режиму завантаження при виході показників розподілу температур за оптимальний діапазон їх зміни.

Виконано аналіз динаміки зміни температур футерівки заплечиків, розпару і шахти ДП за п'ять років її експлуатації – з грудня 2011 р. по вересень 2016 р. В результаті аналізу зміни температур футерівки виявлені технологічні чинники, що впливають на середньомісячні значення температури футерівки ДП. Так, на температури футерівки верхньої зони в більшій мірі впливає знос футерівки, на температури футерівки нижньої зони – формування стійкого гарнісажу. Встановлено фактори, що впливають на зміну середньоквадратичних відхилень температур футерівки по окружності печі: якість залізovмісних матеріалів і коксу, програма завантаження печі і режим формування порцій, захаращення горна і використання промивних матеріалів, параметри дуттєвого режиму з використанням різних паливних добавок, знос футерівки.

Визначено граничні значення середньомісячних температур, які свідчать про частковий (~50%) або повний знос футерівки шахти, а також граничні значення температур нижньої зони печі, які характеризують наявність стійкого гарнісажу. Встановлено, що середньомісячна температура футерівки середини і верху шахти – 375–400 °С свідчить про її знос на ~50% (підтверджено геодезичними вимірюваннями двічі – в середині 2013 р., та на початку 2016 р.), потім руйнування футерівки сповільнюється. При перевищенні

середньомісячною температурою значення 450 °С, як показали дві кампанії ДП, футерівка середини і верху шахти повністю відсутня. При середньомісячній температурі футерівки низу шахти, розпару та заплечиків – 300 °С має місце утворення в нижній зоні печі нестійкого гарнісажу, що вимагає прийняття рішень щодо коригування складу і режиму формування порцій шихти. Перевищення температурою футерівки нижньої зони значення 350 °С свідчать про повну відсутність захисного гарнісажу та (або) футерівки.

Виконано аналіз зміни температур, що реєструються термopаpами футерівки шахти в періодах роботи доменної печі при практично повному зносі футерівки. Дана температура була ідентифікована як температура периферійного газового потоку і аналіз її зміни було виконано при роботі доменної печі в різних газодинамічних і паливних умовах: на «безгазовій шихті», з природним газом, з природним газом і ПВП, з ПВП. У досліджуваних різних газодинамічних і паливних умовах визначено екстремум кривої зміни температури периферійного газового потоку в нижній частині доменної печі, який обґрунтовано прийнятий за положення кореня зони в'язко-пластичного стану.

Розроблено та реалізовано у складі АСУ систему моніторингу теплового стану шахти ДП. З використанням інформації системи розроблений і випробуваний метод обґрунтованого вибору розташування закритих повітряних фурм або фурм різного діаметру з використанням інформації про зміну температур футерівки по висоті і окружності доменної печі. У досліджуваних періодах роботи ДП, при використанні методу, в результаті зміни розташування закритих фурм зменшилися як окружна нерівномірність температур футерівки, так і середні значення температур, що обумовлено перерозподілом інтенсивності газового потоку. Крім того, в результаті використання запропонованого методу перерозподіл газового потоку сприяв зменшенню питомої витрати коксу на 1,7% при практично незмінних витратах ПВП і коксового горіха, температури дуття, а також якісних та кількісних характеристик залізорудної сировини та коксу.

Встановлено, що зміни температури футерівки і тіла холодильників ДП свідчать про зміну напрямку руху газового потоку в стовпі шихти по радіусу і окружності печі при істотних відхиленнях в процесі плавки і при зміні опору

стовпа шихтових матеріалів. Встановлено також, що зниження інтенсивності плавки і погіршення якості шихтових матеріалів при збільшенні частки окатишів в залізорудній частині шихти призводять до збільшення висоти і протяжності зони високих температур, яка характеризує стан кореня зони в'язко-пластичного стану.

На підставі позитивного досвіду задувок доменних печей Єнакієвського металургійного заводу після тривалої, понад нормативної, стоянки розроблено регламент задувок доменних печей після тривалих зупинок без попереднього випуску «козлового» чавуну і вигрібання матеріалів з печі. Регламент внесено доповненням в технологічну інструкцію по доменному виробництву. Заходи, виконані перед і в процесі задувок доменних печей заводу після тривалої стоянки сприяли виведенню печей на задані планово-економічні показники, забезпечили при цьому збереження вогнетривкої футерівки, конструкцій і обладнання.

Таким чином, інформація, отримана за допомогою термозондів, термопар футерівки, інших засобів контролю, а також при проведенні передпускових досліджень і дослідно-промислового використанні результатів може бути використана при адаптації математичних моделей до умов реальних об'єктів. Представлені в книзі результати досліджень відкривають перспективи розширення ефективного використання інформації сучасних засобів контролю в прийнятті обґрунтованих управляючих впливів на хід доменної плавки з метою мінімізації енерговитрат на виплавку чавуну при роботі печей в змінних сировинних і паливних умовах.

В даний час, дослідження по представленому в книзі спектру напрямків тривають. Здійснюється вибір раціональних режимів завантаження доменних печей з використанням в технології плавки промивок коксової насадки при вдуванні в горн ПВП в кількості 140–170 кг/т чавуну. Виконуються дослідження параметрів дугтя по повітряним фурмам з подальшою реалізацією раціонального розподілу теоретичної температури горіння по окружності печі створенням спрямованої нерівномірності розподілу ПВП. Розвиток комплексу описаних досліджень дозволить поглибити і розвинути знання про взаємозв'язок параметрів, що визначають ефективність роботи доменних печей.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ⁹

1. Большаков В.И. Применение в Украине технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2011. – Вып. 23. – С. 30–36.
2. Филатов Ю.В., Емченко А.В., Попов В.Е. и др. Совершенствование и повышение эффективности доменной технологии на основе применения пылеугольного топлива (ПУТ) / Металл и литье Украины. – 2011. – № 9–10. – С. 11–15.
3. Aydeev R.V., Kryachko G.Yu. Using Coal-dust Fuel in Blast Furnaces with Unstable Batch Quality / Steel in Translation, 2011. – Vol. 41. – No. 3. – pp. 215–220. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S096709121103003X.
Авдеев Р.В., Крячко Г.Ю. Опыт использования пылеугольного топлива в нестабильных сырьевых условиях доменной плавки / Сталь. – 2011. – № 3. – С. 4–8.
4. Naboka V.I., Fomenko A.P., Safonov S.E. et al. Pulverized-coal injection in blast furnaces at OAO Zaporozhstal' / Steel in Translation, 2013. – Vol. 43. – No. 10. – pp. 647–651. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091213100082.
Набока В.И., Фоменко А.П., Сафонов С.Е. и др. Освоение технологии вдувания пылеугольного топлива в доменном цехе ОАО «Запорожсталь» / Сталь. – 2013. – № 10. – С. 8–11.
5. Зинченко Ю.А., Струтинский В.А. Освоение технологии вдувания пылеугольного топлива при производстве чугуна на ПАО «ММК им. Ильича» / Металл и литье Украины. – 2013. – № 10. – С. 11–14.
6. Кузнецов М.С., Крячко Г.Ю., Валуева Н.Н., Лебедь Ю.К. Изменение свойств шлака и нагрева чугуна при вдувании природного газа и пылеугольного топлива в горн доменной печи / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – № 4 – С. 3–7.
7. Пинчук Д.В., Оторвин П.И., Романчук А.В. и др. Опыт внедрения и пути решения проблем освоения технологии вдувания ПУТ на доменной печи объемом 5000 м³ / Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти. Наукові праці всеукраїнської науково-технічної конференції, присвяченої 100-річчю з дня народження Г.Г. Єфіменка. – Дніпро: Літограф, 2016. – С. 122–128.

⁹ Виділені статті опубліковані за матеріалами книги.

Основні матеріали книги опубліковані у 34 статтях, з яких, 10 англomовних статей у виданнях, що входять в міжнародні наукометричні бази даних «Scopus» та «Web of Science»:

2 – Metallurgical and Mining Industry (Україна) – 2012, 2013 pp.,
4 – Metallurgist (США) – 2013, 2015, 2017, 2018 pp.,
4 – Steel in Translation (Велика Британія) – 2017 p.

8. **Podkorytov A.L., Kuznetsov A.M., Zubenko A.V. et al. Introduction of Pulverized-Coal Injection at Yenakiieve Iron and Steel Works / Steel in translation, May 2017, volume 47, issue 5, pp. 313–319. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091217050102.**
Подкорытов А.Л., Кузнецов А.М., Зубенко А.В. и др. Особенности освоения технологии вдувания пылеугольного топлива на ЕМЗ / Сталь – 2017. – № 5. – С. 2–8.
9. **Можаренко Н.М., Семенов Ю.С., Горупаха В.В., Шумельчик Е.И. Особенности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива / Металлургическая и горнорудная промышленность, 2017. – № 5 – С. 2–9.**
10. Большаков В.И. Технология высокоэффективной энергосберегающей доменной плавки / К.: Наук. думка. – 2007. – 412 с.
11. Большаков В.И. Теория и практика загрузки доменных печей / М.: Металлургия. – 1990. – 256 с.
12. Большаков В.И., Покрышкин В.Л., Шутылев Ф.М. Совершенствование способов загрузки доменных печей в СССР и за рубежом / Институт «Черметинформация». – М. – 1983. – Обзорная информация. Серия «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна». – Вып.2. – 32 с.
13. Большаков В.И., Покрышкин В.Л., Шутылев Ф.М. Оптимизация программ загрузки доменной печи лотковым распределителем / Сталь. – 1985. – №9. – С. 16–20.
14. Большаков В.И., Зарембо А.Ю. Траектории движения шихты в колошниковом пространстве современной доменной печи / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 1985. – № 20 (1000). – С. 35–37.
15. Большаков В.И., Зарембо А.Ю. Особенности истечения шихтовых материалов из бункера БЗУ / Металлургия и коксохимия. К.: Техника. – 1985. – Вып. 88. – С. 31–34.
16. Большаков В.И., Зарембо А.Ю. Влияние уровня загрузки на распределение шихты в доменной печи / Вопросы теории и практики производства чугуна. Тр. ИЧМ. М.: Металлургия. – 1986. – С. 70–75.
17. Большаков В.И., Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Вишняков В.И. Технологическое обоснование эффективности загрузки многокомпонентных смешанных порций шихтовых материалов в доменную печь / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2012. – Вып. 25. – С. 103–122.
18. Большаков В.И., Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Вишняков В.И. Исследование и промышленное опробование загрузки многокомпонентных смешанных порций, состоящих из железорудных материалов и кокса / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии» 2013. – Вып. 27. – С. 53–67.

19. Большаков В.И., Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Вишняков В.И. Методика определения рациональных параметров формирования железорудных смешанных порций при загрузке шихтовых материалов в доменную печь / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – № 5 – С. 83–88.
20. Vashchenko S.V., Khudyakov A.Yu., Baiul K.V., Semenov Yu.S. Selecting the Batch Composition in Briquetting / *Steel in Translation*, 2018. – Vol. 48, No. 8, pp. 509–512. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091218080132.
Ващенко С.В., Худяков А.Ю., Баюл К.В., Семенов Ю.С. Разработка научно-методического подхода к выбору состава брикетизируемой шихты и ее свойств / Сталь. – 2018. – № 8. – С. 2–6.
21. Маймур Б.Н., Худяков А.Ю., Петренко В.И. и др. Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия» – 2016. – №1. – С. 74–82.
22. Ivancha N.G., Murav'eva I.G., Shumel'chik E.I. et al. Complex Mathematical Model of the Distribution of Multicomponent Charge in a Blast Furnace / *Metallurgist*, May 2018, Volume 62, Issue 1–2, pp. 95–100. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/s11015-018-0630-1.
Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Шумельчик Е.И. и др. Комплексная математическая модель распределения многокомпонентной шихты в доменной печи / Металлург. – 2018. – № 2. – С. 9–14.
23. Грузинов В.К. Управление газовым потоком в доменной печи программной загрузкой / Сverdlovsk: Metallurgizdat, 1960. – 216 с.
24. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса / М.: Металлургия, 1990. – 216 с.
25. Большаков В.И., Шулико С.Т., Шутылев Ф.М. и др. Пути улучшения распределения дугтя в доменной печи / *Сталь*. – 2006. – №5. – С. 11–14.
26. Большаков В.И., Шутылев Ф.М. Рациональный режим работы вращающегося распределителя шихты бесконусного загрузочного устройства / *Сталь*. – 1993. – №3. – С. 17–20.
27. Шумилов К.А., Богаенко И.М. и др. АСУ тепловыми и газодинамическим режимами доменной плавки / К.: Техника. – 2000. – 228 с.
28. Большаков В.И., Рослик Н.А. Исследование неравномерности окружного распределения материалов в доменной печи лотковым распределителем / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1997. – №1. – С. 10–12.
29. Большаков В.И., Богачев Ю.А., Бузовера М.Т. Управление окружным распределением в доменной печи / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии» – К.: Наук. думка. – 1999. – Вып. 3. – С. 58–63.
30. Ковшов В.Н., Чистяков В.Г., Зозуля Г.С. Исследование окружного распределения шихты бесконусным засыпным устройством с вращающимся лотком / *Металлургия и коксохимия*. – К.: Техника. – 1979. – № 62. – С. 34–37.

31. Сторожик Д.А., Зозуля Г.С., Сергиенко В.Д. О критериях оценки окружного распределения шихты / *Металлургия и коксохимия*. – К.: Техника. – 1978. – № 59. – С. 34–38.
32. Bol'shakov V.I., Shuliko S.T., Kanaev V.V. et al. Investigation of gas distribution in a large-volume blast furnace / *Steel in Translation*, 1999. – Vol. 29, No. 12, pp. 1–5. ISSN: 09670912.
Большаков В.И., Шулико С.Т., Канаев В.В. и др. Исследование распределения дутья в доменной печи большого объема / Сталь. – 1999. – № 12. – С. 5–8.
33. Большаков В.И. Оценка распределения шихты ротором при загрузке доменной печи перед задувкой / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2000. – №1. – С. 68–72.
34. Большаков В.И., Шулико С.Т., Лебедь В.В. и др. Распределение дутья по окружности в доменной печи объемом 5000 м³ при ее работе и выдувке / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – №2. – С. 10–13. ISSN: 05435749.
35. Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Шулико С.Т. Оценка окружного распределения шихты в доменной печи радиолокационным профиломером / *Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. – Вып. 17. – 2008. – С. 74–85.
36. Большаков В.И., Шулико С.Т., Листопадов В.С. Взаимосвязь распределения шихты и дутья в доменной печи объемом 5000 м³ / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. – №6. – С. 3–8.
37. Boranbaev B.M., Bol'shakov V.I., Koshelnikov A.V., Kadochnikov P.Yu. Comparative Analysis of the Burden Distribution Patterns as Executed by Charging of various Designs / *ISS Tech*, 2003. Conference Proceedings, Indianapolis, Publ. of the Iron and Steel Society. – 2003. – P. 131–139.
38. Семенов Ю.С. Совершенствование управления доменной плавкой на основе контроля поверхности засыпи шихты / *Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук*. – Днепропетровск, ИЧМ НАН Украины. – 2009. – 192 с.
39. Галаганов А.И. Исследование изменения окружной неравномерности распределения шихты при загрузке в доменную печь / *Металлургия и коксохимия*. – К.: Техника. – 1979. – № 62. – С. 37–41.
40. Коробов И.И., Ковшов В.Н., Котов К.И. и др. Влияние равномерного распределения гранулометрического состава шихты по окружности колошника на работу доменной печи / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1968. – № 5. – С. 1–4.
41. Патент України UA 88848 C2 на винахід. Спосіб керування окружним розподілом шихтових матеріалів на колошнику доменної печі / В.І. Большаков, Ф.М. Шутилев, І.Г. Муравйова, Ю.С. Семенов – заявл. 29.09.08; опубл. 25.11.09, Бюл. № 22, 2009 р.

42. Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С. Применение радиолокационных систем измерения поверхности засыпи шихты для контроля и управления доменной плавкой / Днепропетровск: Пороги. – 2013. – 364 с.
43. Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Белошапка Е.А. Новые критерии оценки процессов доменной плавки. Сообщение 2. Критерии оценки газодинамического режима доменной плавки и эффективности осевой коксовой отдушины / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2016. – № 7. – С. 39–44. ISSN: 0135-5910.
44. Большаков В.И., Лебедь В.В., Жеребецкий А.А. Исследование влияния распределения шихты на радиальное распределение газового потока в верхней части доменной печи / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Вып. 23. – 2011. – С. 63–69.
45. Большаков В.И., Иванча Н.Г., Муравьева И.Г. и др. Реконструкция и освоение системы загрузки доменных печей / Бюллетень НТЭИ «Черная металлургия». Серия «Аглодоменное производство». – 2005. – 56 с.
46. **Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. Использование информации о температуре над поверхностью засыпи шихты для контроля доменной плавки / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2015. – № 3 – С. 2–7.**
47. Брусов А.Л., Баланова Н.Г., Бориславский Б.Е. и др. Работа стационарных охлаждаемых термозондов и компьютерной информационной системы для контроля за распределением температуры по диаметру колошника на доменных печах "Запорожстали" / Производство чугуна на рубеже столетий: труды V междунар. конгр. доменщиков. – Днепропетровск: Пороги. – 1999. – С. 405–407.
48. Parshakov V.M., Takhautdinov R.S., Bodyaev Y.A. et al. Multipoint Thermal-probe Monitoring the Radial Gas Distribution in Blast Furnaces with Nonconical Charging Systems at ОАО ММК / Steel in Translation, 2009. – Vol. 39, No. 10, pp. 886–889. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091209100106.
Паршаков В.М., Тахавудинов Р.С., Бодяев Ю.А. и др. Контроль радиального газораспределения в оборудованных БЗУ доменных печах ММК с помощью многоточечных термозондов / Сталь. – 2009. – № 10. – С. 16–19.
49. Третяк А.А., Паршаков В.М., Чемикосов М.В. и др. Достоверность информации о распределении газового потока по радиусу колошника доменной печи, получаемой разными способами измерений / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2016. – № 11. – С. 34–40.

50. Бориславский Б.Е., Баланова Н.Г., Бориславский А.Б. и др. Современная автоматизированная система контроля распределения температурного поля газового потока по сечению колошника над уровнем засыпи в доменной печи / Сборник трудов VI Международного Конгресса по агло-коксо-доменному производству, 20–24 мая 2013 г. – С. 331–341.
51. Брусов А.Л. Особенности использования информации о температуре газа по радиусу колошника для управления доменной печью / Металл и литье Украины. – 2012. – № 11. – С. 10–15.
52. **Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Ivancha N.G. et al. Study of the Flow of Burden Materials and their Distribution on the Furnace Top of a Modern Blast Furnace / Metallurgical and Mining Industry, 2012. – Vol. 4, No. 3, pp. 158–165. ISSN: 20760507.**
Большаков В.И., Семенов Ю.С., Иванча Н.Г. и др. Исследования параметров потока шихтовых материалов и их распределения на колошнике современной доменной печи / Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2012. – № 3. – С. 87–92.
53. **Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Gorupakha V.V. Efficient Management of the Charging of Blast Furnaces and the Application of Contemporary Means of Control Over the Variable Technological Conditions / Metallurgist, March 2018, Volume 61, Issue 11–12, pp. 950–958. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/s11015-018-0591-4.**
Семенов Ю.С. Шумельчик Е.И., Горупаха В.В. Эффективное управление загрузкой доменной печи и использование современных средств контроля в переменных технологических условиях / Металлург. – 2017. – № 11. – С. 33–39.
54. Большаков В.И., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С., Дударенко А.А. Особенности установки радиолокационных уровнемеров на доменных печах / Сталь. – 2014. – №9. – С. 9–11. ISSN: 0038-920X.
55. Муравьева И.Г., Тогобицкая Д.Н., Семенов Ю.С. и др. Интеллектуальная система поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой / Сборник научных работ «Компьютерное моделирование, анализ, управление, оптимизация». – 2017. – № 1. – С. 25–30.
56. Шюрман Э., Гуденау Г.В., Петерс К.-Х. Исследование пластичной зоны на доменной печи завода в Швейцарии / Черные металлы. – 1982. – № 6–7. – С. 9–14.
57. Шюрман Э., Гуденау Г.В., Петерс К.-Х. Динамическое изменение формы и положения пластичной зоны в доменной печи / Черные металлы. – 1982. – № 15/16. – С. 17–20.
58. Гоман С.В., Набока В.И., Фоменко А.П. и др. Влияние футеровки и системы охлаждения шахты на расход кокса и ресурс работы доменных печей ПАО «Запорожсталь» при применении пылеугольного топлива / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2017. – № 1. – С. 25–35.

59. Чайка А.Л., Лебедь В.В., Сохацкий А.А. и др. Опыт и перспективы комплексного применения систем автоматизированного контроля разгара футеровки, тепловых потерь и теплоэнергетических параметров на доменных печах / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2017. – № 3. – С. 2–9.
60. **Semenov Yu.S., Shumel'chik E.I., Gorupakha V.V. et al. Monitoring Blast Furnace Lining Condition During Five Years of Operation / *Metallurgist*, July 2017, Volume 61, Issue 3–4, pp. 291–297. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/s11015-017-0491-z.**
*Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В. и др. Контроль состояния футеровки доменной печи в течение пяти лет ее эксплуатации / *Металлург*. – 2017. – № 4. – С. 48–54.*
61. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С. *Металлургия чугуна* / М.: Академкнига. – 2004. – 774 с.
62. Товаровский И.Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки / Днепропетровск: изд. «Журфонд». – 2015. – 912 с.
63. Бабарькин Н.Н. Теория и технология доменного процесса / Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». – 2009. – 257 с.
64. Попов Е.М. Семенов Е.Ю. Оптимизация выплавки чугуна в доменных печах / М.: *Металлургия*. – 2007. – 365 с.
65. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. *Общая металлургия* / М.: *Металлургия*. – 2004. – 768 с.
66. **Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V. et al. Using Thermal Probes to Regulate the Batch Distribution in a Blast Furnace with Pulverized-Coal Injection / *Steel in Translation*, 2017. – Vol. 47. – No. 6. – pp. 389–393. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091217060092.**
*Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В. и др. Управление распределением шихтовых материалов в доменной печи при вдувании ПУТ с использованием информации термозондов / *Сталь*. – 2017. – № 6. – С. 7–11.*
67. Bol'shakov V.I., Gladkov N.A., Shuliko S.T., Shutylev F.M. Distribution of Batch Materials in Blast Furnace / *Steel in Translation*, 2002. – Vol. 32. – No. 12. – pp. 11–17. ISSN: 09670912.
*Большаков В.И., Гладков Н.А., Шулико С.Т., Шутылев Ф.М. Исследование теоретических основ распределения шихтовых материалов в доменной печи / *Сталь*. – 2002. – № 12. – С. 5–10.*
68. Большаков В.И., Покрышкин В.Л. Освоение доменных печей, оснащенных при реконструкции БЗУ / *Сталь*. – 1989. – № 11. – С. 8–13.
69. Гришкова А.А., Френкель М.М., Вегман Е.Ф. Управление загрузкой доменных печей / М. 1981. – 26 с. (Черная металлургия. Сер. Автомат. мет. пр-ва. Обз.инф. Черметинформация. Вып. 4).
70. Большаков В.И., Шутылев Ф.М., Праздников А.А. и др. Диагностика состояния оборудования бесконусного загрузочного устройства доменной печи / *Металлургия и коксохимия*. – К.: Техника. – 1987. – Вып. 93. – С. 16–21.

71. Большаков В.И. Диагностика оборудования систем загрузки доменных печей / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 1987. – № 1. – С. 54–55.
72. Bol'shakov V.I., Varivoda I.E., Roslik N.A., Shutylev F.M. Calculating indices of circumferential displacement of the charge flow for loading with a chute distributor / *Steel in Translation*, 1996. – Vol. 26, No. 1, pp. 7–11. ISSN: 09670912.
*Большаков В.И., Варивода И.Е., Рослик Н.А., Шутылев Ф.М. Расчет показателей окружного распределения смещения потока шихты при загрузке лотковым распределителем / *Сталь*. – 1996. – №1. – С. 13–15.*
73. Большаков В.И., Варивода И.Е., Рослик Н.А., Шутылев Ф.М. Влияние движения шихты по трактам загрузочного устройства на окружное распределение шихты / *Тр. ИЧМ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. К.: Наукова думка. – 1995. – С. 57–68.
74. Bol'shakov V.I. Control of batch distribution when using a nonconical charging unit / *Steel in Translation*, 2002. – Vol. 32, No. 4, pp. 20–27. ISSN: 09670912.
*Большаков В.И. Научное обоснование стратегии управления распределением шихты при использовании БЗУ / *Сталь*. – 2002. – №4. – С. 37–42.*
75. Большаков В.И., Зарембо А.Ю., Сало А.С. Методика расчета параметров схода шихты с распределительного лотка. / *Вопросы производства чугуна в доменных печах*. Тр. ИЧМ. – М.: Металлургия. – 1984. – С. 60–64.
76. Патент України UA 94139 C2 на винахід. Спосіб ведення доменної плавки / В.І. Большаков, Ф.М. Шутылев, М.А. Гладков, В.В. Лебідь, Ю.О. Богачов, І.Г. Муравйова – заявл. 07.07.09; опубл. 11.04.11, Бюл. № 7, 2011 р.
77. Большаков В.И., Зарембо А.Ю., Гришкова А.А. Результаты внедрения алгоритма "Траектория" в составе АСУ загрузкой доменной печи / *Автоматизация технологических процессов и управление производством в черной металлургии*. Тр. ВНИИАЧермет. М. 1987. – С. 30–33.
78. Большаков В.И., Шутылев Ф.М., Гниненко С.И. и др. Исследование работы лоткового распределителя шихты. / *Повышение эффективности работы доменных печей*. Тр. ИЧМ. – М.: Металлургия. – 1983. – С. 69–72.
79. Bol'shakov V.I., Varivoda I.E., Roslik N.A. et al. Influence of charging system design features on blast furnace charge distribution / *Steel in Translation*, 1999. – Vol. 29. – No. 1. – pp. 8–13. ISSN: 09670912.
*Большаков В.И., Варивода И.Е., Рослик Н.А. и др. Исследование влияния конструктивных особенностей загрузочных устройств на распределение шихты в доменной печи / *Сталь*. – 1999. – №1. – С. 10–14.*
80. Большаков В.И., Зарембо А.Ю., Иванча Н.Г. и др. Освоение системы загрузки современной доменной печи / *Обз. инф. Ин-т «Черметинформация»*. – М. – 1989. – 53 с.
81. Можаренко Н.М., Большаков В.И., Зарембо А.Ю. и др. Предпусковые исследования распределения материалов в доменной печи объемом 5500 м³ / *Черная металлургия. Наука–техника–производство*. Тр. ИЧМ. М.: Металлургия. – 1989. – С. 56–63.

82. Gladush V.D., Dyshlevich I.I., Bol'shakov V.I. et al. Plant trials of first Soviet bell-less charging gear, fitted on 2000 m³ blast furnace / Steel in the USSR, 1985. – Vol. 15. – No. 11. – pp. 513–518.
Гладуш В.Д., Дышлевич И.И., Большаков В.И. и др. Освоение на доменной печи объемом 2000 м³ первого отечественного бесконусного загрузочного устройства и технологии плавки с его использованием / Сталь. – 1985. – № 11. – С. 7–13.
83. **Большаков В.И., Семенов Ю.С., Иванча Н.Г. и др. Исследования параметров потока шихтовых материалов и их распределения на колошнике современной доменной печи / Сборник трудов V Международного Конгресса по агло-коксо-доменному производствам, 21–25 мая 2012 г. – С. 81–93.**
84. Bol'shakov V.I. Analysis of charging-system capacity in the reconstruction of a blast furnace / Metallurgist, February 1986, Volume 30, Issue 2, pp. 47–49. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/BF01140959.
Большаков В.И. Анализ пропускной способности систем загрузки при проектировании реконструкции доменной печи / Металлург. – 1986. – № 2. – С. 14–16.
85. Большаков В.И., Гладков Н.А., Шутылев Ф.М., Богачев Ю.А. Эффективность распределения окатышей в шихте доменных печей / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – №6. – С. 11–15.
86. Большаков В.И., Гладков Н.А., Шутылев Ф.М. Совершенствование распределения окатышей по сечению доменной печи / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2003. – № 1. – С. 12–15.
87. Bol'shakov V.I., Shutylev F.M., Ivancha N.G. et al. Analysis of the capacity of blast-furnace charging systems / Metallurgist, May 1986, Volume 30, Issue 5, pp. 140–143. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/BF00741073.
Большаков В.И., Шутылев Ф.М., Иванча Н.Г. и др. Анализ пропускной способности систем загрузки доменных печей / Металлург. – 1986. – № 5. – С. 13–15.
88. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Лебедь В.В. и др. Модель радиального распределения шихтовых материалов на колошнике доменной печи, оборудованной БЗУ / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2011. – Вып. 24.
89. **Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Vishnyakov V.I. et al. Model system for selecting and correcting charging programs for blast furnaces equipped with a bell-less charging apparatus / Metallurgist, January 2013, Volume 56, Issue 9-10, pp. 652–657. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/s11015-013-9630-3.**
Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Вишняков В.И. и др. Модельная система выбора и корректировки программ загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ / – Металлург. – 2012. – № 9. – С. 36–40.
90. Спирин Н.А., Лавров В.В., Рыболовлев В.Ю. и др. Модельные системы принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Екатеринбург: ИздатНаукаСервис. – 2011. – 461 с.

91. Большаков В.И., Товаровский И.Г., Шутылев Ф.М. Особенности применения различных загрузочных устройств на современных доменных печах / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». - 2007. - № 9. - С. 24–32.
92. Семенов Ю.С. Выбор рациональных режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, для условий работы с малой массой подачи и с нестабильным качеством шихтовых материалов / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». - 2013. - № 12. - С. 14–19. ISSN: 0135-5910.
93. Bolshakov V.I., Semenov Yu.S., Kuznetsov A.M. The Experience of the Implementation of Modern Blast Furnace Equipped with Bell-Less Top Charging Device under Conditions of Changing Quality of Charge Materials / *Metallurgical and Mining Industry*, 2013/2, pp. 56–64. ISSN: 20760507.
Большаков В.И. Семенов Ю.С., Кузнецов А.М. Опыт освоения современной доменной печи, оборудованной БЗУ, в условиях изменяющегося качества шихтовых материалов / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 2. – С. 82–86.
94. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. Освоение режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в условиях нестабильного качества шихтовых материалов / Сборник трудов VI Международного Конгресса по агло-коксо-доменному производству, 20–24 мая 2013 г. – С. 60–71.
95. Potanichev N.A., Kostrov V.A., Kotov A.P., Kailov V.D. Controlling the distribution of materials and gases in a 2700 m³ blast furnace / *Metallurgist*, October 1972, Volume 16, Issue 10, pp. 680–684. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/BF00734821.
Потаничев Н.А., Костров В.А., Котов А.П., Кайлов В.Д. Регулирование распределения материалов и газов в доменной печи объемом 2700 м³ / Металлург. – №10. – 1972. – С. 14–16.
96. Мазун А.И., Цейтлин М.А. Выбор оптимального режима загрузки доменной печи объемом 2000 м³ / *Сталь*. – 1968. – № 10. – С. 886.
97. Москалина Ф.Н. Определение массы подачи шихтовых материалов для доменных печей / Вопросы теории и практики производства чугуна (тематический сборник научных трудов), Москва, Металлургия. – 1986. – С. 65–69.
98. Гуденау Г.В., Сасабе М., Крайбих К. Исследования на охлажденных доменных печах в Японии / *Черная металлургия*. – № 6–7, 1977, С. 13–17.
99. Лялюк В.П., Шеремет В.А., Тараканов А.К. и др. Влияние массы железорудной подачи на технико-экономические показатели доменной плавки / Бюллетень «Черная металлургия». – 2010. – №11. – С. 29–35.
100. Тайхерт Э., Гупта В.Н. Влияние различной крупности кокса на режим работы доменной печи с горном диаметром 7,8 м / *Черные металлы*. – 1976. – №14–15. – С. 19–23.
101. Беер Г., Цишкале В. Влияние свойств кокса на показатели работы доменной печи / *Черные металлы*. – 1968. – №16. – С. 3–10.

102. Ковшов В.Н. Петренко В.А. Экспериментальные исследования движения шихты и газа в доменной печи / Институт технологии – 1996. – 124 с.
103. Товаровский И.Г. Влияние технологических факторов на удельный расход кокса и производительность доменной печи / Сборник трудов «Экономия кокса в доменных печах» – М.: Металлургия. – 1986. – С. 75–83.
104. **Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. Реализация энергосберегающей технологии загрузки современной доменной печи в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 6 – С. 6–14.**
105. **Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. Освоение энергосберегающей технологии загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2014. – Вып. 28. – С. 57–80.**
106. Большаков В.И., Чайка А.Л., Лебедь В.В., Сохацкий А.А. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины / Металл и литейные технологии Украины. – 2013. – № 10. – С. 5–10.
107. Bol'shakov V.I., Gladkov N.A., Nesterov A.S. et al. Metallurgical properties and applications of pellets / Steel in Translation, 2004. – Vol. 34, No. 10, pp. 1–8.
Большаков В.И., Гладков Н.А., Нестеров А.С. и др. Исследование металлургических свойств окатышей и особенности их использования / Сталь. – 2004. – № 10. – С. 6–11.
108. Lyalyuk V.P., Kassim D.A., Tovarovskii I.G. et al. Comparison of Blast-furnace Efficiency with Pulverized-coal Injection and with Anthracite Chunks / Steel in Translation, 2014. – Vol. 44, No. 1, pp. 34–37. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091214010136.
Лялюк В.П., Товаровский И.Г., Тараканов А.К. и др. Сравнительный анализ эффективности технологий доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива и загрузкой кускового антрацита / Сталь. – 2014. – № 1. – С. 2–5.
109. Filatov S.V., Basov V.I., Kurunov I.F. Pulverized-coal Injection at a Blast Furnace with a Conical Charging System / Steel in Translation, 2015. – Vol. 45, No. 7, pp. 503–506. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091215070062.
Филатов С.В., Басов В.И., Курунов И.Ф. Опыт применения ПУТ на доменной печи с конусным загрузочным устройством / Сталь. – 2015. – № 7. – С. 6–9.
110. Летцель Д., Хунгер Й., Крюгер В. и др. Процессы при вдувании угольной пыли в доменную печь / Черные металлы. – 1999. – №5. – С. 20–28.
111. Нестеров А.С., Большаков В.И., Мажаренко Н.М. и др. Исследование процессов фильтрации расплавов через коксовую насадку в доменной плавке при применении пылеугольного топлива / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2009. – Вып. 19. – С. 90–99.

112. Семенов Ю.С., Горупаха В.В., Шумельчик Е.И. Основные положения задувки доменной печи после остановки продолжительностью более 80 суток без выпуска козлового чугуна / Черные металлы. – 2017. – № 11. – С. 28–36. ISSN: 01320890.
Semenov Yu.S., Horupakha V.V., Shumelchik E.I. The basic conditions of blowing of a blast furnace after its durable stopping for more than 80 days without tapping of freezing iron / Chernye Metally. – 2017. – Vol. 11. – pp. 28–36.
113. Большаков В.И., Нестеров А.С., Коваленко А.Г. и др. Эффективная работа аглодоменного производства ПАО «ЕМЗ» при расширении использования в шихте вторичных ресурсов и окатышей / Сталь. – 2014. – № 11. – С. 7–9.
114. Нестеров А.С., Семенов Ю.С., Горупаха В.В. и др. Исследование процесса формирования жидких фаз при вдувании пылеугольного топлива в переменных шихтовых условиях / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2017. – № 5. – С. 24–28. ISSN: 0135-5910.
115. Иванча Н.Г., Муравьева И.Г., Семенов Ю.С. и др. Совершенствование технологии, работы оборудования и систем управления доменной плавкой / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2017. – № 6. – С. 31–40. ISSN: 0135-5910.
116. Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В. Экспертный модуль системы термозондов для управления загрузкой доменной печи / Сталь. – 2018. – № 12. – С. 13–17.
117. Semenov Yu.S., Mozhareno N.M., Gorupakha V.V. et al. Effect of the Fuel, Raw Materials, and Process Conditions on the Behavior of Temperature Change in a Blast-Furnace Lining / Metallurgist, July 2015, Volume 59, Issue 3–4, pp. 290–299. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/s11015-015-0099-0.
Семенов Ю.С., Можаренко Н.М., Горупаха В.В. и др. Влияние топливно-сырьевых и технологических условий на характер изменения температуры футеровки доменной печи / Металлург. – 2015. – № 04. – С. 21–28.
118. Кожух В.Я. Контроль потерь тепла в доменной печи / Сталь. – 1965. – №4. – С. 298–306.
119. Большаков В.И., Бородулин А.В., Листопадов В.С. и др. Контроль суммарной величины тепловых потерь с охлаждающей водой на печах доменного цеха и их практическое приложение / Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло: прошлое, современное состояние, будущее: сборник докладов международной научно-практической конференции (27–29 марта 2014 г., г. Екатеринбург). – Екатеринбург: УрФУ. – 2014. – Ч. 1. – С. 96–103.
120. Патент України UA 104228 C2 на винахід. Спосіб контролю ходу доменної печі / В.І. Большаков, О.В. Бородулін, О.Л. Чайка, О.І. Швачка – заявл. 25.04.13; опубл. 10.01.14, Бюл. № 1, 2014 р.

121. Gordon Y., Sadri A., Izumskiy N. et al. Integration of lining and cooling system diagnostics methods into the expert system to reduce hot metal production cost and increase blast furnace productivity / Association for Iron & Steel Technology. – Pennsylvania Convention Center, Philadelphia, USA, 7–10 May 2018.
122. Чайка А.Л., Фоменко А.П., Набока В.И. и др. Анализ влияния увеличения расхода ПУТ на разгар футеровки, изменение тепловых потерь и расход кокса / *Сталь*. – 2018. – №8. – С. 7–9.
123. **Semenov Yu.S. Temperature Distribution of the Gas Flux in Blast Furnaces / Steel in Translation, 2017. – Vol. 47, No. 7, pp. 473–477. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091217070117.**
Семенов Ю.С. Особенности распределения температур газового потока в доменной печи / Сталь. – 2017. – № 7. – С. 5–8.
124. **Semenov Yu.S., Shumelchik E.I., Horupakha V.V. Blast Furnace Shaft Thermal State Monitoring System / Steel in Translation, 2017. – Vol. 47, No. 11, pp. 728–731. ISSN: 09670912. DOI: 10.3103/S0967091217110092.**
Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В. Система мониторинга теплового состояния шахты по высоте и окружности доменной печи / Сталь. – 2017. – № 11. – С. 2–5.
125. Bol'shakov V.I., Chaika A.L., Sushchev S.P. et al. New methods for monitoring the technical state of blast furnace enclosure without stopping the technological process / *Refractories and Industrial Ceramics*, May 2007, Volume 48, Issue 3, pp. 178–182. ISSN: 10834877. DOI: 10.1007/s11148-007-0055-z.
Большаков В.И., Чайка А.Л., Суцев С.П. и др. Новые методы контроля технического состояния ограждения доменных печей без остановки технологического процесса / Новые огнеупоры. – 2007. – № 7. – С. 34–39.
126. Чайка А.Л. / Контроль состояния ограждения доменных печей с использованием термограмм / *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2008. – №4. – С. 109–111.
127. Васюра Г.Г. Регулирование теплового состояния доменной печи в период раздувки / *Металлург*. – 2002. – №5. – С. 40–42.
128. Иноземцев Н.С., Коршиков Г.В., Капорулин В.В. Охлаждение и нагрев коксовых насадок при выдувках и задувках доменных печей / *Сборник научных трудов международной научно-технической конференции «Современная металлургия начала нового тысячелетия»*. – Липецк. – 2005. – С. 56–60.
129. Yankovskii A.S., Mar'yasov M.F., Pol'shchikov A.V. et al. Blow-through of a Blast Furnace with the Use of Nitrogen / *Metallurgist*, October 1988, Volume 32, Issue 11, pp. 347–348. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/BF00749888.
Янковский А.С., Марьясов М.Ф., Полищиков А.В. и др. Раздувка доменной печи с применением азота / Металлург. – 1988. – №11. – С.29.

130. Shcheglov E.M., Kholodnyi D.P., Grachev S.N. et al. Improving the Technology for the Blow-In of Blast Furnaces After Class-I and Class-II overhauls / Metallurgist, March 2014, Volume 57, Issue 11–12, pp. 1082–1087. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/s11015-014-9831-4.
Щеглов Э.М., Холодный Д.П., Грачев С.Н. и др. Совершенствование технологии задувки доменных печей после капитальных ремонтов I и II разрядов / Металлург. – 2013. – № 12. – С. 40–43.
131. Кузнецов А.М., Коваленко А.Г., Зубенко А.В. и др. Основные положения задувок доменных печей после остановок различной продолжительности / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2015. – Вып. 30. – С. 90–109.
132. Дружков В.Г., Макарова И.В. Влияние характера движения материалов в рабочем пространстве доменных печей на процесс задувки / Теория и технология металлургического производства, 2016. – № 2. С. 13–17.
133. Дружков В.Г., Макарова И.В., Потапова М.В. Уточнение характера движения материалов и газов в рабочем пространстве доменных печей в процессе задувки / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2017. – № 1. – С. 35–38.
134. Большаков В.И., Голубых Г.Н., Можаренко Н.М. Опыт задувки доменных печей / «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2009. – № 7. – С. 40–54.
135. Ван Оуденаллен Р., Уайз Дж., Грейвмейкер Г.-Я. Задувка доменных печей после длительных остановок / Черные металлы. – 2010. – № 6. С. 25–29.
136. Chernobrivets B.F., Al'ter M.A., Emel'yanov V.L., Kaporulin V.V. Blowing-in a blast furnace after a long-term shut-down without discharging saw-iron and filling in water / Metallurgist, October 1995, Volume 39, Issue 10, pp. 176. ISSN: 00260894. DOI: 10.1007/BF00740810.
Чернобривец Б.Ф., Альтер М.А., Емельянов В.Л., Капорулин В.В. Особенности задувки доменной печи после длительной остановки без выпуска козлового чугуна и заливки печи водой / Металлург. – 1995. – № 10. – С. 20–21.
137. Ван Стейн Калленфельс Э. Новый надежный метод восстановления «замороженной» доменной печи / Сталь. – 2005. – № 10. – С. 28–31.
138. Шумельчик Є.І., Горупаха В.В., Семенов Ю.С. Розробка і впровадження нових підходів до діагностики та управління доменною плавкою / Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ». – 2018. – С. 24–29.
139. Семенов Ю.С. Новые подходы в управлении загрузкой доменной печи, оборудованной БЗУ, в современных условиях работы / Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: коллективный труд второго международного симпозиума под научной редакцией д.т.н., проф. И.Г. Товаровского. – Днепр: ЖУРФОНД. – 2016. – 382 с. (С. 272–285).

140. Semenov Yu.S., Shumelchyk Ie.I., Horupakha V.V. Development of Technology of Pulverized Coal Injection in Ukraine's Blast Furnaces in Variable Liquid and Gas Dynamic Conditions / Сборник научных трудов ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – 2018. – Вып. 32.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
СПИСОК СКОРОЧЕНЬ	8

ГЛАВА 1

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ДІАГНОСТИКИ ТА УПРАВЛІННЯ ДОМЕННОЮ ПЛАВКОЮ

	9
1.1. Узагальнення результатів попередніх розробок по способам управління завантаженням доменної печі	9
1.1.1. Управління радіальним розподілом шихтових матеріалів	9
1.1.2. Управління окружним розподілом шихтових матеріалів	12
1.1.3. Використання засобів контролю процесів доменної плавки для управління розподілом шихтових матеріалів в печі	14
1.2. Аналіз досвіду використання засобів контролю процесів для вдосконалення технології доменної плавки	15
1.2.1. Використання зондів з відбором проб газу	15
1.2.2. Використання стаціонарних термозондів, встановлених над поверхнею засипу шихти	16
1.2.3. Використання інформації термопар периферійного і колошникового газів, засобів контролю поверхні засипу шихти	18
1.2.4. Використання інформації термопар футерівки доменної печі	19
1.3. Аналіз досвіду ведення технології доменної плавки в змінних паливних умовах	20
1.3.1. Особливості технології доменної плавки з використанням природного газу, пиловугільного палива і без паливних дуттєвих добавок зі зволоженим дуттям	20
1.3.1.1. Технічна характеристика марок кам'яного вугілля для виробництва ПВП в умовах України	29

ГЛАВА 2**ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКИ НА ПОЧАТКОВОМУ ЕТАПІ
РОБОТИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ ПІСЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ,
НЕОБХІДНІ ДЛЯ ПОДАЛЬШОГО ОБҐРУНТОВАНОГО
УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ**

	33
2.1. Аналіз конструктивних особливостей завантажувального пристрою і розрахунок траєкторій руху шихтових матеріалів у колошниковому просторі доменної печі	33
2.1.1. Загальні положення технології завантаження шихтових матеріалів в доменну піч з використанням БЗП	33
2.1.2. Конструктивні особливості БЗП, встановленого на доменній печі після реконструкції	35
2.1.3. Розрахунок траєкторій руху шихтових матеріалів в колошниковому просторі доменної печі	42
2.2. Розробка технологічних вимог щодо формування задувочної шихти доменної печі після реконструкції	51
2.2.1. Загальні положення	51
2.2.2. Технологічні вимоги до шихтових матеріалів при задувці доменної печі	52
2.3. Розробка програми завантаження задувочної шихти	56
2.3.1. Склад і характеристики задувочної шихти ДП №3	56
2.4. Дослідження параметрів потоку шихтових матеріалів і їх розподілу на колошнику доменної печі перед її задувкою	60
2.4.1. Визначення витратних характеристик шихтового затвору бункера БЗП	61
2.4.2. Визначення меж і траєкторій потоку шихтових матеріалів по висоті і перерізу печі. Вибір робочих значень кутових положень лотка БЗП	63
2.4.3. Дослідження формування профілю поверхні засипу шихти	69
2.4.4. Дослідження гранулометричного і компонентного складу шару залізовмісних матеріалів по радіусу колошника	73

2.5.	Оптимізація пропускної здатності системи завантаження БЗП при контактному і безконтактному способах контролю рівня засипу	76
2.6.	Модельна система для підтримки прийняття рішень по вибору і коригуванню програм завантаження доменної печі, обладнаної БЗП	79

ГЛАВА 3

НОВІ ПІДХОДИ ДО УПРАВЛІННЯ ЗАВАНТАЖЕННЯМ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ В ЗМІННИХ ШИХТОВИХ УМОВАХ І ПРИ ВДУВАННІ В ГОРН ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА

3.1.	Розробка програм завантаження доменної печі для умов роботи з нестабільною низькою якістю шихтових матеріалів при малій величині маси подачі	88
3.2.	Вибір раціональних кутів нахилу лотка БЗП при зміні конфігурації футерівки лотка	89
3.3.	Розробка заходів з оперативного управління периферійним газовим потоком, в тому числі, при переході на технологію вдування пиловугільного палива	98
3.3.1.	Приклад реалізації заходів з оперативного управління периферійним газовим потоком на ДП з БЗП	103
3.4.	Управління окружним розподілом шихтових матеріалів на ДП з БЗП	108
3.5.	Завантаження задувочної шихти після проведення капітального ремонту з шоткретуванням шахти	109
3.6.	Особливості поведінки шихтових матеріалів в об'ємі печі та вибір раціональних режимів завантаження при освоєнні технології вдування пиловугільного палива	112
3.6.1.	Дослідження процесу формування рідких фаз при вдуванні пиловугільного палива в змінних шихтових умовах	114
3.6.2.	Вибір раціональних режимів завантаження при освоєнні технології вдування пиловугільного палива	114
		119

ГЛАВА 4**РОЗРОБКА МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ
РОЗПОДІЛОМ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ У ДОМЕННІЙ
ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЗМІНУ
ТЕМПЕРАТУР ГАЗОВОГО ПОТОКУ НАД ПОВЕРХНЕЮ
ЗАСИПУ**

134

- 4.1 Дослідження впливу технологічних факторів на характер зміни температур газového потоку над поверхнею засипу шихти 134
- 4.2 Розробка показників розподілу інтенсивності газového потоку по радіусу печі і вимог до діапазонів їх зміни в різних технологічних умовах доменної плавки. Розробка експертного модуля системи термозондів для управління завантаженням доменної печі 149
- 4.3. Доповнення до технологічної інструкції по доменному виробництву 162

ГЛАВА 5**ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ЗМІНУ
ТЕМПЕРАТУР ФУТЕРІВКИ ПО ВИСОТІ ТА ОКРУЖНОСТІ
ДОМЕННІЙ ПЕЧІ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТА УПРАВЛІННЯ
ПЛАВКОЮ**

169

- 5.1. Визначення факторів, що впливають на зміну температур футерівки шахти, розпару і заплечиків доменної печі 169
 - 5.1.1. Дослідження зміни температур футерівки шахти, розпару і заплечиків доменної печі 169
 - 5.1.2. Сумарні теплові навантаження системи охолодження ДП 175
 - 5.1.3. Визначення допустимого діапазону змін температур шахти по окружності, відповідного до стабільної роботи печі 178
- 5.2. Дослідження особливостей розподілу температур периферійного газového потоку в доменній печі при роботі в різних газодинамічних і паливних умовах 180
- 5.3. Розробка системи моніторингу теплового стану шахти по висоті і окружності доменної печі 186

5.3.1.	Приклад реалізації прийому управління розподілом газового потоку по окружності печі з використанням інформації системи моніторингу	189
5.4.	Аналіз термограм футерівки ДП з БЗП в різних умовах роботи	192
5.5.	Дослідження зміни температур периферійної зони доменних печей при освоєнні технології вдування ПВП	198
5.5.1.	Аналіз зміни температур тіла холодильників ДП №5 при різних газо-дуттєвих і паливних режимах в період освоєння технології вдування ПВП	199
5.5.2.	Аналіз зміни температур футерівки ДП №3 в період освоєння технології вдування ПВП	206

ГЛАВА 6

РОЗВИТОК СПОСОБІВ ЗАДУВКИ ДОМЕННІЙ ПЕЧІ ПІСЛЯ ТРИВАЛОЇ ЗУПИНКИ

6.1	Класифікація стоянок доменних печей та технологічні положення задувок	215
6.2	Удосконалення методів задувки доменних печей після тривалої зупинки в сучасних економічних умовах	221
6.2.1.	Вибір шихтових матеріалів задувочної шихти	222
6.2.2.	Раціональне завантаження шихти в робочий простір ДП	223
6.2.3.	Динаміка відкриття повітряних фурм по окружності ДП	223
6.2.4.	Газо-дуттєві параметри в період задувки і роздувки ДП	224
6.2.5.	Склад продуктів плавки в період задувки ДП	230
6.3	Основні технологічні вимоги до задувки доменної печі після її тривалої зупинки	232

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

234

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

240

Наукове видання

**Національна академія наук України
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова**

**Юрій Станіславович Семенов,
Євген Ігорович Шумельчик,
Віктор Володимирович Горупаха**

**Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-
сировинних умовах**

(українською мовою)

Дизайн обкладинки К.М. Шумельчик

Підписано до друку 30.11.2018. Формат 60х84 1/16.

Папір офсетний. Гарнітура «Мугіад».

Умовн.друк.арк. 15,11. Обл.-вид.арк. 9,75.

Наклад 300 прим.

ТОВ «Домінанта Прінт», 49008, Україна,

м. Дніпро, вул. Театральна, 6.

Свідоцтво ДК №5741 від 31.10.2017 р.

Друк: друкарня ТОВ «Домінанта Прінт».

м. Дніпро, вул. Театральна, 6.

www.dmpriint.com.ua