

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**

КАССІМ ДАР'Я ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 669.162

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ДОМЕННОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ЗА РАХУНОК
ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ШИХТОВИХ МАТЕРІАЛІВ І
ГАЗОДИНАМІЧНИХ УМОВ РОБОТИ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ**

**Спеціальність: 05.16.02 – “Металургія чорних і кольорових
металів та спеціальних сплавів”**

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеню
доктора технічних наук

Дніпро, 2020

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Національній металургійній академії України

Науковий консультант:

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

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
ПАЗЮК Михайло Юрійович,
Запорізький національний університет, інженерний інститут,
факультет металургії, м. Запоріжжя,
завідувач кафедри автоматизованого
управління технологічними процесами

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
МУРАВЙОВА Ірина Геннадіївна,
Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України,
м. Дніпро, завідувачка відділу технологічного
обладнання та систем управління

доктор технічних наук, професор
СІГАРЬОВ Євген Миколайович
Дніпровський державний технічний університет
м. Кам'янське, завідувач кафедри металургії
чорних металів ім. проф. В.І. Логінова

Захист дисертації відбудеться «24» березня 2020 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 08.084.03 при Національній металургійній академії України за адресою: пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600.
Факс: +38 (0562) 47-44-61. E-mail: lydmila_kamkina@ukr.net.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної академії України (пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600).

Автореферат розіслано «14» лютого 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої
Вченої ради Д 08.084.03
доктор технічних наук, професор

Л.В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Робота сучасних доменних печей з високим рівнем технології характеризується досягненням рекордних техніко-економічних показників продуктивності і витрати сумарного палива на виплавку чавуну. Як показано в роботах З.І. Некрасова, В.І. Большакова, Г.Г. Єфіменка, Ф.М. Журавльова, М.М. Бережного, Г.В. Губіна, Д.А. Ковальова, Н.Д. Ванюкової, С.Є. Суліменка, В.В. Бочки, А.К. Тараканова та інших, одним з найважливіших напрямків удосконалення технології доменної плавки і досягнення високих показників її ефективності є забезпечення доменних печей високоякісними паливно-сировинними матеріалами і ефективного використання цих матеріалів. Особливої актуальності та важливості це набуває в умовах впровадження у виробництво коксозаміщуючих технологій, таких як вдування пиловугільного палива (ПВП), яке вимагає, перш за все, випереджаючого підвищення якості коксу та залізорудної сировини. У той же час, на доменних печах, де поки що не використовується технологія вдування ПВП, технологія завантаження кускового антрациту може забезпечити значне зниження витрати коксу і собівартості чавуну.

Для забезпечення високих техніко-економічних показників роботи доменних печей при використанні сучасних методів управління розподілом шихти по колу та радіусу колошника печі та при вдуванні ПВП актуальним стає усунення нерівномірності розподілу по фурмам не тільки витрати дуття, а й витрати вугільного пилу, виходу горнового газу, теоретичної температури та повних енергій дуття і горнового газу. Це суттєво позначається на рівності ходу печі, її продуктивності, питомій витраті коксу і якості чавуну, що переконливо підтверджується роботами З.І. Некрасова, В.І. Логінова, В.П. Тарасова, Г.А. Воловика, С.Л. Ярошевського, Й.Г. Товаровського, К.А. Шумілова, Є.Г. Донскова, С.Т. Пліскановського, А.К. Тараканова та інших.

У цьому зв'язку важливим і актуальним теоретичним завданням є вдосконалення технологічних прийомів управління газодинамічним режимом доменних печей в залежності від особливостей шихтових умов їх роботи. Вирішення зазначеного завдання відкриває перспективи комплексного вирішення проблеми вдосконалення доменної плавки в цілому за рахунок підвищення ступеня використання теплової та хімічної енергії газового потоку шляхом його раціонального розподілу по поперечному перерізу доменної печі як “зверху” – управлінням якістю та розподілом шихтових матеріалів на колошнику, так і “знизу” – управлінням подачею дуття та ПВП у фурми і формуванням потоку газів у горні.

Отже, в дисертації отримали подальший розвиток теоретичні уявлення особливостей ведення доменної плавки в залежності від паливно-сировинних та газодинамічних параметрів роботи печі, які забезпечують вирішення проблеми підвищення ефективності виплавки чавуну в доменних печах України. Зокрема: розроблені технології виробництва офлюсованих локальних спеків, які характеризуються поєднанням найкращих металургійних властивостей агломерату та окатишів; визначені та теоретично обґрунтовані технологічні особливості використання кускового антрациту та ПВП; розроблені методичні підходи до управління роботою доменної печі на підставі контролю комплексних показників дуттьового режиму плавки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Зміст роботи відповідає сучасним напрямкам міжвузівської комплексної цільової програми “Метал”,

планам науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України та Національної металургійної академії України. В основу дисертації покладені результати наукових досліджень, що увійшли до звітів з науково-дослідних робіт: “Наукове обґрунтування та розробка ефективних тепломасообмінних процесів в інноваційних металургійних технологіях” (№ державної реєстрації 0115U003176); “Інноваційне вдосконалення металургійних технологій з метою збільшення їх енергоефективності та екологічної безпеки” (№ державної реєстрації 0119U000333).

Вирішені в роботі науково-технічні проблеми відповідають пріоритетам розвитку фундаментальних досліджень в галузі теорії і технології доменного виробництва, а також положенням “Державної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу України до 2020 року”.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в науковому обґрунтуванні і розробці нових методів контролю і управління доменною плавкою в залежності від паливно-сировинних і газодинамічних умов роботи печі, що забезпечує вирішення важливої науково-технічної проблеми – вдосконалення технології доменної плавки і підвищення її ефективності за рахунок покращення якості шихтових матеріалів і методів управління газодинамікою плавки.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані наступні завдання:

- розробити технології виробництва комплексного залізозмісного окускованого матеріалу, який поєднує найкращі металургійні характеристики агломерату і окатишів, що дозволить мати в доменній шихті тільки два основні компоненти: кокс та офлюсовані локальні спеки з високими металургійними властивостями;

- встановити кількісний та якісний вплив показників якості коксу та їх коливань на ефективність доменної плавки на прикладі роботи доменних печей ПАТ АрселорМіттал Кривий Ріг” (АМКР);

- удосконалити способи завантаження антрациту для підвищення ефективності його використання в доменній плавці;

- виконати обґрунтування технологічних прийомів управління газодинамічним режимом доменних печей в залежності від особливостей шихтових умов їх роботи;

- визначити вплив нерівномірності витрати дуття по фурмам, теоретичної температури горіння коксу у фурмених вогнищах, виходу горнового газу і повних енергій потоків комбінованого дуття та горнового газу на продуктивність доменної печі і питому витрату коксу в доменній плавці;

- розробити засоби контролю та регулювання розподілу дуття по колу горна та шихтових матеріалів по радіусу колошника доменних печей та спосіб плавки при узгодженому регулюванні радіусу осьової “віддушини” та повної механічної енергії горнового газу;

- виконати теоретичні дослідження особливостей перерозподілу газового потоку при вдуванні ПВП на доменній печі об’ємом 5000 м³ АМКР;

- розробити методику визначення повної енергії горнового газу та траєкторії газового потоку у горні печі при вдуванні в фурми природного газу та ПВП;

- оцінити ефективність доменної плавки в різних паливно-сировинних умовах, для чого виконати порівняльний аналіз ефективності технологій доменної плавки з вдуванням ПВП та з завантаженням через колошник печі кускового антрациту.

Об’єкт дослідження: технологічний процес доменної плавки.

Предмет дослідження: особливості доменної плавки в залежності від якості залізрудних матеріалів і коксу, технологічних умов плавки та реалізованих на печі технологій заміщення коксу; напрямки та методологія контролю та регулювання роботи доменної печі за рахунок управління сировинними та технологічними умовами; комплексні параметри газодинамічного режиму доменної плавки.

Методи досліджень. Для вирішення поставлених завдань в роботі використані сучасні методи досліджень, у тому числі математичне моделювання; для аналізу впливу технологічних параметрів на хід доменної плавки при різних режимах – методи математичної статистики, у тому числі спеціально розроблений для оптимізації технології доменної плавки метод відновлення одновимірних залежностей. Розрахунки комплексних показників дуттьового режиму виконувались з використанням програм EXCEL та Mathcad. Отримані експериментальні дані оброблялися з використанням програм статистичного аналізу з побудовою графічних залежностей в програмі EXCEL. Виконувались експериментальні дослідження і промислові випробування розроблених технічних рішень.

Наукова новизна отриманих результатів. В дисертаційній роботі виконано комплекс оригінальних теоретичних розробок та експериментальних досліджень, направлених на підвищення ефективності доменної плавки в сучасних паливно-сировинних і технологічних умовах за рахунок покращення газодинамічних умов роботи доменної печі і якості шихтових матеріалів. Отримані наукові знання застосовані для досягнення високих показників доменної плавки шляхом узгодженого управління роботою печі “зверху” та “знизу”. Результати роботи є теоретичним узагальненням нових наукових підходів до контролю та управління технологією плавки в залежності від впливу абсолютних значень та коливань показників паливно-сировинних умов та параметрів дуттьового режиму плавки на показники роботи доменних печей.

1. Уперше визначений кількісний і якісний вплив нестабільності якості коксу на величину коксового еквіваленту при вдуванні в доменну піч пиловугільного палива. Отримана інформація дозволяє підвищити точність технологічного аналізу параметрів роботи доменної печі в різних періодах, оскільки раніше враховувалися лише абсолютні показники якості коксу без урахування їх коливань.

2. Уперше встановлений кількісний вплив коливань комплексних параметрів дуттьового режиму, таких як витрата дуття по фурмам, повна енергія потоку комбінованого дуття на зрізі фурми, теоретична температура горіння коксу, вихід горнового газу і повна енергія потоку горнового газу, на продуктивність доменної печі і питому витрату коксу. Підвищення рівномірності розподілу газодинамічних параметрів по колу печі забезпечується розробленими оригінальними пристроями для вимірювання витрати дуття та регулювання його розподілу по фурмах доменної печі.

3. Уперше встановлено зв'язок радіусу осьової “віддушини” на колошнику доменної печі зі значеннями повної механічної енергії горнового газу, що дало змогу розробити спосіб ведення доменної плавки з обов'язковим узгодженим коригуванням параметрів завантаження і дуття, зокрема коригуванням радіусу осьової “віддушини” в залежності від значень повної механічної енергії горнового газу, раціональне значення якої визначається за показниками плавки для конкретних умов роботи доменної печі. Ефективна реалізація запропонованого способу забезпечується за рахунок розроблених конструкцій колошника, які розширюють можливості керування розподі-

лом шихтових матеріалів по радіусу колошника печей, що обладнані найбільш розповсюдженими поки що двохконусними завантажувальними пристроями.

4. Отримали подальший розвиток теоретичні уявлення про зміни газорозподілу в нижній частині доменної печі в залежності від палива, що вдувається через фурми для заміщення коксу. З використанням результатів математичного моделювання науково обґрунтовані зміни траєкторії газового потоку в нижній зоні доменної печі при переході з вдування природного газу на вдування пиловугільного палива. Отримані результати пояснюють причини розвитку периферійного ходу доменної печі при вдуванні ПВП, що викликається зменшенням енергетичного потенціалу горнового газу. Ці нові знання дозволяють здійснювати ефективну оцінку і регулювання розподілу газового потоку уздовж радіусу нижньої зони доменної печі.

5. Уперше науково обґрунтовані методи визначення комплексних показників повітряного і комбінованого дуття, а також горнового газу за умов вдування в доменну піч пиловугільного палива, що дозволяє в цих умовах здійснювати достовірний контроль розмірів зон горіння перед фурмами печі і розподілу газового потоку уздовж радіусу горна.

6. Отримали подальший розвиток дослідження технологічних особливостей доменної плавки при заміщенні частини коксу кусковим антрацитом. Встановлено, що циклічна зміна завантаження кускового антрациту на колошник доменної печі дозволяє додатково знизити витрату коксу при недопущенні захаращення горну вуглецевим дріб'язком.

Практичне значення отриманих результатів. Випробувані та впроваджені на доменних печах ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” наступні результати дисертаційної роботи:

- вдосконалені методи управління технологією доменної плавки при змінах складу і якості залізорудної сировини і коксу;
- методи узгодженого управління основними параметрами плавки, такими як рудне навантаження на кокс уздовж радіусу колошника доменної печі і повна механічна енергія горнового газу, які дозволяють найкращим чином узгоджувати заходи впливу на хід печі “зверху” і “знизу”;
- постійний контроль зміни повних механічних енергій комбінованого дуття і горнового газу з подальшим порівнянням їх з показниками, отриманими у кращі періоди роботи доменних печей, та визначення на цій основі необхідних корегувань дуттьового режиму для недопущення погіршення показників доменної плавки;
- методика визначення траєкторії газового потоку в нижній зоні доменної печі при переході з вдування природного газу на вдування пиловугільного палива;
- методика визначення і контролю комплексних показників комбінованого дуття і горнового газу при реалізації технології вдування в піч пиловугільного палива;
- технологія доменної плавки при завантаженні на колошник доменних печей кускового антрациту.

На основі розробки і реалізації нових методів контролю і управління доменною плавкою вирішена важлива проблема підвищення ефективності виплавки чавуну на металургійних підприємствах України, що має народногосподарське значення.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі на кафедрі металургійних технологій Криво-

різького металургійного інституту НМетАУ при викладанні дисциплін “Підготовка металургійної сировини”, “Теорія та технологія доменної плавки”, “Теоретичні та експериментальні дослідження процесів виплавки чавуну” та при виконанні випускних кваліфікаційних робіт бакалаврів та магістрів спеціальності 136 “Металургія”.

Особистий внесок дисертанта. Наведені в дисертації теоретичні дослідження, розробка методик, обробка результатів промислових іспитів, узагальнення та аналіз отриманих результатів виконані автором самостійно. Результати експериментальних досліджень опубліковані в співавторстві зі співробітниками кафедри металургії чавуну НМетАУ, кафедр металургійних технологій і хімічних технологій та інженерії Криворізького металургійного інституту НМетАУ та фахівцями ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг”. Особисто автору належать: аналіз і узагальнення сучасних вимог до якості коксу [7, 17-20, 23, 24, 44, 47]; розробка планів експериментів, аналіз та обробка отриманих результатів [25, 27], розробка математичних формул та методик для визначення параметрів доменної плавки [11, 12, 28-34], аналіз сучасних методів підвищення рівномірності розподілу дуття по колу доменної печі [9, 38, 39, 50], технологічний аналіз роботи доменних печей при різних сировинних умовах [8-10, 13-16, 21, 22, 29], аналіз особливостей роботи доменної печі корисним об’ємом 5000 м³ при освоєнні технології вдування ПВП [49, 51], дослідження проблем рівномірності розподілу параметрів доменної плавки по колу доменної печі [50, 52], підбір, аналіз та узагальнення літературних даних, пошук існуючих аналогів [26, 27, 35].

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи викладені у формі доповідей на 15 науково-практичних конференціях, у тому числі на: міжнародній науково-технічній конференції “Університетська наука” (м. Маріуполь, 2012, 2013, 2014, 2015, 2018 роки), XIII, XIV і XVI всеукраїнських науково-практичних конференціях “Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра” (м. Київ, 2014, 2015, 2018 роки), міжнародній міждисциплінарній науковій конференції “Science and Scientists” (м. Дніпропетровськ, 2015 р.), міжвузівській науково-практичній конференції “Актуальні питання проблем і створення та експлуатації технічних систем” (м. Кривий Ріг, 2015 р.), XI міжнародній конференції “Стратегія якості в промисловості й освіті” (м. Варна, Болгарія, 2015 р.), міжнародній конференції “Сучасна металургія: проблеми, завдання, рішення. Наука і виробництво” (м. Дніпропетровськ, 2015 р.), всеукраїнській науково-практичній конференції “Проблеми енергоресурсозбереження в промисловому регіоні. Наука і практика” (Маріуполь, 2016), всеукраїнській науково-технічній конференції, присвяченій 100-чиччю з дня народження Г.Г. Єфіменка (м. Дніпро, 2017 р.), VIII міжнародній науково-практичній конференції “Металургія 2019” (м. Запоріжжя, 2019 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 127 робіт, у тому числі: 9 монографій, 21 стаття в спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ДАК України, 31 стаття в іноземних виданнях, 41 доповідь на наукових конференціях, 10 патентів України, 15 статей увійшли до Scopus (в авторефераті список скорочений).

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Робота містить 319 сторінок, з них: 249 сторінок основного тексту, 45 рисунків, 53 таблиць і 1 додаток. Список використаних джерел складається з 330 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання дослідження, висвітлені наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, апробація та публікація результатів дослідження, визначено особистий внесок автора.

У першому розділі на підставі огляду науково-технічної літератури виконаний аналіз особливостей сучасного етапу розвитку доменної плавки, який дозволив обґрунтувати сучасні вимоги до оцінки якості залізородних матеріалів і коксу. На підставі порівняльного аналізу металургійних властивостей агломерату і окатишів показана актуальність розробки нового виду огрудкованого залізородної сировини, що поєднує кращі властивості агломерату та окатишів. Виконаний аналіз показав, що розроблені технології мають резерви для вдосконалення.

Не менш важливим напрямком розвитку сучасної доменної плавки є поліпшення якісних характеристик коксу. Особливої актуальності це набуває при використанні перспективних технологій, спрямованих на заміну дорогих видів палива більш дешевими і доступними. В доменній плавці до таких високоефективних технологій відносяться вдування ПВП та використання кускового антрациту.

Вивчення досвіду роботи доменних печей з вдуванням ПВП показало, що для усунення проблем і технологічних ризиків впровадження цієї технології необхідною умовою є реалізація комплексних заходів повної і комплексної компенсації негативного впливу на доменну плавку виведення з шихти великої кількості коксу і подачі в горн вугільного пилу.

Для ефективної роботи печі при вдуванні ПВП важливо прогнозувати зміну розмірів зон горіння і глибину проникнення газового потоку до центру горна, оскільки фурмене вогнище є ключовою ланкою в утворенні газового потоку в доменній печі. Сучасний досвід роботи доменних печей підтвердив наявність нерівномірності розподілу параметрів дуттьового потоку по фурмам, що призводить до суттєвої нерівномірності роботи печі по колу і зниженню техніко-економічних показників доменної плавки, особливо при вдуванні ПВП.

В результаті виконаного аналізу технічної інформації підтверджена актуальність досліджень ефективності доменної плавки в сучасних умовах роботи металургійних підприємств при реалізації технології вдування ПВП та альтернативних напрямків зниження витрати паливно-енергетичних ресурсів, на підставі чого визначені цілі та задачі досліджень.

У другому розділі на основі експериментальних досліджень розроблені технології виробництва офлюсованих локальних спеків, що мають комплекс кращих металургійних характеристик, притаманних агломерату та окатишам (табл. 1.).

Як видно з таблиці, металургійні характеристики отриманого огрудкованого матеріалу задовольняють всім вимогам сучасної доменної плавки. Виконано розрахунок очікуваної економічної ефективності роботи доменної печі об'ємом 5000 м³ АМКР при використанні локальних спеків з підвищеним вмістом заліза та залишковим вуглецем.

Для аналітичного дослідження економічної ефективності використання в технології доменної плавки офлюсованих локальних спеків вибрали кращий за останній

час період роботи доменної печі об'ємом 5000 м³ АМКР, в якому досягнута мінімальна витрата коксу при вдуванні ПВП (травень 2016 р.).

Таблиця 1 – Металургійні характеристики огрудкованих шихтових залізородних матеріалів для доменної плавки

Показники	Промисловий офлюсований агломерат	Промислові офлюсовані та неофлюсовані окатиші	Офлюсовані локальні спеки з підвищеним вмістом заліза і залишковим вуглецем
Вміст, %: Fe	51,2-64,1	61,5-65,8	63,5-74,8
FeO	9,1-15,6	1,3-5,4	7,6-25,2
SiO ₂	8,2-3,7	7,7-0,9	4,1-2,3
C	0	0	1,6-2,5
Основність (CaO/SiO ₂), од	1,2-1,8	0,1-1,25	1,25-1,5
Вміст класів, %: 60-100 мм	23,7-35,6	0	0
20-60 мм	55,9-34,3	0	89,9-71,8
5-20 мм	12,3-7,8	91,7-98,9	11,9-24,8
0-5 мм	8,1-20,4	5,2-1,8	2,2-3,4
Міцність в барабані: на удар (+5 мм)	57,4-93,1	92,4-97,1	93,5-96,4
стираність (-0,5 мм)	13,6-2,6	5,8-1,1	3,6-2,5
Міцність при відновленні:			
міцність (+5 мм)	37,8-62,2	53,6-95,1	72,9-93,1
стираність (-0,5 мм)	10,4-5,3	7,4-4,2	4,2-3,3
Газопроникність та усадка шару при відновленні: усадка шару, %	15-18	23-67	13-19
перепад тиску, Па	68-71	108-154	60-72

Використовуючи методику врахування впливу технологічних факторів на питому витрату коксу і продуктивність доменної печі, отримали їх значення для нових умов плавки (табл. 2, періоди: Б – базовий, Р – розрахунковий).

Таблиця 2 – Техніко-економічні показники роботи доменної печі об'ємом 5000 м³ АМКР при вдуванні ПВП та використанні в шихті локальних спеків з підвищеним вмістом заліза та залишковим вуглецем

Показники	Періоди		±К, кг/т	±П, т/добу
	Б	Р		
Продуктивність, т/доб.	9052			
Приведена продуктивність, т/доб.		10025		+973,0
Витрата коксу (К), кг/т	408,2			
Приведена витрата коксу, кг/т		357,2	-51	
Витрата ПВП, кг/т	92,0	92,0		
Витрата, кг/т: агломерат АЦ №2	1290,0	0		
окатиші ПГЗК	310,6	0		
локальні спеки	0	1676,6		
Витрата залишкового вуглецю, кг/т	0	33,52	-26,8	
Вміст Fe у всій шихти, %	56,32	60,0	-15,02	+566,0
Середньозважена фракція -5 мм, %	7,8	3,3	-9,18	+407,0

Встановлено, що при вдуванні ПВП та використанні локальних спеків продуктивність печі об'ємом 5000 м^3 та питома витрата коксу можуть досягти своїх проектних показників, особливо якщо при цьому забезпечується висока якість коксу.

У **третьому розділі** досліджені напрямки підвищення ефективності використання твердого палива з метою покращення показників доменної плавки, зокрема обґрунтовані підходи до комплексної оцінки якості коксу не тільки з точки зору величини абсолютних показників, але і відхилення від них, тобто з урахуванням стабільності якості коксу. З метою дослідження залежності питомої витрати коксу від показників його якості на доменній печі №9 корисним об'ємом 5000 м^3 АМКР були проаналізовані статистичні дані за 6-річний період її роботи. Виконаний з використанням різних математичних методів аналіз зміни питомої витрати коксу в залежності від показників його якості (M_{25} , M_{10} і вмісту фракції $+80 \text{ мм}$) показав, що вплив цих показників на хід доменної плавки залишається, як і раніше, досить високим.

На рис. 1-3 представлені поверхні взаємодії двох показників якості коксу і приведеної питомої витрати коксу (ПрК).

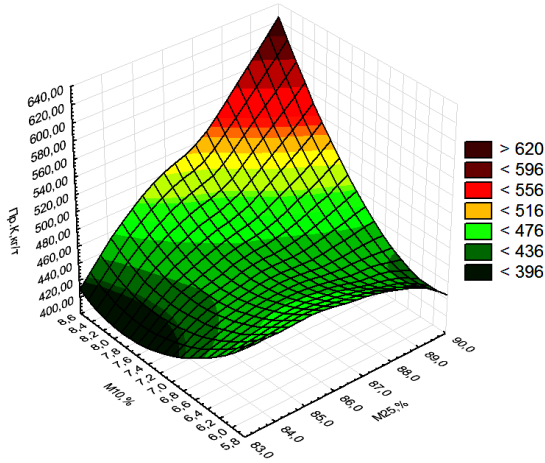


Рис. 1. Тривимірний графік впливу M_{25} і M_{10} на ПрК

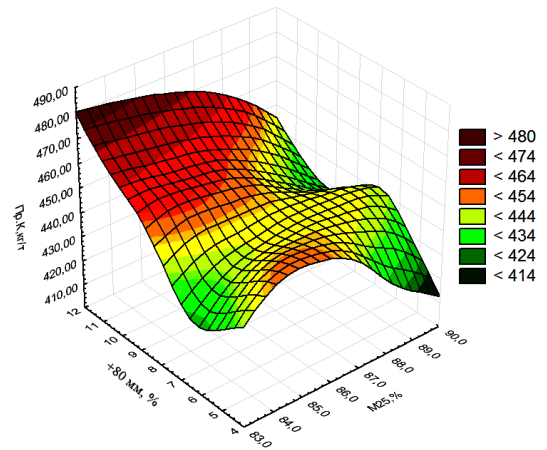


Рис. 2. Тривимірний графік впливу M_{25} і $+80 \text{ мм}$ на ПрК

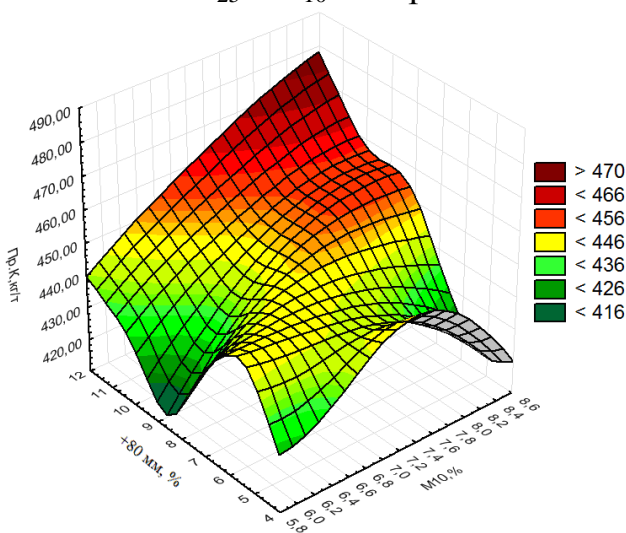


Рис. 3. Тривимірний графік впливу M_{10} і $+80$ на ПрК

З рисунків 1-3 видно, що встановити вплив одного показника без взаємодії з іншими досить складно. Тим більше неможливо оперативно приймати рішення про зміну кількості завантаженого в доменну піч коксу при зміні показників його якості для підтримки стабільного теплового стану доменної плавки.

У подальших дослідженнях були включені випадкові чинники, пов'язані з помилками в отриманні достовірних даних в статистичному ряду інформації, була проведена очистка даних від результатів, які істотно порушують "гладкість" статистичного ряду.

За наведеними у роботі рівняннями встановлено, що збільшення M_{25} в діапазоні 87-90 % на кожен 1 % дає зниження приведеної витрати коксу на 3,9 кг/т чавуну; на кожен відсоток зниження M_{10} в інтервалі від 6 до 8,5 % приведена витрата коксу знижується на 5,56 кг/т чавуну; зміна вмісту фракції +80 мм на кожен 1 % змінює приведену витрату коксу на 2,5 кг/т чавуну.

З метою визначення якісних і кількісних залежностей між збільшенням об'єму доменних печей і впливом стабільності якості коксу на продуктивність печей і питому витрату коксу в доменній плавці в якості об'єкта досліджень вибрані техніко-економічні показники роботи доменних печей АМКР. Зіставлялися середньомісячні результати роботи печей об'ємом 2000 м³, 2700 м³ і 5000 м³. Виконаний аналіз показав, що ефект від підвищення міцності коксу залежить не тільки від абсолютного рівня показника його міцності, але і від всіх інших умов доменної плавки, починаючи, у першу чергу, з об'єму печі, властивостей шихти, умов завантаження і технології плавки. Тому нормувати вплив підвищення міцності необхідно для кожної конкретної доменної печі або певної групи печей з урахуванням всіх наведених умов. Виконані дослідження показали, що якість коксу, яка оцінювалася показниками міцності M_{25} , стираності M_{10} і вмістом фракції +80 мм в товарній масі коксу, зі збільшенням об'єму печей значно більше впливає на продуктивність ніж на питому витрату коксу, забезпечуючи при цьому відповідний рівень економічної ефективності роботи доменних печей.

Наступним етапом досліджень стало визначення впливу коливання вхідних показників якості коксу – коефіцієнтів варіації $V_{\sigma}(S)$, $V_{\sigma}(A)$, $V_{\sigma}(M_{25})$, $V_{\sigma}(M_{10})$, $V_{\sigma}(CSR)$ на вихідні показники – питому витрату коксу (K) і коксового еквіваленту (KE) в доменній плавці при варіантах технології з використанням природного газу (ПГ) і з вдуванням ПВП.

На доменній печі №9 об'ємом 5000 м³ АМКР освоєння технології ПВП почалося з кінця грудня 2015 року. У період з жовтня по грудень 2015 року (далі 1-й період) і з січня по червень 2016 року при вдуванні ПВП (далі 2-й період) був використаний кокс, мінімальні і максимальні значення показників якості якого наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Показники якості коксу

Показник якості, %	Період 1-й		Період 2-й	
	min	max	min	max
Сірка (S)	0,41	0,71	0,42	0,64
Зола (A)	9,33	11,23	9,09	11,06
M_{25}	87,33	90,88	86,51	90,69
M_{10}	4,95	7,25	4,70	8,15
CSR	49,79	65,28	55,91	63,29

При роботі доменної печі №9 без вдування ПВП найбільш нестабільною якість коксу була за вмістом сірки: значення коефіцієнтів варіації змінювалися від 2,15 до 16,01 %. Найбільш стабільним був показник механічної міцності коксу M_{25} , для якого коефіцієнт варіації коливався у межах 0,1-1,15 %. Коефіцієнти варіації показника стираності коксу M_{10} змінювалися від 2,58 до 9,98 %, що свідчить про нестабільність

даної властивості коксу, який завантажувався в доменну піч протягом трьох місяців 2015 року. Значно менше коливалася якість коксу за вмістом золи (коефіцієнт $V_{\sigma}(A)$ змінювався від 1,76 до 4,55 %) і за показником післяреакційної міцності коксу ($V_{\sigma}(CSR)$ склав 0,53-5,26 %). У 2016 році при впровадженні на печі технології доменної плавки з вдуванням ПВП якість коксу також не відрізнялася високою стабільністю. Причому найбільше змінювалися стиранисть коксу і, як і в попередньому періоді, вміст сірки в коксі (коефіцієнти варіації $V_{\sigma}(M_{10})$ і $V_{\sigma}(S)$ змінювалися в діапазонах 1,1-12,9 і 4,8-15,5 %, відповідно). Найбільш стабільним, як і раніше, залишився показник механічної міцності коксу M_{25} , для якого коефіцієнт варіації склав 0,3-1,1 %. Коефіцієнт варіації $V_{\sigma}(A)$ змінювався від 1,6 до 6,3, а $V_{\sigma}(CSR)$ – від 0,3 до 4,3 %. У ході аналізу були отримані одномірні залежності типу $Y = F(X)$ для кожної пари вхідного і вихідних параметрів:

Рівняння регресії	Коефіцієнт кореляції	Якісна характеристика тісноти зв'язку за співвідношенням Чеддока
1-й період		
$K = 0,4572 \cdot [V_{\sigma}(S)] + 483,11$	$k = 0,78$	Висока
$K = 0,4884 \cdot [V_{\sigma}(A)] + 486,17$	$k = 0,18$	Слабка
$K = -7,2061 \cdot [V_{\sigma}(M_{25})] + 493,02$	$k = 0,43$	Помірна
$K = 0,0483 \cdot [V_{\sigma}(M_{10})] + 487,69$	$k = 0,68$	Помітна
$K = -0,8152 \cdot [V_{\sigma}(CSR)] + 490,16$	$k = 0,68$	Помітна
2-й період		
$KE = 1,1777 \cdot [V_{\sigma}(S)] + 505,63$	$k = 0,76$	Висока
$KE = 1,9705 \cdot [V_{\sigma}(A)] + 507,96$	$k = 0,68$	Висока
$KE = 1,9705 \cdot [V_{\sigma}(M_{25})] + 507,96$	$k = 0,99$	Вельми висока
$KE = 1,4069 \cdot [V_{\sigma}(M_{10})] + 507,37$	$k = 0,98$	Вельми висока
$KE = 5,5334 \cdot [V_{\sigma}(CSR)] + 506,27$	$k = 0,99$	Вельми висока

Як видно з наведених даних, у 1-му періоді спостерігається більш тісний зв'язок між витратою коксу і нестабільністю вмісту сірки в коксі, що узгоджується з найвищими значеннями коефіцієнтів варіації вмісту сірки. Має місце помітна сила зв'язку між питомою витратою коксу з нестабільністю стиранисті і післяреакційної його міцності. Помірну силу зв'язку з механічною міцністю коксу по показнику M_{25} можна пояснити стабільністю даної властивості доменного коксу.

Аналіз результатів, отриманих за виробничими даними роботи печі в 2-му періоді, говорить про те, що при вдуванні ПВП доменна піч дуже сильно реагує на зміни якості коксу, про що свідчать значення коефіцієнтів варіації. Особливо високою ця залежність є для коефіцієнтів $V_{\sigma}(M_{25})$, $V_{\sigma}(M_{10})$, $V_{\sigma}(CSR)$.

В дисертаційній роботі уперше виконані розрахунки обліку впливу коефіцієнтів варіації вхідних параметрів при їх зміні на 1 % на коксовий еквівалент при вдуванні в доменну піч ПВП. Зокрема встановлено, що зменшення на 1 % кожного з коефіцієнтів

ентів варіації скорочує питому витрату коксового еквіваленту, а саме: $V_{\sigma}(S)$ – на 1,37 кг/т, $V_{\sigma}(A)$ – на 1,50 кг/т, $V_{\sigma}(M_{25})$ – на 4,23 кг/т, $V_{\sigma}(M_{10})$ – на 1,38 кг/т, а $V_{\sigma}(CSR)$ – на 5,33 кг/т чавуну. Таким чином, виконане дослідження показало, що стабільність якості коксу має значний вплив на витрату палива і більшою мірою при доменній плавці з вдуванням ПВП. У цьому випадку особливу увагу необхідно приділяти стабілізації показників якості коксу.

З метою підвищення ефективності плавки в умовах коливання цін на кокс і природний газ, а також для підприємств, де ще не реалізована технологія вдування ПВП, виконано аналіз технологічних особливостей і обов'язкових умов ведення доменної плавки при завантаженні на колошник кускового антрациту. До них відносяться: переведення доменних печей з циклічної змішаної системи завантаження залізородних матеріалів і коксу на роздільну зі значним збільшенням маси подачі; завантаження антрациту спільно з залізородною частиною шихти, що виключає “засмічення” коксових шарів дріб'язком при руйнуванні вугілля і забезпечує практично повну газифікацію дріб'язку киснем шихти; раціональний розподіл антрациту по радіусу печі – завантаження антрациту в периферійну або проміжну зони колошника печі, де гарантована інтенсивна газифікація вуглецю антрациту киснем шихти та діоксином вуглецю газової фази. З метою додаткового зниження витрати коксу за рахунок збільшення витрати кускового антрациту, що завантажується в піч, при недопущенні захарачення горну доменної печі, був розроблений і перевірений в промислових умовах спосіб доменної плавки, який передбачає циклічну зміну питомої витрати антрациту, причому період роботи печі при питомій витраті антрациту 60-70 кг/т чавуну дорівнює 15-30 діб, а період роботи печі при питомій витраті антрациту 80-90 кг/т – 7-12 діб. Ефективність даного способу була підтверджена роботою доменних печей корисним об'ємом 2000 і 2700 м³ ПАТ “АМКР”, де циклічна зміна витрати антрациту забезпечила його ефективне використання за рахунок зниження питомої витрати коксу при збереженні продуктивності.

В четвертому розділі виконана оцінка впливу якості агломерату і коксу на техніко-економічні показники роботи доменної печі з урахуванням комплексних показників газодинамічного режиму плавки. Для цього були виконані порівняльні дослідження ефективності доменної плавки при зміні якісних характеристик агломерату і коксу, а також розрахункових показників дуттьового режиму плавки в доменних печах АМКР корисним об'ємом 2700 і 2000 м³. Для аналізу використовували техніко-економічні показники роботи доменних печей в періоди роботи на агломераті з різними металургійними властивостями і різним діаметром фурм. У лютому 2018 року доменна піч №9 АМКР була зупинена на капітальний ремонт. Як завжди в цьому випадку, високоякісний агломерат агломераційного цеху (АЦ) №2 аглодоменного департаменту (АДД) АМКР був поданий в бункери шихтоподачі ДП №8 об'ємом 2700 м³, а також в окремі періоди надходив і на ДП №6 об'ємом 2000 м³ (табл. 4).

Виконаний аналіз показав, що при переведенні доменної печі на агломерат зі знизеним вмістом дріб'язку з 14,26 до 8,18 % продуктивність доменної печі №8 зросла з 4672 до 5426 т/добу (на 13,9 %) при зниженні витрати коксу на 19,2 кг/т чавуну, або на 4,2 %. При цьому витрату дуття на доменній печі вдалося збільшити на 287 м³/хв. Інтенсивність плавки за спаленим коксом зросла з 862 до 922 т/(м³·добу).

Таблиця 4 – Техніко-економічні показники роботи доменних печей №8 та 6

Показники	Періоди ДП №8		Періоди ДП №6	
	Б	Д	Б	Д
Тривалість періоду, діб	31	8	31	15
Продуктивність, т/добу	4672	5426	3157	3879
Приведена продуктивність, т/добу	4672	4886	3157	3441
Витрата коксу (К), кг/т	471,2	452	497,0	447,1
Приведена витрата коксу, кг/т	471,2	460,0	497,0	466,0
Витрата антрациту (А), кг/т	26,9	7	13,6	4,6
Інтенсивність (К+А), кг/(м ³ ·добу)	862	922	806	876
Дуття: витрата, м ³ /хв.	4221	4508	2948	3192
тиск, кПа	261	271	224	248
температура, °С	996	1041	1020	1047
Витрата природного газу, м ³ /т	49,6	66	51,1	77,3
Вміст кисню у дутті, %	24,2	26	23,8	26,8
Колошниковий газ: температура, °С	296	223	305	248
тиск, кПа (надл.)	126	139	102	120
вміст %: CO/CO ₂	24,7/17,5	25,0/21,0	24,01/17,8	20,5/17,8
η _{CO}	0,41	0,46	0,43	0,46
Аналіз чавуну, %: Si	0,75	0,72	0,77	0,8
S	0,016	0,025	0,017	0,023
Поточні простой/тихий хід, %	2,77/0,04	0/0	2,58/0,35	0,2/0
Вміст Fe в рудній частині шихти, %	55,43	56,00	55,43	55,9
Витрати, кг/т: агломерат АЦ МП	95	0	1191,4	619,9
агломерат АЦ №1	1613	341	557,1	784,1
агломерат АЦ №2	645	1238	41,5	245,8
вапняк	5,4	9,0	5,3	1,6
Якість коксу, %: сірка	0,5	0,40	0,5	0,4
зола	11,2	11,2	11,2	11,2
M ₂₅ / M ₁₀	86,1/7,4	84,9/7,5	86,1/7,4	85,2/7,5
CSR/CRI	53,6/36,7	54,7/36,6	53,6/36,7	54,3/36,3
Фракція 0-5 мм, %: агломерат АЦ МВ	20,25	–	20,25	20,25
агломерат АЦ №1	14,14	14,19	14,14	14,19
агломерат АЦ №2	8,72	6,53	8,72	6,53
Середньозважена фракція 0-5 мм, %	14,26	8,18	18,08	15,32
Кінетична енергія комб. дуття, кДж/с	148,3	178,9	106,5	119,5
Енергія тиску комбінов. дуття, кДж/с	1621,7	1761,2	1358,3	1471,1
Повна механічна енергія комбінованого дуття, кДж/с	1770	1940,1	1464,8	1590,6
Вихід горнового газу, м ³ /с	93,4	103,7	65,1	74,9
Теоретична температура горіння, °С	2109,4	2133	2107,5	2120,6
Енергія тиску горнового газу, кДж/с	3176,6	3560,6	2611,5	3024,6
Повна механічна енергія горнового газу, кДж/с	3325,9	3739,5	2718	3144,1

Температура колошникового газу знизилася з 296 до 223 °С. Ступінь використання газу збільшився з 41 до 46 %, головним чином, через зниження питомої витрати коксу. Аналогічні результати були отримані і на доменній печі №6 (табл. 4). Переведення її з агломерату АЦ МВ (агломераційного цеху металургійного виробництва АДД), вміст дріб'язку 0-5 мм в якому завжди більше 20-25 %, на агломерат АЦ №1 і

АЦ №2 привело до зростання продуктивності печі на 722 т/добу (на 18,6 %) і зниження витрати коксу на 49,9 кг/т. Витрату дуття також вдалося підняти на 244 м³/хв. Підвищилися ступінь використання теплової (температура колошникового газу знизилася з 305 до 248 °С) і відновної енергії газового потоку (η_{CO} збільшився з 43 до 46 %).

На рис. 4 наведені діаграми зміни температури газу на колошнику печей №8 і 6, виміряних у восьми точках двома термозондами, розташованими протилежно по діаметру колошника кожної печі. З рис. 4 видно, що доменна піч №8 працювала з явно вираженим осьовим потоком газу в базовому і дослідному періодах, проте в дослідному періоді відбулося зниження температури газового потоку на периферії і його посилення по осі печі, що пояснюється збільшенням повних механічних енергій комбінованого дуття і горнового газу, які відповідають за довжину зони горіння і глибину проникнення газового потоку до центру горна печі. Аналогічний перерозподіл температур на доменній печі №6 був пов'язаний з перерозподілом газового потоку в горні печі, на що вказують повні механічні енергії комбінованого дуття та горнового газу.

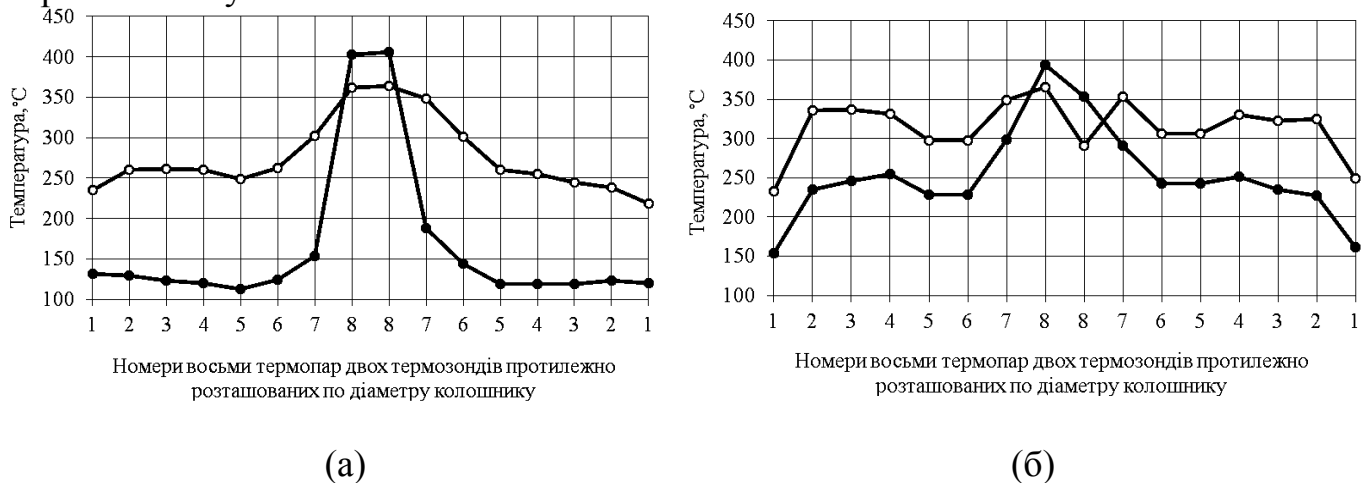


Рис. 4. Діаграми зміни температур на колошнику доменних печей №8(а) і №6 (б): —○— базовий період (Б); —●— дослідний період (Д)

Перший досвід роботи ДП №8 на якісному високоосновному агломераті НКГЗК-2 (основністю 1,57) та з середньозваженим вмістом у шихті 8,8 % фракції 0-5 мм був отриманий у 1977 року (табл. 5). У цей період продуктивність доменної печі виросла до 6012 т/добу (на 26,3 % щодо базового періоду).

Цей досвід також був проаналізований з позицій повних механічних енергій потоків комбінованого дуття ($E_{пм\ кд}$) та горнового газу ($E_{пм\ гг}$), які розраховують за формулами:

$$E_{пм\ кд} = 371,2 \frac{Q_{осм} \cdot T_{см}}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{осм} \cdot Q_{осм}^3 \cdot T_{см}^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_d^2}, \quad \text{Дж/с}, \quad (1)$$

де $Q_{осм}$ – приведена до нормальних умов витрата газоповітряної суміші, що утворюється у зв'язку з частковим горінням природного газу в порожнині фурми, нм³/с; $T_{см}$ – температура цієї суміші, К; $\rho_{осм}$ – щільність суміші за нормальних умов, кг/м³; n – кількість працюючих повітряних фурм; S_{ϕ} – площа перетину фурми, м²; P_d – абсолютний тиск дуття, Па.

$$E_{\text{пмгг}} = 371,2 \frac{Q_{\text{огг}} \cdot T_{\text{г}}}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{\text{осм}} \cdot Q_{\text{осм}} \cdot T_{\text{см}}^2}{n^3 \cdot S_{\text{ф}}^2 \cdot P_{\text{д}}^2}, \text{ Дж/с}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{огг}}$ – вихід горнових газів, приведений до нормальних умов, $\text{м}^3/\text{с}$; $T_{\text{г}}$ – температура в зоні горіння (теоретична температура горіння), К.

Таблиця 5 – Техніко-економічні показники роботи доменної печі об'ємом 2700 м^3

Показники	Періоди		
	Б	Д ₁	Д ₂
Тривалість періоду, діб	30	18	6
Продуктивність, т/добу	4759	5108	6012
Витрата коксу (К), кг/т	521	512	474
Інтенсивність (К+А), кг/($\text{м}^3 \cdot \text{добу}$)	918	969	1055
Дуття: витрата, $\text{м}^3/\text{хв}$	4733	4933	4915
тиск, кПа	333	331	335
температура, °С	899	874	1095
Витрата природного газу, $\text{м}^3/\text{т}$	93	82	79
Вміст кисню у дутті, %	24,8	25,3	26,5
Поточні простой / Тихий хід %	0,79/1,42	0,39/0,23	0,23/0
Вловлений колошниковий пил, кг/т	39	35	18
Колошниковий газ: температура, °С	189	190	190
тиск, кПа (надл.)	322	333	210
$\eta_{\text{со}}$	0,41	0,41	0,43
Аналіз чавуну, %: Si	0,77	0,78	0,79
S	0,038	0,040	0,042
Вихід шлаку, кг/т	407	405	380
Витрата, кг/т: агломерат ПівдГЗК	1080	1155	0
агломерат НКГЗК-2	0	0	1075
окатиші ПівнГЗК	506	572	655
вапняк	90	80	0
Основність шлаку, од.	1,25	1,25	1,25
Якість коксу, %: зола	10,1	10,1	10,1
сірка	1,63	1,75	1,73
M ₂₅	90,0	87,6	88,0
M ₁₀	4,7	5,9	5,9
+80 мм	3,8	4,2	4,1
-25 мм	3,1	3,3	2,2
Фракція 0-5 мм, %: агломерат ПівдГЗК	21,8	22,07	–
агломерат НКГЗК-2	–	–	10,5
окатиші ПівнГЗК	5,07	5,3	6,1
Середньозважена фракція 0-5 мм, %	16,44	16,52	8,8
Кінетична енергія комбінованого дуття, кДж/с	53,5	51,5	64,5
Енергія тиску комбінованого дуття, кДж/с	1897,5	1973,1	2215
Повна механічна енергія комбінованого дуття, кДж/с	1951	2024,6	2279,5
Вихід горнового газу, $\text{м}^3/\text{с}$	109,5	113,5	115,4
Теоретична температура горіння, °С	1930	1968	2129
Енергія тиску горнового газу, кДж/с	3891	4103,6	4472,3
Повна механічна енергія горнового газу, кДж/с	3944,5	4155,1	4536,8

Однак, як показали подальші дослідження роботи доменної печі №8 на якісному агломераті у різні періоди з 1977 року по 2018 рік, відносити весь позитивний ефект, отриманий у перший період використання агломерату НКГЗК-2, тільки на рахунок високої якості агломерату невірно. Первинному завантаженню в піч №8 агломерату НКГЗК-2 передувала установка на печі фурм діаметром 207 мм через одну при чередуванні з фурмами діаметром 190 мм. При переведенні роботи печі з фурм діаметром 190 мм на чередування фурм діаметром 190/207 мм при використанні агломерату ПівдГЗК відбувся перерозподіл газового потоку, що характеризувався збільшенням кількості газу, який проходить по периферійній і осьовій зонам печі, що відповідає незначному одночасному розкриттю периферії і центру. А при подачі на піч агломерату НКГЗК-2 відбулося підвантаження периферії і значне розкриття центру печі. Пояснюється це підвищенням газопроникності шихти, а також збільшенням повних механічних енергій комбінованого дуття (на 8,8 %) і горнового газу (на 17,6 %), що відповідають за довжину зони горіння і за глибину проникнення газового потоку до центру горна доменної печі, відповідно. Це поліпшило рівномірність розподілу газового потоку по перетину доменної печі і дозволило збільшити активну площу зон горіння в найбільш навантаженій залізородними матеріалами периферійній зоні печі. Остання обставина додатково розширила можливості збільшення питомої продуктивності доменної печі при поліпшенні показників якості шихтових матеріалів.

Таким чином, дослідження роботи печей об'ємом 2700 і 2000 м³ на просіяному, звільненому від дріб'язку охолодженому агломераті і при використанні коксу з високим показником післяреакційної міцності ($CSR > 54\%$) підтвердили відомий факт залежності продуктивності печей і витрати коксу не тільки від якості шихтових матеріалів, а й від розподілу газового потоку по перетину печі. Зокрема встановлено, що чередування фурм різного діаметру додатково сприяє посиленню позитивного ефекту за рахунок розширення зон горіння в горні печі. А якщо при цьому зростає повна механічна енергія горнового газу і збільшується глибина проникнення горнового газу до вісі печі, ефект від використання високоякісної сировини може бути максимальним, особливо при вдуванні у доменну піч ПВП.

З урахуванням наведеного, далі були виконані дослідження роботи доменних печей на неоптимальних повних енергіях потоків комбінованого дуття і горнового газу. Аналіз роботи печі об'ємом 5000 м³ АМКР на неоптимальних середніх значеннях повних енергій потоків комбінованого дуття і горнового газу (навіть без урахування коливань по фурмам, що додатково ускладнило ситуацію) було виконано, коли на печі сталася велика аварія, причиною якої став схід гарнісажу з заплечиків в горн в умовах втрати робочого об'єму горна через тривалу роботу печі на всіх 42 відкритих повітряних фурмах. Витрата дуття в цей час знижувалася до 4955 м³/хв., що є неприйнятним для печей з діаметром горна 14,7 м. Робочий об'єм горна печі зменшився через утворення в його центрі "тотерману", оскільки потік горнових газів втратив свою повну механічну енергію і не забезпечував необхідний рівень температур в центрі горна, при яких шлак знаходиться в рухливому стані.

Виконані дослідження основних енергетичних комплексних показників комбінованого дуття та горнового газу в двох періодах роботи печі (перший період – жовтень 2006 року, який був кращим з 2000 року, і другий період – травень 2011 року –

перед аварією) показали, що продуктивність печі у другому періоді знизилася з 9826 до 4760 т/добу, інтенсивність плавки знизилася з 838,7 до 407 кг/(м³·добу), витрата дуття на печі знизилася з 7812 до 4955 м³/хв., а тиск дуття – з 337 до 195 кПа. Розрахункові параметри дуттьового режиму у другому періоді різко знизилися: $E_{\text{пм кд}}$ – з 2034 до 1329,2 кДж/с; $E_{\text{пм гт}}$ – з 5113,7 до 2432,7 кДж/с. Це вказує на значне зниження довжини зони горіння і посилення периферійного ходу газів, що і стало основною причиною аварії на печі.

Аналогічні дослідження провели для доменної печі №7 об'ємом 2000 м³ АМКР, яка також працювала на неоптимальних значеннях повних енергій потоків комбінованого дуття і горнового газу. Тут також мало місце зниження повної механічної енергії комбінованого дуття на 28,4 % і повної механічної енергії горнового газу на 30,9 % від оптимальних значень, що стало причиною сильно розвиненого периферійного газового потоку. Це призвело до передчасного руйнування футеровки, горіння холодильників, розривів кожуху печі, а також до утворення в осьовій зоні печі “тотерману”, що і не дозволило при зупинці печі на капітальний ремонт випустити “козловий” чавун.

Таким чином встановлено, що в залежності від умов роботи печі існують граничні значення повної енергії потоку комбінованого дуття в фурмі і повної енергії потоку горнового газу. При вкрай низьких значеннях цих параметрів нормальний газорозподіл в горні неможливий – кокс лежить перед фурмами, центр печі погано обробляється газами, температури в центрі горна падають, рівність ходу печі порушується. При надмірних значеннях цих параметрів порушується нормальна робота периферії, найбільшого за площею і рудним навантаженням перетину печі, виникає надмірно інтенсивний газовий потік у центрі.

У п'ятому розділі виконані дослідження впливу нерівномірності витрати дуття та комплексних параметрів дуттьового режиму по фурмах на продуктивність печі і питому витрату коксу в доменній плавці з метою вдосконалення методів підвищення рівномірності розподілу параметрів доменної плавки по колу печі.

Тривалі спостереження за розподілом дуття по фурмам, проведені на багатьох металургійних заводах, у тому числі і на доменній печі №9 об'ємом 5000 м³, показали, що витрати дуття по фурмах змінюються в значних межах (115-300 м³/хв.), температура дуття між окремими фурмами відрізняється на 150-250 °С, а теоретична температура горіння палива – максимально на 508 °С (1772-2280 °С).

Досвід роботи печі №9 показав, що значну нерівномірність розподілу дуття по фурмам не вдалося усунути ні установкою безконусного засипного апарату, який поліпшує розподіл шихти по колу доменної печі, ні збільшенням кількості повітряних фурм, які підвищили рівномірність розподілу дуття по колу печі, ні навіть установкою фурм меншого діаметру з боку, протилежного зчленуванню прямого повітропроводу з кільцевим.

На рис. 5-8 наведені діаграми коливань виходу горнового газу, теоретичної температури, повної механічної енергії потоку комбінованого дуття по фурмах і повної механічної енергії потоку горнового газу перед фурмами доменної печі об'ємом 5000 м³.

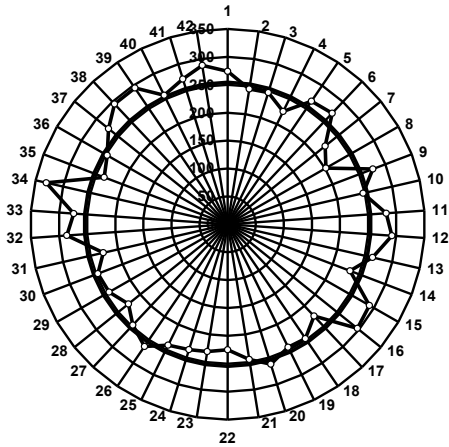


Рис. 5. Діаграма зміни виходу горнового газу

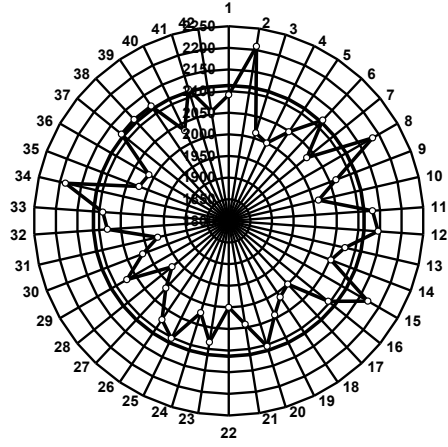


Рис. 6. Діаграма зміни теоретичної температури горіння палива

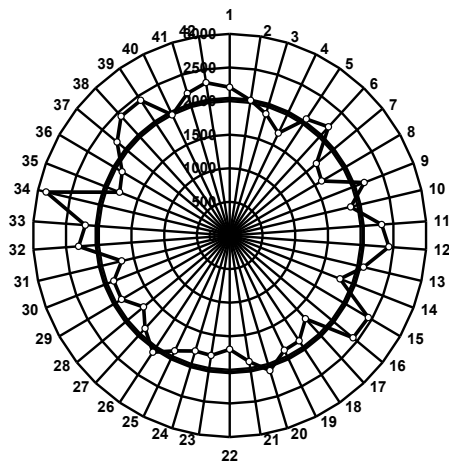


Рис. 7. Діаграма зміни повної механічної енергії комбінованого дуття

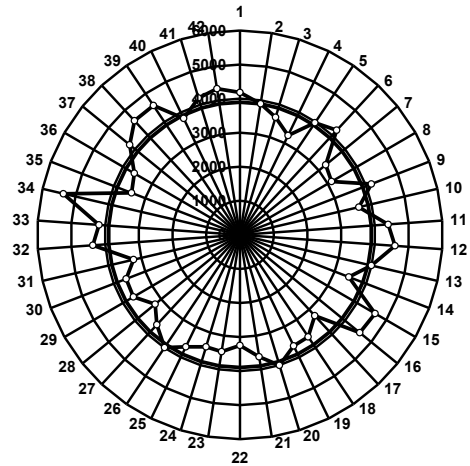


Рис. 8. Діаграма зміни повної механічної енергії потоку горнового газу

Для визначення впливу нерівномірності витрати дуття по фурмах, повної енергії потоку комбінованого дуття на зрізі фурми, а також теоретичної температури горіння коксу, виходу горнового газу і повної енергії потоку горнового газу перед кожною фурмою на продуктивність і питому витрату коксу виконана редукція до елементарних властивостей досліджуваного процесу шляхом побудови моделі $Y = F_i(X_i)$, $i = 1, n$, яка описує залежність вихідного показника Y від кожного з n вхідних параметрів X .

За результатами аналізу впливу змін (нерівномірності) були отримані такі залежності продуктивності печі і питомої витрати коксу від наведених вище вхідних параметрів:

$$\Pi = -120,69 \cdot V_{\sigma}(Q_{\text{д}}) + 13464 \quad k = -0,96 \quad (3)$$

$$\Pi = -7,1189 \cdot [V_{\sigma}(E_{\text{пм кд}})]^2 + 547,8 \cdot V_{\sigma}(E_{\text{пм кд}}) + 1027,3 \quad k = 0,40 \quad (4)$$

$$\Pi = -4,6314 \cdot [V_{\sigma}(T_{\text{т}})]^2 + 282,86 \cdot V_{\sigma}(T_{\text{т}}) + 6908,2 \quad k = 0,51 \quad (5)$$

$$\Pi = -10,178 \cdot [V_{\sigma}(Q_{\text{гт}})]^2 + 613,4 \cdot V_{\sigma}(Q_{\text{гт}}) + 2043,8 \quad k = 0,24 \quad (6)$$

$$\Pi = -7,5386 \cdot [V_{\sigma}(E_{\text{пм гт}})]^2 + 550,8 \cdot V_{\sigma}(E_{\text{пм гт}}) + 1374,4 \quad k = 0,34 \quad (7)$$

$$K = 0,8996 \cdot V_{\sigma}(Q_d) + 466,98 \quad k = 0,93 \quad (8)$$

$$K = 0,6606 \cdot V_{\sigma}(E_{\text{пм кд}}) + 470,42 \quad k = 0,93 \quad (9)$$

$$K = 0,4419 \cdot V_{\sigma}(T_T) + 481,76 \quad k = 0,98 \quad (10)$$

$$K = 0,6448 \cdot V_{\sigma}(Q_{\text{г}}) + 470,51 \quad k = 0,96 \quad (11)$$

$$K = 0,6448 \cdot V_{\sigma}(E_{\text{пм гг}}) + 474,85 \quad k = 0,97 \quad (12)$$

Значимість і адекватність моделей була перевірена за F-критерієм Фішера. Високі значення коефіцієнтів кореляції говорять про дуже сильний прямопропорційний взаємозв'язок витрати коксу з нерівномірністю параметрів дуттьового режиму. Результати обліку впливу коефіцієнтів варіації параметрів режиму дуття при їх зміні на 1 % на продуктивність і питому витрату коксу наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Вплив варіації технологічних факторів на продуктивність і питому витрату коксу

Зниження коефіцієнта варіації на 1 %	Продуктивність, %	Питома витрата коксу, кг/т
Q_d	+1,10	-0,97
$E_{\text{пм кд}}$	+0,70	-0,72
T_T	+0,79	-0,46
$Q_{\text{г}}$	+0,89	-0,73
$E_{\text{пм гг}}$	+0,72	-0,65

Виконані дослідження показали, що при високій нерівномірності витрати дуття по фурмах неможливо знизити нерівномірність теоретичної температури, виходу горнового газу і двох повних енергій при будь-яких варіантах зміни абсолютних значень витрат природного газу, кисню і пари, зміни температури природного газу і температури дуття. Тому, незважаючи на відомий досвід і складність здійснення автоматичного контролю і регулювання витрати дуття по фурмах, реалізація такої системи з контролем також і температури дуття на кожній фурмі є досить перспективною. Враховуючи сказане, в дисертаційній роботі були проаналізовані шляхи підвищення рівномірності розподілу дуття по колу горна доменної печі.

В даний час система контролю і регулювання витрати дуття по фурмах доменної печі не експлуатується ні на одній доменній печі. Основними причинами цього є низька стійкість і надійність вимірювальних сопел. З метою підвищення стійкості і надійності роботи сопла в системі вимірювання витрати дуття по фурмах доменної печі був розроблений пристрій на теплових трубках (рис. 9), які за рахунок інтенсивного відводу теплоти захищають сопло від термічної деформації при забезпеченні сталості встановленого значення коефіцієнту опору сопла.

Зовнішня сторона вимірювального сопла, виконаного з жароміцної сталі, жорстко з'єднана з каркасом випарників теплових трубок, конденсатори яких виведені в кільцевий охолоджувач. Разом з вимірюванням витрати дуття по фурмах доменної печі важливим технічним завдання є оперативне її регулювання. З метою підвищення стійкості і надійності роботи дросельної заслінки був розроблений пристрій для регулювання витрати дуття по фурмах доменної печі (рис. 10), який включає охоло-

джувану через вал з порожниною дросельну заслінку типу прапорця, встановлену в розточці нижнього фланця рухомого коліна фурменого повітровоу. Особливість пристрою полягає в тому, що в корпус дросельної заслінки також вбудовані випарники теплових трубок, а їх конденсатори виведені в порожнину приводного валу, який охолоджується водою.

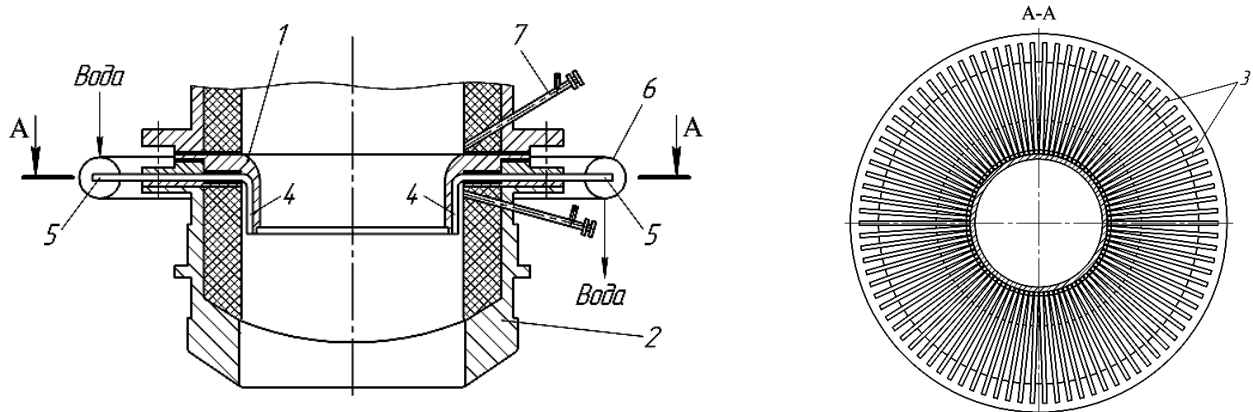


Рис. 9. Нерухомий патрубок фурменого повітровоу з вимірювальним соплом
1 – вимірювальне сопло, 2 – нерухомий патрубок фурменого повітровоу, 3 – каркас з випарників,
4 – теплові трубки, 5 – конденсатори, 6 – кільцевий охолоджувач, 7 – імпульсні трубки

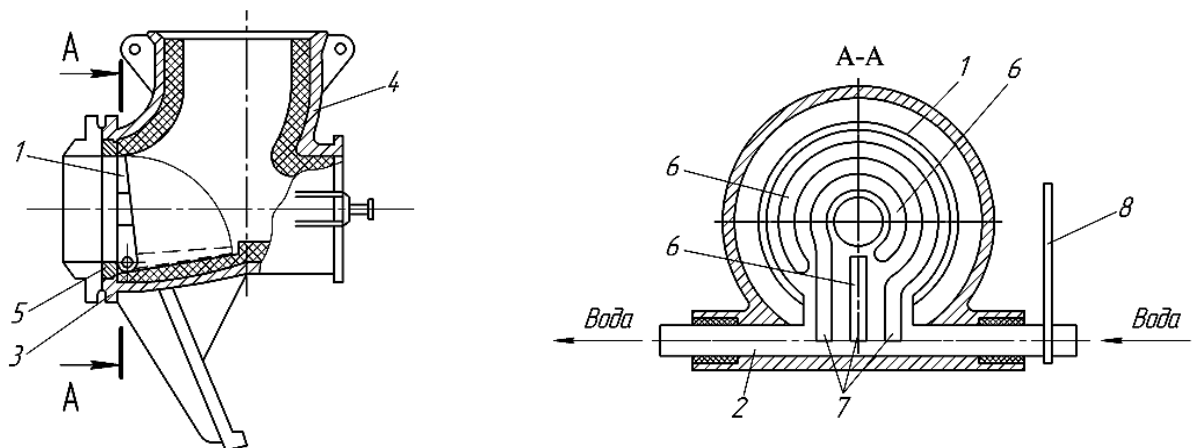


Рис. 10. Рухоме коліно фурменого повітровоу з розробленим пристроєм
для регулювання витрати дуття по фурмах доменної печі
1 – дросельна заслінка типу прапорця, 2 – вал, 3 – нижній фланець,
4 – рухоме коліно фурменого повітровоу, 5 – сідло, що служить для обмеження руху дросельної
заслінки, 6 – випарники теплових трубок, 7 – конденсатори теплових трубок
8 – важіль для повороту дросельної заслінки

Підвищення стійкості і надійності роботи пристроїв для вимірювання витрати дуття по фурмах доменної печі та для регулювання витрати дуття по фурмах, в свою чергу, сприяє надійній роботі системи контролю та регулювання витрати дуття по фурмах доменної печі, яка дозволяє ліквідувати окружну нерівномірність газорозподілу в доменній печі, стабілізувати тепловий та газодинамічний режими доменної плавки з відповідним зростанням продуктивності печі, істотним зниженням питомої витрати коксу і зносу футерівки доменної печі.

Для повного забезпечення рівномірності усіх показників дуттьового потоку перед кожною фурмою необхідно, окрім витрати дуття, забезпечити також рівномірний розподіл температур дуття по фурмах доменної печі, що через неефективну конструкцію змішувача холодного дуття з гарячим поки зробити неможливо. Але якщо використовувати розроблений і широко випробуваний на “Криворіжсталі” спосіб ведення доменної плавки при закритому клапані-змішувачі на прямому повітропроводі гарячого дуття, то і ця проблема вирішується.

Вибір технологічних режимів доменної плавки вимагає обов’язкової узгодженої оптимізації параметрів завантаження і дуття, що визначає як продуктивність доменної печі, так і питому витрату коксу. Оцінюючи значення окремих регульованих параметрів доменної плавки у взаємопов’язаному підборі оптимальних режимів завантаження і дуття, слід визначити, що провідним параметром оптимізації доменної плавки є розподіл шихтових матеріалів на колошнику. Саме він, у першу чергу, визначає, з одного боку, ступінь використання газу і питому витрату коксу, а з іншого боку, – газопроникність стовпа шихти і можливість інтенсифікації доменної плавки. У той же час ступінь використання газу залежить, головним чином, від ступеня розтягнутості “рудного гребеня” на периферії та рудного навантаження в центральній зоні колошника доменної печі.

З метою збільшення продуктивності печі доменного цеху №1 АМКР і зниження витрати коксу за рахунок розширення можливостей управління розподілом шихтових матеріалів по радіусу колошника доменної печі двохконусним завантажувальним пристроєм з пелюстковим розподільником шихти (ПРШ) або калібратором Тарасова (КТ) була розроблена конструкція колошника печі з відбійними решітками (рис. 11). Конструкція включає литі плити колошника з відбійними решітками, встановленими під кутом до горизонту, більшим за кут тертя коксу об матеріал відбійної решітки, причому розміри отворів відбійної решітки виконуються з урахуванням реального гранулометричного складу шихтових матеріалів, і дозволяють просипатися крізь них дрібному агломерату, але затримують і направляють до центру печі крупні куски коксу, що дозволяє організувати в центрі колошника коксову “віддушину”.

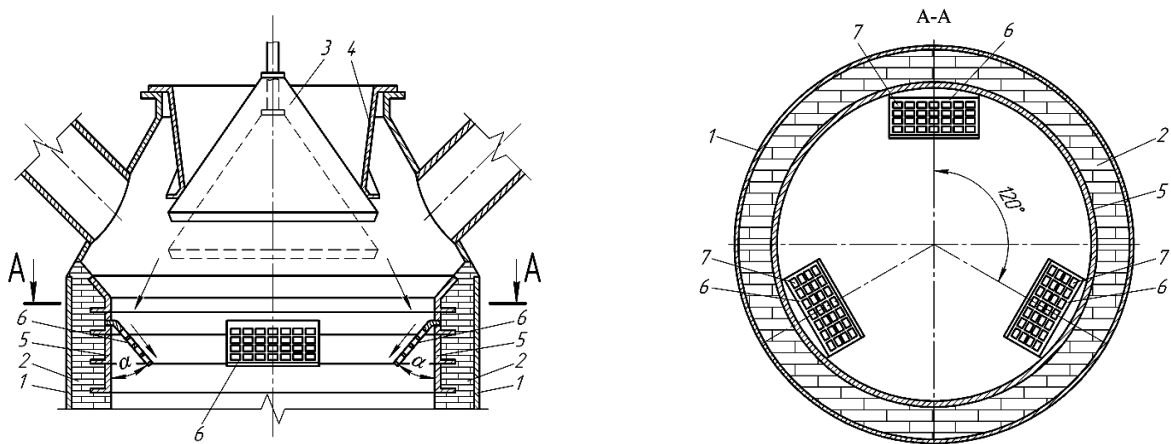


Рис. 11. Загальний вид колошника з засипним апаратом доменної печі

1 – кожух, 2 – вогнетривка футеровка; 3 – великий конус, 4 – чаша великого конусу, 5 – сталеві литі плити, 6 – відбійна решітка, 7 – отвори решітки

У подальших дослідженнях розроблена конструкція колошника доменної печі була вдосконалена за рахунок того, що литі плити колошника запропоновано забезпечити рухливими відбійними решітками та приводами їх переміщення у вигляді гідроциліндрів, як це показано на рис. 12.

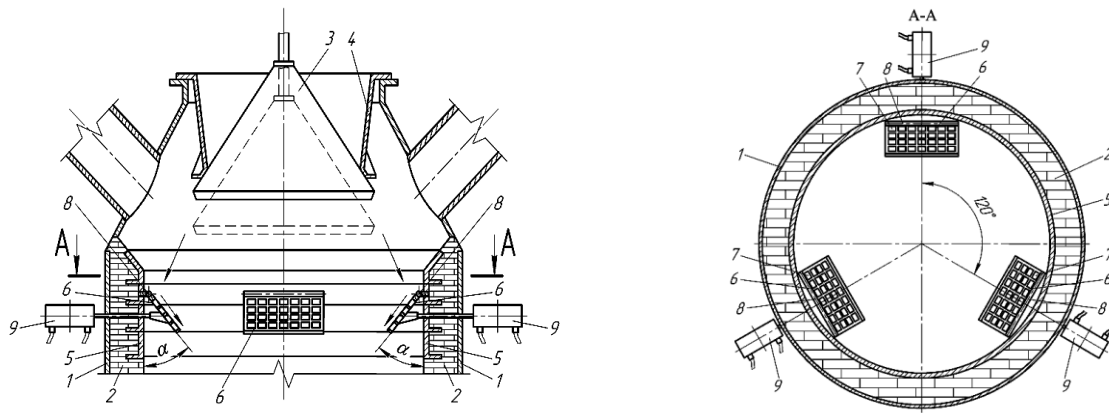


Рис. 12. Загальний вид колошника з засипним апаратом доменної печі

1 – кожух, 2 – вогнетривка футеровка; 3 – великий конус, 4 – чаша великого конусу, 5 – сталеві литі плити, 6 – відбійна решітка, 7 – отвори решітки, 8 – вісь підвісу решітки, 9 – гідроциліндр

За рахунок розширення можливостей керування розподілом шихтових матеріалів по радіусу колошника печі двохконусним завантажувальним пристроєм з ПРШ або КТ, встановленим на печах №6-8 АМКР, можна підвищити продуктивність доменної печі при зниженні питомої витрати коксу.

В сучасних умовах доменної плавки для забезпечення достатнього прогріву центру горна і рівного ходу печі при завантаженні шихти в піч часто формують осьову “віддушину” оптимальної величини з рівнем рудного навантаження на кокс, зазвичай від 0 до 2 т/т. Однак без раціонального розподілу газового потоку по радіусу горна печі, який залежить від параметрів газо-дуттьового потоку і розмірів зон горіння, забезпечити достатній прогрів центру горна, що перешкоджає утворенню “тотерману”, складно. Правильно організований розподіл шихтових матеріалів “зверху” і газового потоку “знизу” вирішальним чином впливає на раціональний розподіл температур по радіусу і окружності горна доменної печі, на форму і розташування зони розм’якшення шихти, на хімічний склад і фізичний стан матеріалів і продуктів плавки, на рівномірність сходу шихти, на ступінь використання теплової та хімічної енергії газового потоку, і як наслідок, дозволяє забезпечити зниження питомої витрати коксу і зростання продуктивності печі.

Параметрами, які дозволяють найкращим чином узгоджувати заходи впливу на хід печі “зверху” і “знизу”, є рудне навантаження на кокс по радіусу колошника доменної печі і повна механічна енергія горнового газу, яка визначає глибину проникнення газового потоку до центру горна доменної печі і забезпечує необхідний рівень температур в осьовій зоні горна. Знайдені експериментально оптимальні характеристики цих двох параметрів можуть в процесі подальшої експлуатації взаємно коригуватися при зміні умов роботи доменної печі. Реалізується запропонована методика шляхом визначення оптимальних значень повної механічної енергії горнового газу і радіусу осьової “віддушину” для конкретних умов роботи доменної печі з високою

продуктивністю і низькою витратою коксу. Далі, у разі потреби, здійснюється взаємне регулювання радіусу осьової “віддушини” і величини повної енергії горнового газу. При цьому, наприклад, у разі появи можливості збільшення повної енергії горнового газу вище попередньо визначеної, радіус осьової “віддушини” зменшують, а при зменшенні повної енергії горнового газу – збільшують. В середньому при зміні величини повної механічної енергії горнового газу на 100 кДж/с радіус осьової “віддушини” коригують у відповідному напрямку на 0,06 м. Така методика коригувань пройшла успішну перевірку на доменній печі корисним об’ємом 5000 м³ АМКР.

У шостому розділі виконане теоретичне обґрунтування особливостей ведення доменної плавки при вдуванні в піч ПВП, для чого спочатку були проаналізовані досвід впровадження та проблеми освоєння технології вдування ПВП на печі №9 АМКР об’ємом 5000 м³. Протягом 2016-2017 років витрата ПВП на печі змінювалася від 73,7 до 86,0 кг/т чавуну при зниженні середньорічного значення добової продуктивності з 8348 до 7197 т/добу і зменшенні питомої витрати коксу з 444 до 413 кг/т чавуну. У березні-квітні 2018 року на печі сталася аварія, яка призвела до проривання горна і викидання з печі рідких продуктів плавки, тому показники роботи печі в 2018 році в роботі не аналізувалися (табл. 7).

Таблиця 7 – Техніко-економічні показники роботи доменної печі об’ємом 5000 м³ в період освоєння технології ПВП

Показники	Періоди			
	2016	2017	2018	6 міс. 2019
Тривалість періоду, діб	365	365	365	181
Витрата ПВП, кг/т	73,7	86,0	30,2	74,8
Продуктивність, т/добу	8348	7197	6084	7039
Витрата коксу (К), кг/т	444,8	413,3	472,1	437,9
Інтенсивність горіння (К+ПВП+КО), кг/м ³ ·добу	871	718,7	611,2	721,8
Дуття: витрата, м ³ /хв.	7415	6086	5556	4630
тиск, кПа (надл.)	306	233	219	180
температура, °С	985,7	1054	998	1008
Витрата природного газу, м ³ /т	10,6	26,8	33,0	17,7
Вміст кисню в дутті, %	23,6	24,5	23,1	23,2
Колошниковий газ: тиск, кПа (надл.)	121	54	0,68	65
температура, °С	134	108	158	112
вміст %: CO	23,4	22,9	22,1	24,4
CO ₂	21,1	19,9	18,4	16,8
H ₂	3,76	5,7	4,2	4,07
Ступінь використання CO, д.од	0,47	0,46	0,45	0,41
Аналіз чавуну, %: Si	0,78	0,81	0,97	0,85
S	0,014	0,013	0,013	0,015
Вихід шлаку, кг/т	428,7	449,9	408,5	410,3
Якість коксу, %: волога	4,1	4,4	3,8	4,19
зола	10,2	10,8	11,5	11,6
сірка	0,5	0,56	0,47	0,47
M ₂₅ /M ₁₀	88,3/6,5	86,6/6,8	86,7/7,2	86,9/6,3
+80 мм	5,7	5,1	5,6	4,56
CSR/CRI	60,6/29,9	56,0/33,7	51,7/38,1	53,5/37,4

Досвід роботи доменної печі №9 АМКР показав, що впровадження і ефективна реалізація технології доменної плавки при вдуванні ПВП потребує подальших теоретичних досліджень з метою раціоналізації технологічних параметрів плавки. З цією метою в дисертаційній роботі були розроблені методики визначення повної енергії потоку горнового газу з урахуванням вдування пиловугільного палива та траєкторії потоку горнового газу, які дозволили дати наукове пояснення причин посилення периферійного потоку газу при заміні природного газу (ПГ) на ПВП.

Для розрахунку повної механічної енергії потоку горнового газу з вдуванням в фурми доменної печі пиловугільного палива і природного газу скористалися рівнянням (2), підставивши в формулу позначення виходу горнового газу і теоретичної температури при вдуванні ПВП:

$$E_{\text{пмгг}} = 371,2 \frac{Q_{\text{оггпугт}} \cdot T_{\text{тпугт}}}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{\text{од}} \cdot Q_{\text{од}}^3 \cdot T_{\text{д}}^2}{n^3 \cdot S_{\text{ф}}^2 \cdot P_{\text{д}}^2}, \text{ Дж/с}, \quad (13)$$

де $Q_{\text{оггпугт}}$ – вихід горнових газів при вдуванні ПВП спільно з природним газом, $\text{м}^3/\text{с}$; $T_{\text{тпугт}}$ – теоретична температура в зоні горіння при вдуванні ПВП, К.

Виведені комплексні формули для розрахунку теоретичної температури і виходу горнового газу при спільному використанні ПВП і природного газу дозволяють розраховувати їх значення і при окремому їх використанні.

Методичний підхід до визначення теоретичної температури горіння по контрольованих параметрах дуття при вдуванні в горн доменної печі ПГ та ПВП заснований на стехіометричних співвідношеннях і даних технічного аналізу палива. З урахуванням теплоємності газів летючих речовин вугілля, які виділяються, газу-носія ПВП (азоту) і теплоти, що витрачається на шлакоутворення з золи ПВП, загальне рівняння для розрахунку теоретичної температури горіння при вдуванні в горн печі природного газу та ПВП може бути представлено в наступному вигляді:

$$T_{\text{т}} = 273 + \frac{1700 \cdot Q_{\text{ог}} + 10521,9 \cdot O_2 \left[Q_{\text{од}} - Q_{\text{ог}} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] + 1,4 \cdot Q_{\text{од}} \cdot t_{\text{д}} + \dots}{1,5 \cdot \left\{ \left(3 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) Q_{\text{ог}} + \left(2 + \frac{1 - O_2}{O_2} \right) \cdot \left[Q_{\text{од}} - Q_{\text{ог}} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] O_2 + 1,5 \cdot Q_{\text{од}} \cdot \phi \right\} + \dots} \dots \quad (14)$$

$$\dots \frac{+ 2340 \cdot O_2 \left[Q_{\text{од}} - Q_{\text{ог}} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) - 0,67 \cdot m_{\text{пугт}} \right] - 10806 Q_{\text{од}} \cdot \phi - C_{\text{шл}} \cdot A_{\text{пугт}} \cdot m_{\text{пугт}}}{+ (1,42 \cdot Q_{\text{N}_2} + 2,252 \cdot V^c) \cdot m_{\text{пугт}}},$$

де 1700 – середній тепловий ефект реакції горіння 1 м^3 природного газу, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $Q_{\text{ог}}$ – витрата природного газу, $\text{м}^3/\text{с}$; 10521,9 – тепловий ефект горіння вуглецю на 1 м^3 кисню; O_2 – вміст кисню в сухому дутті, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $Q_{\text{од}}$ – приведена до нормальних умов витрата дуття, $\text{м}^3/\text{с}$; 1,4 – середня теплоємність дуття в інтервалі температур 1000-1200 °С, $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$; $t_{\text{д}}$ – температура дуття, °С; 0,67 – вміст вуглецю у газовому вугіллі, д. од.; $m_{\text{пугт}}$ – витрата пиловугільного палива, $\text{кг}/\text{с}$; 10806 – тепловий ефект дисоціації води, $\text{кДж}/\text{м}^3$; ϕ – вологість дуття, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $C_{\text{шл}}$ – теплоємність шлаку, що утворюється при плавленні золи ПВП, $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{град}$, (в розрахунку прийнята $C_{\text{шл}} = 1700 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$); $A_{\text{пугт}}$ – вміст золи в ПВП, д.од.; 1,5 – теплоємність горнового газу, $\text{кДж}/\text{м}^3 \cdot \text{град}$; 1,42 – середня теплоємність азоту в інтервалі температур 100-

1227 °С, кДж нм³·град; Q_{N_2} – питома витрата азоту-носія, м³/кг ПВП; 2,252 – середня теплоємність сухого коксового газу в інтервалі температур 800-1227 °С, кДж/нм³·град, що визначається за складом газу і середніми теплоємностями компонентів; V^c – вихід летючих речовин вугілля, д.од.

Загальне рівняння для розрахунку виходу горнового газу при горінні природного газу та ПВП можна знайти з виразу, в якому враховується вихід водню з ПВП ($k_{\text{пвт}} = 0,42 \div 0,48$ м³/кг) і об'єм азоту-носія, що вдувається в піч – Q_{N_2} , м³/с:

$$Q_{\text{огт пвт}} = Q_{\text{од}}[2O_2 + (1 - O_2) + 1,5 \cdot \varphi] + k_{\text{пвт}} \cdot Q_{\text{ог}} + (k_{\text{пвт}} + Q_{N_2}) \cdot m_{\text{пвт}}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (15)$$

Виконані заміри витрати ПВП по фурмах доменної печі №9 об'ємом 5000 м³ та розрахунки повної механічної енергії потоку горнового газу при вдуванні ПВП наведені на рис. 13.

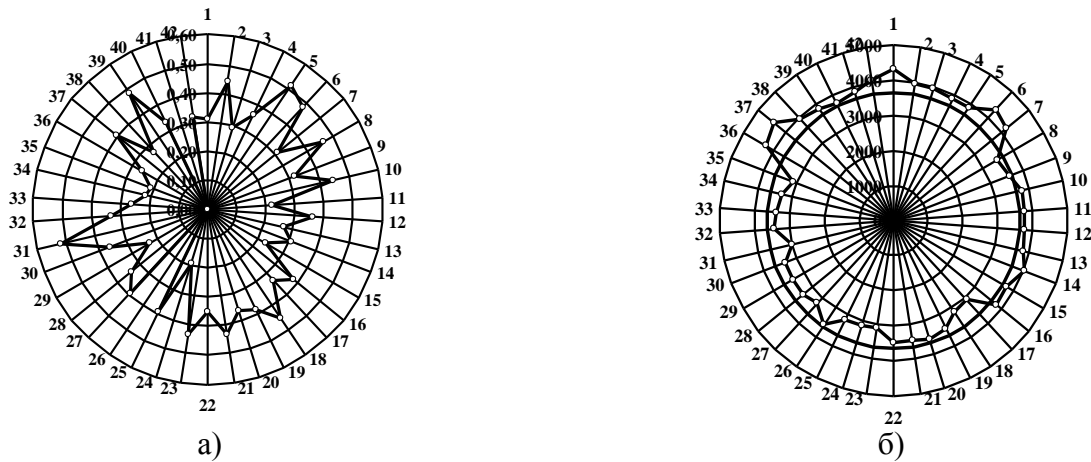


Рис. 13. Діаграми зміни витрати ПВП (а) і повної механічної енергії потоку горнового газу (б) по фурмам печі об'ємом 5000 м³ при вдуванні ПВП

Нерівномірні витрати дуття і ПВП по фурмах доменної печі призводять до значної нерівномірності повних енергій потоків горнового газу і, відповідно, – глибини проникнення газового потоку до центру горна, від чого залежить робота доменної печі, тим більше, при вдуванні ПВП. На цій основі можливе вирішення практичних завдань щодо оптимізації дуттьових параметрів плавки при вдуванні ПВП.

У ході подальших досліджень з метою підвищення ефективності використання ПВП в доменній плавці була розроблена методика визначення зміни траєкторії газового потоку в нижній зоні печі при переході з вдування природного газу на вдування ПВП, що дозволяє більш повно здійснювати оцінку і регулювання розмірів зон горіння перед фурмами печі і газорозподілу по радіусу нижньої зони печі.

Для відповіді на питання, як змінюється траєкторія руху потоку газу після витікання дуття з фурми доменної печі при заміні ПГ на ПВП, спочатку визначили траєкторію вісі потоку дуття, що виходить з фурми, з використанням аналітичного методу дослідження траєкторій руху газу Лагранжа. Для цього в центрі О на зрізі повітряної фурми (рис. 14) розташували початок координатних осей Х і Y. У зазначеній точці О подумки помістили частку газу, що має масу m і рухається зі швидкістю v . Рух частинки по вісі Х можна розглядати як результат руху під дією сили, зумовленої роботою із проштовхування частки через шар шихти від фурми до центру печі за відрахуванням сили тертя частинок об шар шихти.

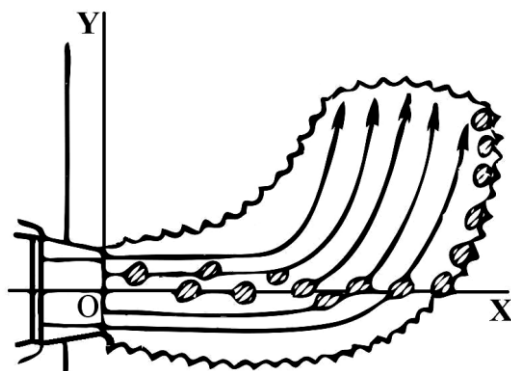


Рис. 14. Конфігурація фурменого вогнища

Тоді величину прискорення по вісі X можна визначити за рівнянням:

$$a_x = 287 \frac{T_d - T_{ц}}{R_r (1 + \lambda_x)} + 111092,7 \frac{Q_{од}^2 \cdot T_d^2}{n^2 \cdot d_{\phi}^4 \cdot P_d^2 \cdot R_r \cdot (1 + \lambda_x)}, \text{ м/с}^2, \quad (16)$$

де T_d – температура дуття, К; $T_{ц}$ – температура газу в центрі горна, К; $Q_{од}$ – нормальна об'ємна витрата дуття, виміряна приладами на печі, $\text{м}^3/\text{с}$; R_r – радіус горна, м; λ_x – коефіцієнт тертя; n – кількість повітряних фурм; d_{ϕ} – діаметр фурми, м; P_d – абсолютний тиск дуття, Па.

Рух частинки по вісі Y можна розглядати як результат руху під дією: сили, зумовленої роботою із проштовхування частки через шар шихти від горна до колошника печі; підйомної сили, зумовленої різницею у щільності газу в горні і на колошнику за відрахуванням сили тертя частинок об шар шихти і ваги частинки. Тоді величину прискорення по осі Y можна визначити за рівнянням:

$$a_y = 294,6 \frac{T_r - T_k}{H} + 9,8 \left(\frac{T_r \cdot P_k}{T_k \cdot P_r} - 1 \right) - \lambda_y - 1, \text{ м/с}^2, \quad (17)$$

де T_r – теоретична температура горіння, К; T_k – температура колошника, К; P_r і P_k – абсолютний тиск газу в горні і на колошнику, Па; λ_y – коефіцієнт тертя.

Для знаходження траєкторії всього газового потоку необхідно визначити профіль його швидкості на зрізі фурми на підставі закону розподілу усереднених швидкостей в турбулентному ядрі потоку:

$$v_y = v_{\max} - 5,75 \cdot \sqrt{\frac{\tau_{\max}}{\rho_d}} \cdot \lg \cdot \frac{r_{\phi}}{y}, \text{ м/с}, \quad (18)$$

де v_y – швидкість частинки в певній точці вихідного перетину фурми, м/с; τ_{\max} – дотичне напруження у стінки фурми, Н/м^2 ; r_{ϕ} – радіус фурми, м; y – відстань від стінки фурми до даної точки, м.

Побудувавши певну кількість траєкторій різних точок профілю швидкості на зрізі повітряної фурми, отримаємо траєкторію всього потоку газу. Однак для візуалізації форми потоку газу досить побудувати траєкторії, що відповідні зовнішнім його границям. В роботі виконаний порівняльний аналіз техніко-економічних показників роботи печі об'ємом 5000 м^3 при приблизно однаковій інтенсивності доменної плавки в кращий період її роботи при вдуванні природного газу і при вдуванні ПВП. При

використанні розробленої методики встановлено, що при переході з вдування ПГ на ПВП відбувається зміна траєкторії потоку газу в нижній частині доменної печі, яка супроводжується посиленням периферійного ходу газового потоку (рис. 15).

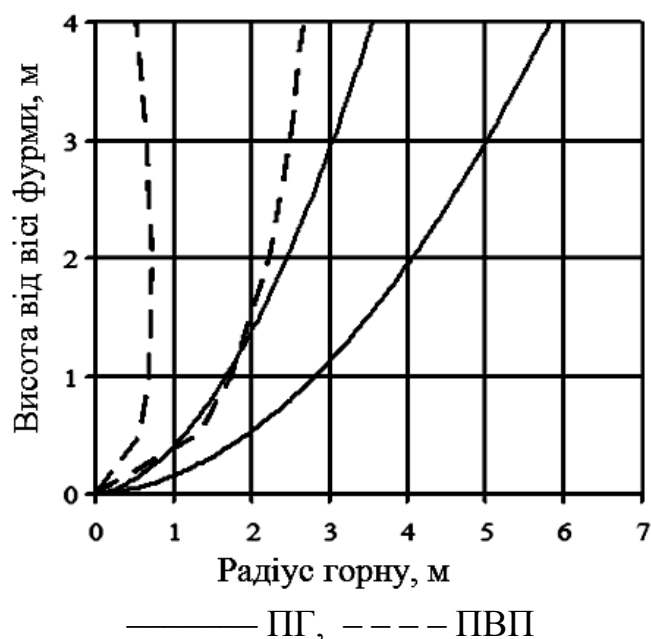


Рис. 15. Траєкторії потоку дуття-газу в доменній печі

Таким чином, при однаковій інтенсивності доменної плавки вдування ПВП, у порівнянні з вдуванням ПГ, сприяє зменшенню довжини зони горіння і розвитку периферійного потоку газу в доменній печі. Для забезпечення раціонального газорозподілу в нижній частині печі необхідно при будь-яких змінах технології доменної плавки контролювати величини повних механічних енергій дуття і горнового газу, що вказують на зміну довжини зони горіння і глибини проникнення горнового газу до центру печі. Усувати причини сильно розвиненого периферійного ходу газового потоку при використанні технології з вдуванням ПВП необхідно шляхом узгодженого управління газодинамікою доменної плавки заходами впливу не тільки “зверху”, а й “знизу”.

У сьомому розділі виконане порівняння ефективності використання технології вдування ПВП та завантаження в доменну піч кускового антрациту на доменній печі №9 об’ємом 5000 м³ АМКР. На печі №9 технологію завантаження кускового антрациту почали освоювати в 2003 році, і при всіх складнощах використання антрациту в шихті такої великої печі спеціально розроблена технологія дозволила в 2005 році вийти на середньорічне завантаження антрациту у кількості 42 кг/т чавуну при витраті коксу 427 кг/т, а в 2006 році середня питома витрата антрациту склала 52 кг/т чавуну. В окремі місяці на цій печі витрата кускового антрациту піднімалася в середньому до 72,8 кг/т, а питома витрата коксу опускалася до 400 кг/т чавуну.

Порівняння роботи печі при середньомісячній витраті антрациту 72,8 кг/т з вдуванням природного газу 27 м³/т і ПВП в кількості 101,1 кг/т показало зниження фактичної питомої витрати коксу з 459,7 до 418,2 кг/т чавуну при вдуванні ПВП. Однак після приведення витрати коксу до однакових умов цей результат дещо нівелювався. Різниця склала всього 1 кг/т, тобто при таких низьких витратах ПВП досягти потен-

ційних переваг технології вдування ПВП перед технологією завантаженням кускового антрациту не вдалося.

Порівняння результатів роботи печі з використанням цих двох технологій в кращий рік використання технології завантаження кускового антрациту (2005 р.) з першим і другим роком освоєння на доменній печі №9 об'ємом 5000 м³ технології вдування ПВП (табл. 8), також поки свідчить не на користь технології вдування ПВП.

Таблиця 8 – Порівняння показників роботи доменної печі об'ємом 5000 м³

Показники	Періоди		
	2005	2016	2017
Продуктивність, т/добу	7469	8348	7197
Приведена продуктивність, т/добу	7469	8334	6985
Витрата коксу (К), кг/т	427,4	444,8	413,3
Приведена витрата коксу, кг/т	427,4	437,7	429,5
Витрата антрациту (А), кг/т	41,7	0	3,46
Витрата ПВП, кг/т	0	73,7	86,0
Інтенсивність горіння (К+А+ПВП+КО), кг/м ³ ·добу	726,7	871	723,7
Дуття: витрата, м ³ /хв.	6798	7415	6086
тиск, кПа (надл.)	322	306	233
температура, °С	1103	985,7	1054
Витрата природного газу, м ³ /т	89,3	10,6	26,8
Вміст кисню в дутті, %	25,8	23,6	24,5
Колошниковий газ: тиск, кПа (надл.)	129	121	54
температура, °С	135	134	107
вміст %: СО	24,2	23,4	22,9
СО ₂	18,0	21,1	19,9
Н ₂	6,3	3,76	5,7
Ступінь використання СО, д. од.	0,43	0,47	0,46
Аналіз чавуну, %: Si	0,90	0,78	0,81
S	0,023	0,014	0,013
Поточні простой / Тихий хід %	4,94/0,16	6,15/0,18	5,4/0,22
Вихід шлаку, кг/т	419	428,7	449,9
Рудне навантаження на кокс, кг/кг	4,10	3,84	4,25
Основність шлаку, од.	1,22	1,14	1,12
Витрата, кг/т: залізна руда	0,8	11,0	9,58
агломерат АЦ №2	1340	1342,7	1586,8
окатиші ПівнГЗК	293,7	272,1	37,6
шлак збагачений	82,0	45,3	43,7
скрап металевий	36,6	12,0	14,27
вапняк	17,6	0,0	0
Якість коксу, %: волога	2,76	4,1	4,37
зола	11,5	10,2	10,8
сірка	1,25	0,5	0,56
M ₂₅	87,0	88,3	86,6
M ₁₀	7,7	6,5	6,8
+80 мм	7,4	5,7	5,1
CSR	38,6	60,6	55,97
CRI	39,2	29,9	33,67
Середньозважена фракція -5 мм, %	7,04	7,35	7,96

Таким чином, технологія заміщення коксу кусковим антрацитом у поєднанні з вдуванням невеликої кількості природного газу дозволяє досягати достатньо низької витрати коксу без використання технології ПВП, яка до того ж пов'язана з високими капітальними витратами. Переваги технології вдування ПВП у порівнянні з технологією завантаження кускового антрациту можуть бути реалізовані при збільшенні витрати ПВП до 200-250 кг/т чавуну і скороченні витрати коксу до 300-350 кг/т чавуну. Виконані наукові узагальнення дозволили зробити висновок, що на доменних печах, де ще не використовується технологія вдування ПВП і де умовами її освоєння повинні бути забезпечення печей коксом і залізородною сировиною високої якості, а також підготовка самої печі і всіх її систем до впровадження ПВП, технологія завантаження в доменні печі кускового антрациту може забезпечити значне зниження витрати коксу і собівартості чавуну. Особливо ця технологія ефективна при обмеженнях продуктивності печей через проблеми з реалізацією готової продукції, коли печі переводять в низькоінтенсивний режим роботи і коли на перший план виходить вирішення проблем економіки цеху та підприємства.

ВИСНОВКИ

На підставі наукових узагальнень, теоретичних розробок і промислових досліджень в дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна проблема вдосконалення доменної плавки за рахунок підвищення ступеня використання теплової та хімічної енергії газового потоку шляхом його раціонального розподілу по поперечному перерізу доменної печі – як “зверху” – управлінням якістю та розподілом шихтових матеріалів на колошнику, так і “знизу” – управлінням параметрами дугтьового потоку та ПВП і формуванням потоку газів в горні.

1. Отримали подальший розвиток дослідження щодо вдосконалення технології виробництва комплексного залізовмісного окускованого матеріалу – офлюсованих локальних спеків із підвищеним вмістом заліза та закатаним твердим паливом, які поєднують найкращі металургійні характеристики агломерату і окатишів: основність – 1,25-1,5 д.од, крупність – 20-60 мм, вміст залишкового вуглецю – 1,6-2,5 %, загального заліза – 63,5-74,8 %, показники міцності на удар і стираності – 93,5-96,4 % і 2,5-3,6 %, відповідно, показники міцності і стійкості до стирання при відновленні – 72,9-93,1 % і 3,3-4,2 %, відповідно. Розрахунковий аналіз роботи доменної печі корисним об'ємом 5000 м³ показав, що використання у доменній плавці тільки двох основних компонентів: коксу та офлюсованих локальних спеків з високими металургійними властивостями, дозволяє зменшити питому витрату коксу та підвищити продуктивність доменної печі за рахунок підвищення вмісту заліза у всій шихті, зменшення вмісту дріб'язку (-5 мм) в шихті, виведення із шихти вапняку та додаткового надходження залишкового вуглецю з локальними спеками.

2. За даними роботи доменних печей ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” за 6-річний період роботи з 2010 по 2016 роки встановлений кількісний та якісний вплив показників якості коксу та їх коливання на питому витрату коксу. На підставі виконаного аналізу зроблено висновок, що якісний вплив цих показників на хід доменної плавки, як і раніше, досить високий. В той же час встановлено, що відомі коефіцієнти суттєво завищують ступінь впливу M_{10} на витрату коксу, знижуючи при цьому

величину впливу +80 мм. Зокрема отримані такі кількісні співвідношення між покращенням показників якості коксу на кожен 1 % та зменшенням питомої витрати коксу: при збільшенні M_{25} в діапазоні 87-90 % витрата коксу на виплавку чавуну знижується на 3,9 кг/т; при зниженні M_{10} в інтервалі від 6 до 8,5 % – на 5,56 кг/т чавуну; при зниженні вмісту фракції +80 мм – на 2,5 кг/т чавуну. Враховуючи високу нестабільність якості коксу, що завантажувався в доменні печі ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг”, в дисертаційній роботі виконані розрахунки впливу коефіцієнтів варіації показників якості коксу при їх зміні на 1 % на коксовий еквівалент при вдуванні в доменну піч ПВП. Зокрема встановлено, що зменшення на 1 % кожного з коефіцієнтів варіації скорочує питому витрату коксового еквіваленту, а саме: $V_{\sigma}(S)$ – на 1,37 кг/т чавуну, $V_{\sigma}(A)$ – на 1,50 кг/т чавуну, $V_{\sigma}(M_{25})$ – на 4,23 кг/т чавуну, $V_{\sigma}(M_{10})$ – на 1,38 кг/т чавуну, $V_{\sigma}(CSR)$ – на 5,33 кг/т чавуну.

3. Виконані дослідження напрямків скорочення питомої витрати коксу, не тільки за рахунок його якості, а й при заміні його дешевшими видами палива, наприклад, кусковим антрацитом, дозволили визначити технологічні особливості та обов’язкові умови удосконалення ведення доменної плавки при завантаженні на колошник кускового антрациту та розробити новий спосіб доменної плавки, який передбачає циклічну зміну питомої витрати антрациту, причому період роботи доменної печі при питомій витраті антрациту 60-70 кг/т чавуну дорівнює 15-30 діб, а період роботи печі при питомій витраті антрациту 80-90 кг/т – 7-12 діб.

4. Дослідження роботи доменних печей об’ємом 2700 і 2000 та 5000 м³ АМКР при зміні якості агломерату та окатишів у поєднанні зі зміною параметрів дуттьового режиму плавки дозволили обґрунтувати технологічні прийоми управління газодинамічним режимом доменних печей в залежності від особливостей шихтових умов її роботи. Показано, що чередування фурм різного діаметру разом з поліпшенням якісних характеристик шихтових матеріалів додатково сприяє посиленню позитивного ефекту за рахунок розширення зон горіння в горні печі. Якщо при цьому зростає повна механічна енергія горнового газу і збільшується глибина проникнення горнового газу до вісі печі, ефект від використання високоякісної сировини стає максимальним. Встановлена доцільність поточного контролю зміни повних механічних енергій комбінованого дуття і горнового газу і порівняння їх значень з показниками, отриманими в кращі періоди роботи печей, з подальшим здійсненням необхідного корегування дуттьового режиму для недопущення істотного їх зниження, яке може негативно відобразитися на роботі і технічному стані доменних печей.

5. Уперше визначено вплив нерівномірності не тільки витрати дуття по фурмам, а й повної енергії потоку комбінованого дуття на зрізі фурми, а також теоретичної температури горіння коксу, виходу горнового газу і повної енергії потоку горнового газу перед кожною фурмою на продуктивність і питому витрату коксу. Зниження коефіцієнтів варіації дуттьових параметрів на кожен 1 % призводить до зміни техніко-економічних показників плавки, а саме: витрати дуття по фурмах – до підвищення продуктивності печі на 1,1 % та зниження питомої витрати коксу на 0,97 %; повної механічної енергії потоку комбінованого дуття – до підвищення продуктивності печі на 0,7 % та зниження питомої витрати коксу на 0,72 %; виходу горнового газу – до підвищення продуктивності печі на 0,89 % та зниження питомої витрати коксу на 0,73 %; повної механічної енергії потоку горнового газу – до підвищення продуктивності

вності печі на 0,72 % та зниження питомої витрати коксу на 0,65 %; теоретичної температури горіння – до підвищення продуктивності печі на 0,79 % та зниження питомої витрати коксу на 0,46 %.

6. Дослідженнями встановлено, що основними параметрами, які дозволяють найкращим чином узгоджувати заходи впливу на хід печі “зверху” і “знизу”, є розподіл рудного навантаження на кокс уздовж радіусу колошника доменної печі і повна механічна енергія горнового газу, що визначає глибину проникнення газового потоку до центру горна печі і забезпечує необхідний рівень температур в осьовій зоні горна. З метою узгодженого управління розподілом газового потоку по колу доменної печі та шихтових матеріалів на колошнику печі розроблені і рекомендовані до впровадження нові вдосконалені конструкції пристроїв для вимірювання витрати дуття та його регулювання по фурмах доменної печі, що дозволяють ліквідувати окружну нерівномірність газорозподілу в печі, стабілізувати тепловий та газодинамічний режими доменної плавки, а також конструкції колошнику доменної печі, які розширюють можливості керування розподілом шихтових матеріалів по радіусу колошника печі двохконусним завантажувальним пристроєм з пелюстковим розподільником шихти або “калібратором” В.П. Тарасова, підвищуючи продуктивність доменної печі при зниженні питомої витрати коксу.

7. З метою вдосконалення доменної технології за рахунок погодження розподілу шихтових матеріалів на колошнику печі “зверху” і розподілу потоку горнового газу в горні доменної печі “знизу” розроблений спосіб доменної плавки, згідно якого за результатами ефективної експлуатації доменної печі для даних умов плавки визначають раціональні значення повної енергії потоку горнового газу та радіус осьової “віддушини”. При зміні технологічних умов плавки і збільшенні величини повної енергії потоку горнового газу вище раніше встановленого, радіус осьової “віддушини” зменшують, а при зменшенні повної енергії потоку горнового газу нижче раціональної радіус осьової “віддушини” збільшують. В середньому при зміні величини повної механічної енергії горнового газу на 100 кДж/с радіус осьової “віддушини” коригують у відповідному напрямку на 0,06 м.

8. Розроблені методики визначення повної енергії горнового газу та траєкторії газового потоку в нижній зоні доменної печі при переході з вдування ПГ на вдування ПВП, які дозволяють збільшити повноту оцінки і регулювання розмірів зон горіння перед фурмами і газорозподілу по радіусу нижньої зони печі при зміні паливних умов її роботи. На підставі виконаних розрахунків встановлено, що при однаковій інтенсивності доменної плавки, вдування ПВП, в порівнянні з вдуванням природного газу, сприяє зменшенню енергетичного потенціалу горнового газу, довжини зони горіння і розвитку периферійного потоку газу в нижній частині доменної печі.

9. З метою теоретичного обґрунтування особливостей перерозподілу газового потоку при вдуванні ПВП проаналізовані результати впровадження і освоєння технології доменної плавки з вдуванням ПВП на печі корисним об’ємом 5000 м³, які дозволили визначити причини частих випадків деформації і горіння повітряних фурм і холодильників, до яких відносяться значна нерівномірність протяжності зон горіння перед фурмами по колу горна і нераціональна зміна розподілу газового потоку по радіусу доменної печі. Виконані дослідження показали, що нерівномірні витрати дуття і ПВП по фурмам доменної печі призводять до значної нерівномірності пов-

них енергій потоків горнового газу і відповідно глибини проникнення газового потоку до центру горна від чого залежить вся робота доменної печі і, тим паче, при вдуванні ПВП. Для повної нормалізації розподілу газового потоку по радіусу доменної печі необхідно регулювання знизу доповнювати регулюванням зверху шляхом коригування режиму завантаження печі.

10. Виконані наукові узагальнення дозволили зробити висновок, що на доменних печах, де ще не використовується технологія вдування ПВП і де умовами її освоєння повинні бути забезпечення печей коксом і залізорудною сировиною високої якості, а також підготовка самої печі і всіх її систем до впровадження ПВП, технологія завантаження в доменні печі кускового антрациту може забезпечити значне зниження витрати коксу і собівартості чавуну. Особливо ця технологія ефективна при обмеженнях продуктивності печей через проблеми з реалізацією готової продукції, коли печі переводять в низькоінтенсивний режим роботи і коли на перший план виходить вирішення проблем економіки цеху та підприємства.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Лялюк В.П., Кассим Д.А., Онопа В.Н., Донсков Е.Е. Теоретические и экспериментальные исследования доменной плавки. – Кривой Рог: Дионат, 2016. – 621 с.
2. Лялюк В.П., Товаровський Й.Г., Кассим Д.О., Ляхова І.А. Теоретичні та практичні основи використання кускового антрациту в доменній плавці /– Кривий Ріг: Дионат, 2016. – 312 с.
3. Лялюк В.П., Кассим Д.А., Оторвин П.И., Ляхова И.А. Системы подготовки, подачи и загрузки шихтовых материалов в доменную печь.– Кривой Рог: Дионат, 2016. – 329 с.
4. Лялюк В.П., Кассим Д.А., Оторвин П.И., Ляхова И.А. Системы подготовки, подачи и загрузки шихтовых материалов в доменную печь. Изд. 2-е, дополненное. – Кривой Рог: Дионат, 2017. – 761 с.
5. Лялюк В.П., Ляхова И.А., Кассим Д.А., Соколова В.П., Шмельцер Е.О. Совершенствование технологии производства кокса для доменной плавки – Кривой Рог: Дионат, 2017. – 272 с.
6. Совершенствование технологии и оборудования производства железорудного сырья для современной доменной плавки / В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, Ф.М. Журавлев, Е.В. Чупринов, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим – Кривой Рог: Дионат, 2017. – 368 с.
7. Теория, технология и оборудование производства окатышей и нового железорудного сырья для доменной плавки / Ф.М. Журавлёв, В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, В.С. Моркун, Е.В. Чупринов, Д.А. Кассим – Кривой Рог: Дионат, 2019. – 925 с.

Статті, що включені до міжнародної науково-метричної бази Scopus

8. Comparison of Blast-Furnace Efficiency with Pulverized-Coal Injection and with Anthracite Chunks / V.P. Lyalyuk, I.G. Tovarovskii, A.K. Tarakanov, D.A. Kassim, V.N. Zakharchenko // Steel of Translation. – 2014. – №1. – PP. 34-37.
DOI: 10.3103/S0967091214010136.
9. Improved Iron-Ore Sinter for Blast Furnaces / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova, E.V. Chuprinov // Steel in Translation. – 2015. – №4. – PP. 270-274.
DOI: 10.3103/S0967091215040154.

10. Technological Aspects of the Use of Lump Anthracite in Blast-Furnace Smelting / V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, D.A. Kassim and other // Metallurgist. – 2016. – May. – PP. 1-8. DOI: 10.1007/s11015-016-0264-0.

11. Lyalyuk V.P., Tarakanov A.K., Kassim D.A. Total Energy of the Hearth Gas in Pulverized-Coal Injection // Steel in Translation. – 2017. – №3. – PP. 190-197. DOI: 10.3103/S0967091217030081.

12. Determining the Gas Trajectory in Blast-Furnace Injection of Pulverized Coal / V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, D.A. Kassim, P.I. Otorvin, D.V. Pinchuk // Steel in Translation. – 2017. – №4. – PP. 257-262. DOI: 10.3103/S0967091217040088.

13. Blast-Furnace Operation with Pulverized-Coal Injection and with Chunk Anthracite / V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, D.A. Kassim, P.I. Otorvin, D.V. Pinchuk // Steel in Translation. – 2017. – №7. – PP. 469-472. DOI: 10.3103/S0967091217070063.

14. Blast-Furnace Operation with Wet Blast / V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, D.A. Kassim, G.P. Kostenko, E.E. Donskov // Steel in Translation. – 2017. – №8. – PP. 544-549. DOI: 10.3103/S0967091217080083.

15. Pulverized-Coal Injection in a 5000-m³ Blast Furnace / V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, D.A. Kassim, D.V. Pinchuk, P.I. Otorvin // Steel in Translation. – 2017. – №10. – PP. 675-681. DOI: 10.3103/S0967091217100060.

16. Improvement in Blast-Furnace Performance by Using a New Form of Iron Ore / V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, F.M. Zhuravlev, D.A. Kassim, E.V. Chuprinov // Steel in Translation. – 2018. – №1. – PP. 39-44. DOI: 10.3103/S0967091218010096.

17. Coke Quality and Blast-Furnace Performance / D.A. Muchnik, A.I. Trikiilo, V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim // Coke and Chemistry – 2018. – №1. — PP. 12-18. DOI: 10.3103/S1068364X18010040.

18. Influence of Coke Quality on the Efficiency in Blast Furnaces of Different Size / D.A. Muchnik, A.I. Trikiilo, V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, I.A. Lyahova // Coke and Chemistry – 2018. – №7. – PP. 254-261. DOI: 10.3103/S1068364X18070062.

19. Influence of the Stability of Coke Quality on Its Consumption in the Blast Furnace / V.P. Lyalyuk, V.P. Sokolova, D.A. Kassim, I.A. Lyahova // Coke and Chemistry – 2018. – №9. – PP. 334-337. DOI: 10.3103/S1068364X18090077.

20. Influence of the Quality of Iron Ore and Coke on Blast-Furnace Performance / V.P. Lyalyuk, A.K. Tarakanov, D.A. Kassim, P.I. Otorvin, A.A. Gusev // Steel in Translation – 2018. – №12. – PP. 793-801. DOI: 10.3103/S0967091218120070.

21. Lyalyuk V.P., Tovarovskii I.G., Kassim D.A. Uniformity of Blast-Furnace Parameters over the Perimeter // Steel in Translation. – 2018. – №3. – PP. 179-184. DOI: 10.3103/S0967091218030087.

22. Coordination of the Batch Distribution at the Blast-Furnace Mouth and the Gas-Flux Distribution in the Hearth / A.K. Tarakanov, V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, P.I. Otorvin, D.V. Pinchuk // Steel in Translation. – 2018. – №6. – PP. 372-375. DOI: 10.3103/S0967091218060116.

Статті у наукових фахових виданнях

23. Возможность улучшения качества кокса за счет стабилизации состава и свойств угольной шихты / В.П. Лялюк, В.П. Соколова, А.К. Тараканов, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2013. – №3. – С. 48-51.

24. Оценка стабильности прочности кокса по показателям M_{25} и M_{10} в зависимости от колеблемости качества угольной шихты / В.П. Лялюк, В.П. Соколова, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – №33. – С. 106-109. (Індексується у базах Google Scholar, Index Copernicus, Research Bible, Academic Keys)

25. Разработка технологических параметров получения офлюсованного окускованного железорудного материала для доменной плавки, сочетающего лучшие металлургические характеристики агломерата и окатышей / Н.И. Ступник, Ф.М. Журавлёв, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим, И.А. Ляхова, Е.В. Чупринов // Вісник Криворізького національного університету. – 2014. – №36. – С. 3-9.

26. Технология получения офлюсованного окускованного материала с остаточным углеродом для доменной плавки / Ф.М. Журавлёв, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим, И.А. Ляхова, Е.В. Чупринов // Вісник Криворізького національного університету. – 2015. – №40. – С. 39-44.

27. Режимы термоупрочнения в слабоокислительной атмосфере при получении обожженных окатышей с остаточным углеродом для доменной плавки/ Е.В. Чупринов, В.П. Лялюк, Ф.М. Журавлев, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2016. – Серія: Технічні науки. – Вип. 32. – С. 13-19. (Індексується у базах Google Scholar, Index Copernicus).

28. Лялюк В.П., Кассим Д.А. Повышение равномерности распределения параметров дутья и горнового газа по окружности горна доменной печи // Вісник Криворізького національного університету. – 2018. – №46. – С. 64-70.

29. Головний напрямок інноваційного вдосконалення доменної технології – використання одного виду залізорудної сировини, що поєднує кращі властивості агломерату та окатишів / Д.О. Кассим, В.П. Лялюк, Ф.М. Журавльов, І.А. Ляхова, Є.В. Чупринов // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2018. – Серія: Технічні науки. – Вип. 36. – С. 7-15.

Статті у спеціалізованих наукових виданнях

30. Определение теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и пылеугольного топлива / Д.А. Кассим, В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, В.С. Листопадов, Д.В. Пинчук // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2016. – №2. – С 38-43.

31. Необходимость учёта полной энергии горнового газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим, Д.В. Пинчук, П.И. Оторвин // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2017. – №2. – С 2-6.

32. Сравнение технологий доменной плавки при загрузке кускового антрацита и вдувании пылеугольного топлива / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим, П.И. Оторвин, Д.В. Пинчук // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2017. – №5. – С 9-12.

33. Определение траектории потока газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / Д.А. Кассим, А.К. Тараканов, В.П. Лялюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2017. – №6. – С. 2-5.

34. Determination of the theoretical temperature of combustion at the injection of the natural gas and pulverised coal into the blast furnace hearth / D.A. Kassim, V.P. Lyalyuk,

А.К. Tarakanov, V.S. Listopadov, D.V. Pinchuk // Metallurgical and Mining Industry. – 2017. – №6. – PP. 45-50. (Цитується у базах Index Copernicus, eLibrary, Scientific Indexing Services, UlrichsWeb).

35. Влияние качества агломерата и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки / Д.А. Кассим, А.К. Тараканов, В.П. Лялюк, П.И. Оторвин, А.А. Гусев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2018. – №4. – С. 17-24.

Патенти

36. Патент України №85795, МПК С22В 1/14. Спосіб виробництва офлюсованого огрудкованого матеріалу з підвищеним вмістом заліза / В.П. Лялюк, Ф.М. Журавльов, М.І. Ступнік, О.Д. Учитель, І.А. Ляхова, Д.О. Кассім, Є.В. Чупринов. Заявл. 08.07.2013; № у 2013 08555; опубл. 25.11.2013. Бюл. № 22 (І ч). – С4.75.

37. Патент України №94772, МПК С21В 3/00. Спосіб виробництва обпалених окатишів із залишковим вуглецем / Ф.М. Журавльов, В.П. Лялюк, І.А. Ляхова, Д.О. Кассім, В.П. Соколова, Є.В. Чупринов. Заявл. 04.07.2014; № у 2014 07556; опубл. 25.11.2014. Бюл. № 22 (І ч). – С4.52.

38. Патент №102458 Україна, МПК С21В 7/16. Пристрій для вимірювання витрати дуття по фурмах доменної печі / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.О. Кассім, Г.Л. Зайцев. Заявл. 28.05.2015; № у 2015 05271; опубл. 26.10.2015. Бюл. № 20 (І ч). – С4.68.

39. Патент №102460 Україна, МПК С21В 7/16 Пристрій для регулювання витрати дуття по фурмах доменної печі / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.О. Кассім, Г.Л. Зайцев. Заявл. 28.05.2015; № у 2015 05282; опубл. 26.10.2015. Бюл. № 20 (І ч). – С4.67.

40. Патент №103824 Україна, МПК С21В 7/00. Доменна піч / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.О. Кассім та інші. Заявл. 03.08.2015; № у 2015 07733; опубл. 25.12.2015. Бюл. № 24 (І ч). – С4.73.

41. Патент №104638 Україна, МПК С21В 7/00. Доменна піч / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.О. Кассім, Г.Л. Зайцев. Заявл. 03.08.2015; № у 2015 07730; опубл. 10.02.2016. Бюл. № 3 (І ч). – С4.59.

42. Патент №103280 Україна, МПК С21В 7/20. Спосіб ведення доменної плавки / В.П. Лялюк, А.К. Тараканов, Д.А. Кассим. Заявл. 08.06.2015; № у 2015 05595; опубл. 10.12.2015. Бюл. № 23 (І ч). – С4.70.

43. Патент №113207 Україна, МПК С21В 5/00. Спосіб доменної плавки / В.П. Лялюк, Д.О. Кассім, В.М. Онопа, І.А. Ляхова. Заявл. 28.04.2016; № у 2016 04780; опубл. 25.01.2017. Бюл. № 2 (І ч). – С4.51.

Матеріали наукових конференцій

44. Гранулометрический состав кокса и необходимость его стабилизации / В.П. Лялюк, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим, Е.О. Шмельцер, Е.В. Рыбалка // Тезисы докладов межд. науч. тех. конф. “Университетская наука – 2014”, ПГТУ. – 2014, 20-21 мая. – Мариуполь. – Том 1. – С. 23.

45. Разработка технологии производства офлюсованного окускованного материала с остаточным углеродом для доменной плавки / Е.В. Чупринов, В.П. Лялюк, Ф.М. Журавлев, Д.А. Кассим, И.А. Ляхова // Материалы докладов XI международной

конференції “Стратегія якості в промисловості і освіті”, Варна, НР Болгарія 1-5 червня 2015, с. 148-153.

46. Розробка нового офлюсованого окисненого залізорудного матеріалу для доменної плавки / Е.В. Чупринов, В.П. Лялюк, Ф.М. Журавлєв, Д.А.Кассим, І.А. Ляхова // Міжнародна міждисциплінарна наукова конференція «Science and Scientists». – Дніпропетровськ: УДХТУ, 21-22 грудня, 2015. – С. 336-342.

47. Влияние качества угольной шихты на свойства кокса для доменной плавки / Е.О. Шмельцер, В.П. Лялюк, В.П. Соколова, И.А. Ляхова, Д.А. Кассим, И.Н. Скалун // Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції. Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. – Київ: НТКУ КПІ. – 2015. – 21.04.15. – С. 1109-1122.

48. Розробка технології отримання сировинних окисненого залізорудного матеріалу для доменної плавки / Ф.М. Журавлев, В.П. Лялюк, Е.В. Чупринов, Д.А. Кассим, И.А. Ляхова, К.В. Чухан // Всеукраїнська науково-практична конференція “Проблеми енергосбереження в промисловому регіоні. Наука і практика”. – Маріуполь: ПДТУ. – 2016, 11-12 мая. – С. 87.

49. Опыт внедрения и пути решения проблем освоения технологии вдувания ПУТ на доменной печи объемом 5000 м³ / Д.В. Пинчук, П.И. Оторвин, А.В. Романчук, В.П. Лялюк, Д.А. Кассим // Наукові праці всеукраїнської науково-технічної конференції, присвяченої 100-ччю з дня народження Г.Г. Єфіменка, 4-5 квітня 2017 р., НМетАУ, Дніпро. – С 122-128.

50. Кассим Д.О., Лялюк В.П., Товаровський Й.Г. Проблеми рівномірності розподілу параметрів доменної плавки по колу доменної печі / Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра. Матеріали XVI Всеукраїнської науково-практичної конференції, Київ, 17 квітня 2018 р. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – С. 63-74.

51. Определение траектории потока газа при вдувании в доменную печь пылеугольного топлива / Д.А. Кассим, В.П. Лялюк, Е.В. Чупринов, А.С. Кулик // Международная научно-техническая конференция “Университетская наука – 2018. – Маріуполь: ПГТУ. – 2018, 23-24 мая. – С. 51-54.

52. Кассим Д.А., Лялюк В.П., Чупринов Е.В. Проблемы равномерности распределения параметров доменной плавки по окружности доменной печи // Труды VIII міжнародної науково-практичної конференції “Металургія 2019” – Запоріжжя, 21-23 травня 2019 р.– С. 278-280.

АНОТАЦІЇ

Кассим Д.О. Вдосконалення доменної технології за рахунок покращення якості шихтових матеріалів і газодинамічних умов роботи доменної печі. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – “Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів”. – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2020.

В дисертаційній роботі виконано комплекс теоретичних розробок та експериментальних досліджень, направлених на підвищення ефективності доменної плавки в сучасних паливно-сировинних і технологічних умовах за рахунок покращення газодинамічних умов роботи доменної печі і якості шихтових матеріалів. Отримані наукові знання застосовані для досягнення високих показників доменної плавки шля-

хом узгодженого управління роботою печі “зверху” та “знизу”. Результати роботи є теоретичним узагальненням наукових підходів до контролю та управління технологією плавки в залежності від взаємного впливу коливання показників паливно-сировинних умов та параметрів дуттьового режиму плавки, на основі чого вирішена важлива проблема підвищення ефективності виплавки чавуну на доменних печах України, що має народногосподарське значення.

Обґрунтовані механізми формування і умови виробництва комплексного офлюсованого огрудкованого залізородного матеріалу з підвищеним вмістом заліза та залишковим вуглецем, використання якого дозволить суттєво підвищити ефективність доменної плавки, особливо при вдуванні ПВП, що підтверджено виконаним технологічним аналізом роботи доменної печі об’ємом 5000 м³. Також теоретично обґрунтований взаємозв’язок між стабілізацією фізико-механічних і фізико-хімічних властивостей коксу та витратою палива при доменній плавці з вдуванням ПВП.

З метою вдосконалення доменної плавки шляхом покращення розподілу газового потоку в доменній печі при вдуванні ПВП визначено вплив нерівномірності витрати дуття по фурмах та комплексних параметрів дуттьового режиму плавки перед кожною фурмою на продуктивність і питому витрату коксу. На підставі цього були розроблені технологічні рекомендації та пристрої для вимірювання та регулювання витрати дуття по фурмах доменної печі, що дозволить ліквідувати окружну нерівномірність газорозподілу в печі, стабілізувати тепловий та газодинамічний режими доменної плавки з відповідним зростанням продуктивності печі, істотним зниженням питомої витрати коксу та зносу футерівки доменної печі

Науково обґрунтовані і розроблені методичні підходи щодо визначення газодинамічних параметрів доменної плавки та траєкторії газового потоку в нижній зоні доменної печі при переході з вдування природного газу на вдування ПВП, що дозволяють більш повно здійснювати розрахунковий контроль та керування розподілом газового потоку по радіусу горна при впровадженні технології ПВП

В рамках пошуку напрямків вдосконалення технології доменної плавки в існуючих умовах роботи доменних печей та особливостях кон’юнктури ринку показано, що технологія завантаження кускового антрациту через колошник, на відміну від технології вдування ПВП, забезпечує значне зниження витрати коксу і собівартості чавуну без додаткових капітальних вкладень.

Ключові слова: доменна плавка, пиловугільне паливо, локальні спеки, кокс, коефіцієнт варіації, стабільність, повна механічна енергія, теоретична температура горіння, горновий газ, газорозподіл, газодинаміка, антрацит.

Kassim D.O. Kassim D.O. Improvement of domain technology at the expense improvement of quality of charge materials and gas-dynamic conditions of blast furnace operation. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Science Degree in specialty 05.16.02 – “Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys”. – National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2020.

The complex of theoretical developments and experimental researches, aimed at increasing the efficiency of blast furnace melting in modern fuel-raw materials and technological conditions by improving the gas-dynamic conditions of blast furnace operation and

the quality of charge materials is carried out in the dissertation. The acquired scientific knowledge is applied to achieve high blast furnace performance by coordinated control of the operation of the furnace "from above" and "from below". The results of the work are theoretical generalization of scientific approaches to the control and management of smelting technology, depending on the mutual influence of fluctuations of indices of fuel and raw materials conditions and parameters of the blasting melting regime, which solves the important problem of improving the efficiency of smelting of cast iron on blast furnaces of Ukraine.

Formation mechanisms and production conditions for complex flux-coated iron ore material with high iron content and residual carbon are substantiated, the use of which will significantly increase the efficiency of blast furnace melting, especially with injection of pulverized coal fuel, which is confirmed by the technological analysis of the blast furnace volume of 5000 m³. The relationship between the stabilization of the physico-mechanical and physico-chemical properties of coke and the fuel consumption of blast furnace blowing with injection of pulverized coal fuel is also theoretically substantiated.

In order to improve blast furnace melting by improving the gas flow distribution in the blast furnace by injection of pulverized coal fuel, the influence of the irregularity of the blast consumption on the tuyere and the complex parameters of the blast mode of melting before each tuyere on the productivity and the specific consumption of coke are determined. On the basis of which technological recommendations and devices were developed for measuring the flow of blast and its regulation in the blast furnace tuyere, which will eliminate the environmental irregularity of gas distribution in the furnace, stabilize the thermal and gas-dynamic modes of blast furnace melting with corresponding increase in furnace productivity, a significant decrease in the specific consumption of coke and wear of the blast furnace lining.

Developed and scientifically substantiated methodical approaches for determination of gas-dynamic parameters of blast-furnace melting and the trajectory of the gas flow in the lower zone of the blast furnace during the transition from natural gas injection to injection pulverized coal fuel, allowing more complete implementation of the calculated control and control of gas flow distribution over the radius of the furnace with the introduction of injection of pulverized coal fuel.

Searching for ways to improve blast furnace technology in the existing blast furnace operating conditions and market conditions, it has been shown that, in contrast to technology of injection of pulverized coal fuel, lump anthracite loading through the blast furnace reduces the cost of coke and the cost of cast iron without additional capital investment.

Keywords: blast furnace, injection of pulverized coal fuel, local specs, coke, coefficient of variation, stability, total mechanical energy, theoretical combustion temperature, furnace gas, gas distribution, gas dynamics, anthracite.