

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

**МЕРКУЛОВ ОЛЕКСІЙ ЄВГЕНОВИЧ**



УДК: 669.162.2: 001.8 (043)

**РОЗВИТОК ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ УДОСКОНАЛЕННЯ ДОМЕННОЇ  
ПЛАВКИ ПРИ ВИКОРИСТАННІ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ  
ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ З ПОКАЗНИКАМИ  
ЕФЕКТИВНОСТІ РЕАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ**

Спеціальність 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів  
та спеціальних сплавів»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпро, 2020

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

**Науковий консультант:**

доктор технічних наук, професор

**ТОВАРОВСЬКИЙ Йосип Григорович**

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор

**ПАЗЮК Михайло Юрійович**

завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Інженерного інституту Запорізького національного університету

доктор технічних наук, професор

**ГРЕС Леонід Петрович**

професор кафедри екології, теплотехніки й охорони праці Національної металургійної академії України

доктор технічних наук, професор

**СІГАРЬОВ Євген Миколайович**

завідувач кафедри металургії чорних металів ім. В. І. Логінова Дніпровського державного технічного університету.

Захист відбудеться “16” жовтня 2020 р. об 11<sup>00</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 при Національній металургійній академії України за адресою: пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600  
e-mail: [lydmila\\_kamkina@ukr.net](mailto:lydmila_kamkina@ukr.net)

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: просп. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49600

Автореферат розісланий “09” вересня 2020 р.

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

Л. В. Камкіна

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Традиційно склався підхід до аналізу доменної плавки, заснований на детальному вивченні окремих її явищ (тепло– і масообміну, газо– й гідродинаміки, механіки руху й характеру перетворення шихтових матеріалів і ін.) з наступним використанням виявлених закономірностей для визначення можливих і бажаних тенденцій у розвитку процесів і управління ними. Такий підхід є плідним, однак, не цілком достатнім для повного пізнання процесів з метою вдосконалювання технології.

Вивчення окремих, хай найістотніших, явищ в ізольованому вигляді не може дати підстав для остаточних висновків про всю сукупність процесів у цілому, а дає лише вихідний матеріал для подальшого аналізу. Це обумовлено тим, що доменна плавка в цілому є не простою сукупністю окремих явищ, а складною функцією їх зв'язків, природа яких складніша за самі явища і включає властивості, не притаманні окремим явищам. Зазначені особливості процесів доменної плавки дозволяють характеризувати її як велику систему в сучасному розумінні, центральне місце в пізнанні якої займає її моделювання й осмислення зв'язків процесів з виявленням напрямків подальшого вдосконалювання технології.

Розрахункові методи аналізу є формалізованим інструментом осмислення процесів у кількісній формі, що опираються на загальні закони природи. Базовими законами для замкнених систем є закони збереження маси й енергії, використання яких при розрахунковому аналізі доменної плавки передбачає вирішення завдань вивчення взаємозв'язків параметрів і показників реальних доменних плавок і прогнозу очікуваних показників доменної плавки за заданими параметрами роботи.

Використовувані нині розрахункові методики аналізу й прогнозу показників і процесів доменної плавки засновані на загальних (рідше двозонних) матеріально–теплових балансах і дають обмежені можливості оцінки показників і процесів. Для поглиблення аналізу й уточнення прогнозу потрібно подальше їхнє вдосконалювання шляхом описування тепломасообмінних процесів і фазових перетворень по висоті й поперечному перетину печі. Рішення цього завдання стало можливим, зокрема, у результаті розвитку в ІЧМ НАН України під керівництвом академіка В.І. Большакова методів кількісної оцінки розподілу шихтових матеріалів по радіусу колошника. Зазначений підхід особливо важливий в умовах наближення процесів у ряді режимів до граничних станів і ускладнення пошуку резервів зниження витрат коксу й збільшення продуктивності. Відповідно розробка нового підходу для виявлення додаткових можливостей аналізу процесів і формування на цій основі заходів щодо підвищення ефективності доменної плавки є актуальною науково–технічною проблемою.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконувалася у відділі металургії чавуну Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України відповідно до планів науково–дослідних робіт

відомчої, конкурсної й договірної тематики, у яких автор був відповідальним виконавцем і керівником розділів. В основу дисертаційної роботи покладені результати наукових досліджень, що ввійшли у звіти науково-дослідних робіт: «Розвиток теорії доменного процесу для встановлення граничних величин ступеня використання газу при заданій якості продуктів плавки в поточних і перспективних шихтових умовах» (№держреєстр. 0102U004080); «Вивчення ходу процесів у різних зонах доменної печі й розробка методичних основ комплексного розрахунку зональних і інтегральних характеристик доменної плавки при різних режимах роботи» (№держреєстр. 0106U003772); «Аналітичне дослідження й формування економічних режимів доменної плавки при різних газо-дутьових параметрах, складах шихт і способах їх завантаження» (№держреєстр. 0109U002446); «Аналітичне дослідження й оцінка перспектив використання нетрадиційних технологій доменної плавки з максимальним заміщенням коксу й природного газу» (№держреєстр. 0112U001347); «Розробка наукових положень і інформаційно-моделюючої системи для обґрунтованого вибору економічних енергозберігаючих режимів доменної плавки при різному складі шихтових матеріалів, особливостях їх розподілу й термо-фізико-хімічних перетворень в об'ємі печі» (№держреєстр. 0107U001719); «Удосконалювання режиму завантаження шихти для забезпечення економії палива на основі використання математичної моделі доменної плавки» (№держреєстр. 0113U005385).

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є розробка раціональних режимів функціонування технології доменної плавки при різних газодутьових параметрах, складі шихти, нерівномірності розподілу матеріалів на основі комплексного розрахунку зональних та інтегральних характеристик доменного процесу, які передбачають розкриття всієї повноти внутрішніх зв'язків, що впливають на характер режимів плавки і кінцеві результати (витрати коксу і продуктивність).

Згідно із зазначеною метою в роботі поставлені наступні основні завдання:

- розглянути й проаналізувати відомі розрахункові методи аналізу доменних плавок;
- розробка багатозонної моделі процесів тепло-, масообміну, газомеханіки й фазових перетворень в об'ємі доменної печі з урахуванням нерівномірності розподілу матеріалів;
- аналітичне дослідження впливу розподілу рудного навантаження по радіусу на показники процесів при різних режимах доменної плавки;
- чисельне дослідження показників і процесів плавки при зміні загального вмісту заліза в шихті, ступеня її металізації й ступеня офлюсування з варіюванням розподілу матеріалів по радіусу печі;
- чисельне дослідження показників і процесів плавки при зміні в широкому діапазоні температури дуття з варіюванням концентрації в ньому кисню, азоту, а також при зміні в широкому діапазоні витрат природного й коксового газів, витрат пиловугільного палива й різному розподілі матеріалів по радіусу печі;

– вибір параметрів технології доменної плавки при вдуванні продуктів газифікації вугілля;

– аналіз можливостей використання отриманих результатів для різних умов доменної технології, виявлення загальних закономірностей, а також уточнення параметрів.

**Об'єкт дослідження:** технологія доменної плавки, що вимагає поглиблення аналізу у зв'язку з ускладненням пошуку резервів економії палива в ході наближення процесів до граничних станів при обмеженнях сортаменту паливних ресурсів.

**Предмет дослідження:** режими функціонування доменної плавки при різних газодуттьових параметрах, складі шихти й її нерівномірності розподілу.

**Методи дослідження.** У роботі використані сучасні методи дослідження, у тому числі, математичне моделювання, експериментальні дослідження й промислові випробування розроблених технічних рішень. Теоретичні дослідження ґрунтувалися на фундаментальних положеннях гідрогазодинаміки, тепломасообміну й термодинаміки, фундаментальних положеннях системного аналізу. Для обробки отриманих результатів використані методи статистичної обробки експериментальних даних.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Запропоновано нове вирішення наукової проблеми, що полягає в прогнозі режимів і вдосконаленні технології доменної плавки за рахунок використання розробленої багатозонної моделі, де враховуються параметри внутрішнього стану процесів в окремих зонах об'єму печі у взаємозв'язку із загальними балансовими співвідношеннями. Це дає можливість виявляти шляхи зменшення витрат коксу і збільшення продуктивності агрегату за рахунок раціональної зміни параметрів дуття, шихти й розподілу рудних навантажень до їх встановлення в системі управління піччю.

1. Встановлено нові закономірності при дослідженні нерівномірності розподілу шихти на колошнику: мінімальний розвиток процесу прямого відновлення і відповідного теплоспоживання на цей процес при будь-яких умовах має місце на периферії і найбільш високий розвиток – в проміжних зонах печі; при реальних розподілах шихти на колошнику існують кільцеві перетини, в яких має місце виродження двоступеневої схеми теплообміну по висоті, що сприяє зменшенню стійкості процесів і додатковій витраті палива; вперше отримана теоретичними розрахунками загальна величина економії коксу при переході від параболічного розподілу рудного навантаження, характерного для конусних завантажувальних пристроїв, до рівномірного і близького до нього розподілів, характерних для безконусних завантажувальних пристроїв, яка становить 3–4 %.

2. Вперше встановлено такі зсуви в протіканні процесів при збільшенні абсолютної величини вмісту заліза в повністю офлюсованій шихті від 50 до 65 %: скорочення ступеня прямого відновлення при збільшенні вмісту заліза в шихті в області низьких абсолютних його значень і високих витратах коксу і збільшення цього показника в протилежній сфері значень вмісту заліза в шихті і витратах коксу; зміщення вниз зони розм'якшення й плавлення при

збільшенні вмісту заліза в шихті зі збільшенням твердофазної зони, що сприяє поліпшенню умов теплообміну і відновлення; менша ефективність підвищення вмісту заліза в шихті при наявності радіальних кільцевих зон з виродженим верхнім ступенем теплообміну, що викликає необхідність більш рівномірного розподілу рудних навантажень в проміжній зоні при зростанні вимог до фізико-механічних властивостей сировини і коксу.

3. Вперше показано, що з застосуванням попередньо металізованої сировини  $>30\%$  відбувається ослаблення впливу розподілу матеріалів на колошнику на показники плавки. Встановлено, що при ступені металізації шихти понад  $20\%$  ізотерми газу переміщуються вверх, збільшуючи втрату тепла через колошник, а зона розм'якшення і плавлення збільшується в об'ємі й потовщується, це пов'язано зі збільшенням необхідної для нагріву продуктів плавки висоти нижнього ступеня теплообміну і скороченням висоти верхньої при збільшенні мінімальної по висоті різниці температур шихти і газу, що обмежує ефективність реалізації цієї технології.

4. Вперше встановлено, що при збільшенні витрат природного газу до  $100\text{ м}^3/\text{т}$  чавуну диференційний еквівалент заміни коксу (еквівалент в діапазоні витрат природного газу від попереднього до поточного) скорочується рівномірно на  $0,1\%/\text{м}^3$  від початкової величини  $1,0\text{--}0,9\text{ кг}/\text{м}^3$ . При подальшому збільшенні витрат природного газу в зоні зниження ступеня прямого відновлення  $<20\%$  відбувається різке підвищення температури колошникового газу, яке призводить до скорочення диференціального еквівалента заміни коксу в  $1,5\text{--}4$  рази. Формування раціонального розподілу матеріалів на колошнику зменшує скорочення диференціального еквівалента заміни коксу в залежності від умов на  $10\text{--}15\%$ .

5. Вперше встановлено особливості перенесення теплоти в стовпі шихти при збільшенні температури дуття, які полягають у тому, що в високотемпературних зонах ( $>900\text{ }^\circ\text{C}$ ) через більш проникні радіальні кільцеві зони з низьким рудним навантаженням проходить більше газу (по масі), ніж через менш проникні радіальні кільцеві зони з високим рудним навантаженням. Менше охолодження газу в перших стимулює перетікання газу з них в інші через коксові шари й сприяє підтримці інтенсивності теплопередачі на рівні, який забезпечує зменшення температури колошникового газу при збільшенні температури дуття.

6. Вперше теоретично обґрунтовано механізм зміни ступеня прямого відновлення  $r_d$  і температури колошникового газу  $t_k$  при збагаченні дуття киснем, пов'язаний з відмінностями інтенсивності передачі теплоти від газу до шихти в високотемпературних і низькотемпературних зонах печі. Показано, що температура колошникового газу  $t_k$  в більшості режимів з підвищенням вмісту кисню збільшується або не змінюється і злегка зменшується лише при низьких температурах дуття. Величина ступеня прямого відновлення  $r_d$  також істотно не зменшується при зростанні концентрації відновників і скорочення тривалості перебування шихти в печі, а питомі втрати теплоти змінюються незначно, переважаючим фактором теплового балансу є скорочення приходу теплоти з дуттям при виведенні частини азоту. В результаті, на відміну від відомих

балансових розрахунків, в яких передбачається скорочення  $r_d$  і зменшення  $l_k$ , приріст продуктивності при збільшенні вмісту кисню виявився меншим (0,9–2,7 проти 1,0–3,0 %/%), а перевитрати коксу більшими (0,5–1,45 проти 0,1–0,5 %/%).

7. Вперше встановлено закономірності процесів, які стали основою формування раціональних режимів технології з вдуванням продуктів газифікації вугілля: встановлено, що збільшення витрат кисню для газифікації порошкового вугілля в прифурменому газифікаторі при відношенні  $O/C > 0,5$  моль/моль сприяє зростанню витрат коксу за рахунок збільшення питомих витрат теплоти, обумовлених скороченням продуктивності доменної печі, а також за рахунок зменшення тепловіддачі продуктів газифікації вугілля, пов'язаного зі зростанням частки азоту, при цьому в об'ємі доменної печі відбувається зміщення ізотерм вниз зі зменшенням висоти нижнього ступеня теплообміну. Це дає підставу для підтримки при всіх режимах газифікації співвідношення  $O/C \leq 0,5$ ; встановлено, що збагачення дуття для газифікації вугілля в прифурменому газифікаторі киснем до 40–60 % дозволяє отримувати високопотенційний гарячий відновний газ, вдування якого в доменну піч менш ефективно, ніж вдування гарячого відновного газу, отриманого на атмосферному дутті з максимально можливою температурою. Це обумовлено ослабленням впливу на витрати коксу відновних процесів і скороченням теплоти азоту дуття.

**Практичне значення отриманих результатів.** При особистій участі автора розроблено:

1. З червня 2015 року на металургійних підприємствах ТОВ «Метінвест Холдинг» введено керівний документ «Доменні печі. Нормативи витрат коксу й продуктивності» РД 3409 3721 2015. Цей документ містить методику, призначену для використання при аналізі змін питомих витрат коксу й продуктивності доменних печей під впливом змін складу й характеристик шихтових матеріалів, палива, технологічних параметрів доменної плавки й організаційних факторів ведення виробництва чавуну (параметричний аналіз).

2. На основі виконаного параметричного аналізу сформовані умови комплексного використання кращих параметрів плавки з позицій максимального скорочення витрат коксу за рахунок його заміщення пиловугільним паливом (250 кг/т) і коксівним газом зі збільшенням температури дуття до 1300 °С й концентрації в ньому кисню 25 % при вмісті заліза в повністю офлюсованій шихті до 60 % і необхідному поліпшенні металургійних властивостей коксу й сировини, а також оптимізації розподілу матеріалів на колошнику. Розрахунками встановлена можливість скорочення витрат коксу в зазначеному режимі до 200 кг/т чавуну.

3. Запропоновано спосіб подачі гарячих відновлювальних газів у фурмену зону доменної печі через змонтований на фурменому приладі реактор–газифікатор для одержання гарячого відновлювального газу з регульованим коефіцієнтом надлишку окислювача (патент на корисну модель 117035).

4. Розроблено пристрій подачі дуття й відновлювальних газів у доменну піч, який оснащений другим газовим трактом подачі дуття в реактор–газифікатор пиловугільного палива (патент на корисну модель 117584).

#### **Особистий внесок здобувача.**

У дисертаційній роботі постановка й обґрунтування завдань досліджень, вибір наукових підходів і методів дослідження, аналіз і описування отриманих експериментальних даних, формулювання висновків і технологічних рекомендацій з результатів досліджень здійснене безпосередньо автором. Проведення промислових експериментів і впровадження результатів розробок здійснювалося при сприянні експертів металургійного дивізіону ТОВ «Метінвест Холдинг», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», а також співробітників ІЧМ НАН України. Наукові й практичні результати дисертаційної роботи, які винесені на захист, отримані автором самостійно або у співавторстві відповідно з публікаціями, наведеними в авторефераті.

У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачем виконано наступне: аналіз і узагальнення літературних даних, розробка й обґрунтування постановки завдання [1,2,22]; факторний аналіз при різних параметрах комбінованого дуття, паливних добавок, шихти, нерівномірності розподілу матеріалів [3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,21,23,28]; математичне описування моделі [1]; кінетико–термодинамічний аналіз [27,26,29]; розробка й результати впровадження [18,32]; основні ознаки технічних рішень, захищених охоронними документами [33,34,35].

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення й результати роботи були повідомлені й обговорені на наукових конференціях і семінарах, у тому числі: Науково–практична конференція «Сучасні питання доменного виробництва», присвячена 100–річчю від дня народження академіка З.І. Некрасова, Дніпропетровськ (2008); XV Міжнародна конференція «Теплотехніка й енергетика в металургії», Дніпропетровськ (2008); Міжнародна науково–практична конференція «Творча спадщина Б.І. Китаєва» до 100–річчя від дня народження Б.І. Китаєва, УДТУ–УПІ, Єкатеринбург (2009); Міжнародний конгрес «Доменне виробництво – XXI століття», МІСiС, Москва (2010); Науково–практична конференція «Актуальні проблеми аглодоменного виробництва», присвячена 100–річчю від дня народження проф. Г.А. Воловика, Дніпропетровськ (2010) Proceedings 6th European Coke and Ironmaking Congress Düsseldorf, Germany (2011); AISTech–2012 Proceedings of the Iron&Steel technology conference, Atlanta, USA (2012); Міжнародна науково–практична конференція «Теорія й практика теплових процесів у металургії», Єкатеринбург (2012); 2nd International Conference „Advances in Metallurgical Processes & Materials“ Admet2015, Київ; Науково–виробнича конференція доменників України, присвячена пам’яті Й.Й. Дишлевича «Перегляд і коригування керівного документа «Доменні печі. Нормативи витрат коксу», Дніпропетровськ (2015); International Conference „International exchange of technologies in the field of iron production“, 2018, Zhangjiang, China.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 35 наукових праць, у тому числі: 2 монографії, 7 – статей у фахових наукових виданнях, 14 –

статей у виданнях, індексованих у наукометричних базах Scopus і WoS, 3 – патенти, 9 – матеріали наукових конференцій.

**Структура й об'єм роботи.** Дисертація складається з 2-х томів. Том 1 включає вступ, 6 розділів, загальні висновки, список використаних джерел з 269 найменувань, 112 рисунків і 69 таблиць загальним обсягом 389 стор. Том 2 включає 6 додатків загальним обсягом 129 стор.

### ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано її актуальність, сформульовані мета та завдання досліджень, висвітлені наукова новизна й практична значимість отриманих результатів з їхньою апробацією й публікації, відзначений особистий внесок автора.

У **першому розділі** приводиться аналіз розвитку й проблеми вдосконалювання теорії й технології доменної плавки. Особливістю процесу вивчення у великій системі «доменна плавка» є тісний зв'язок із процесом розвитку технології. У силу цього доменній плавці притаманне наявність множини взаємопов'язаних елементів, що ускладнює вихідну інформацію й моделі.

У ході розвитку технології й дослідження процесів плавки сформувалися наступні основні напрямки їх вивчення.

1. Тепломасообмін: Надходження і засвоєння теплоти, теплові баланси. Теплообмін у доменній печі. Відновлення заліза.

2. Механіка протитечії матеріалів і газів: Рух матеріалів. Газомеханіка. Формування протитечії в процесі завантаження шихти.

3. Генерація енергії й формування продуктів плавки: Утворення й функціонування фурмених зон. Зміна фазового стану шихтових матеріалів. Параметри коксової насадки, фільтрація й видалення продуктів плавки.

4. Розвиток розрахункових методів аналізу процесів: Аналіз реальних доменних плавок. Прогноз показників плавки. Особливості моделювання процесів.

Перехід від абстрактних знань про процеси до синтетичної картини функціонування великої системи досить складний у силу деформації окремих процесів під впливом їх взаємодії з іншими процесами (часто іншої природи) і появи в системі додаткових властивостей, не властивих системоутворюючим елементам. Плідний аналіз таких систем в доменній плавці можливий тільки при використанні ідеології системного підходу й математичного моделювання. Значну увагу цьому питанню приділяли в своїх роботах О.Н. Рамм, Й.Г. Товаровський, О.Б. Шур, Ю.Г. Ярошенко, К.М. Бугаєв, А.М. Дмитрієв, М.О. Спірін, С.В. Шаврін, В.І. Андронов, А.К. Тараканов, К.А. Шумілов, К.К. Шкодин, С.А. Загайнов, Н. Gudenau, Y. Omori, H. Saxen.

Використання результатів експериментальних досліджень охолоджених доменних печей при узагальненні теоретичних знань про процеси дозволило значно просунути розробку комплексної моделі доменної плавки. Отримані результати ілюструють можливості широкого використання моделей для аналізу реальних технологій і розробки нових технологічних рішень, але тим не

відображають ряд процесів, які впливають на хід плавки, заповнення яких виконано в цій дисертаційній роботі.

На стадії розробки необхідний ступінь адекватності моделі визначається метою функціонування і характером вирішуваної задачі, а досягнутий рівень адекватності – можливостями вивчення процесів плавки. Одна і та ж модель може бути адекватною процесам плавки при одному способі функціонування і неадекватною при іншому. В силу цього при моделюванні завжди потрібна чітка постановка функціонального завдання моделі. Залежно від цієї постановки одні явища описують більш детально, інші – спрощують, третіми – нехтують. У деяких випадках важлива не стільки детальність описування окремих явищ, скільки повнота урахування всіх істотних чинників. Разом з тим для всіх розроблених моделей характерна нерівноточність описування явищ. У деяких моделях при детальному описуванні тепломасообміну процеси газомеханіки довільно задаються, наприклад, хвилинними витратами дуття, а руйнування шихтових матеріалів в ході перетворень зовсім не враховується.

Зважаючи на викладене, для прогнозу вихідних характеристик плавки доцільно використовувати відносно прості залежності для тепло-, масообміну, газомеханіки та інших процесів, суміщені з балансовими рівняннями, результати яких легко контролювати даними практики.

В результаті виконаного аналізу підтверджено актуальність роботи, визначені мета й завдання досліджень, сформульовані у відповідному розділі цього автореферату.

**У другому розділі** розглянуті методичні прийоми аналізу процесів і показників доменної плавки. Виконаний аналіз показав, що адекватність моделей реальним процесам залежить, головним чином, від ступеня вивченості процесів. Оскільки підстроювання до реальних умов за параметрами внутрішнього стану можливе тільки дуже приблизно, їх роблять по вихідних параметрах, що не дозволяє дати однозначну оцінку адекватності моделі реальним процесам. Це викликає необхідність уведення емпіричних коефіцієнтів, що не є константами, а скоріше псевдоконстантами, змістовна основа яких не завжди однозначна. Враховуючи принципову неможливість досягнення повної адекватності моделі реальному процесу характер побудови моделі (наприклад, модульний) повинен передбачати можливість її перебудови й доповнення в міру перевірки адекватності реальним процесам у широкому діапазоні режимів. Такий підхід не завжди відповідає можливості застосування класичних методів моделювання й використання відомих методів чисельного рішення. Однак пріоритетність цього підходу з позицій змістовної інтерпретації результатів диктує необхідність вишукування нетрадиційних рішень у частині моделювання й знаходження чисельних результатів в ім'я збереження предметності результатів. Розроблена в Інституті чорної металургії НАН України багатозонна математична модель процесів доменної плавки (ММДП) відповідає зазначеним вимогам і призначена для аналізу й прогнозу показників і процесів плавки, а також для вивчення й пізнання процесів. На відміну від відомих моделей у ММДП розглядається протитечія з нерівномірно

розподіленими по радіусу стовпа шихти матеріалами, а базовий варіант настроюється за реальними результатами плавки.

Виходячи з того, що кількість одночасно настроюваних коефіцієнтів має бути мінімальним, за рахунок згортки інформації воно зведене до трьох адаптованих елементів (АЕ):

1. АЕ об'ємного коефіцієнта теплопередачі в стовпі шихти –  $\alpha_0$ , кВт/[(м<sup>3</sup>·К)·(кПа·м)<sup>0,333</sup>], що входить у вираз  $\alpha_v = \alpha_0 \sqrt[3]{\Delta P}$  і віднесений до 1 градусу різниці температур підведеного знизу до шару газу і шихти, що надходить в шар зверху. На відміну від загальноприйнятого віднесення коефіцієнта до середньої різниці температур газу і шихти в шарі при невизначеності форми усереднення, зазначена форма дає більш предметну інтерпретацію коефіцієнта теплопередачі. Отримані при адаптації до реальних умов окремих доменних печей в різні періоди значення  $\alpha_0$  в межах 0,4÷0,7 відповідають (при втраті напору в стовпі шихти 5 кПа/м) величинам об'ємного коефіцієнта теплопередачі в стовпі шихти –  $\alpha_v = 0,7 \div 1,2$  кВт/(м<sup>3</sup>·К), які близькі до найбільш правдоподібних (в т.ч. експериментальних) даних.

2. АЕ коефіцієнта швидкості відновлення заліза –  $k_v$ , 1/(год·К) (в чисельнику – частки кисню оксидів заліза, в знаменнику – частки відновного потенціалу газу) відображає розвиток прямого і непрямого відновлення, залежного від комплексу властивостей залізорудної сировини і коксу.

3. АЕ коефіцієнта знімання теплоти зі стін –  $q_0$ , кДж/(т·м<sup>2</sup>·К) відображає сумарну теплопередачу через стіни при охолодженні від температури периферійного газу на кожному горизонті до температури відхідного потоку охолоджуючої води.

Кожен з них інтегрально відображає комплекс кінетичних властивостей і енергоємність процесів теплопередачі в стовпі шихти, відновлення і знімання теплоти зі стін відповідно. Отримані при адаптації значення коефіцієнтів використовуються в якості констант на етапі прогнозу, в ході якого встановлюється вплив технологічних параметрів плавки на процеси в печі і показники її роботи при даному поєднанні властивостей шихтових матеріалів.

Протікання процесів теплопередачі й відновлення заліза в кільцевих зонах по висоті стовпа шихти описується в моделі дискретно системою матеріально–теплових балансів в 12 зонах по вертикалі з інтервалами температур шихти від початкової до 400 °С і далі через кожні 100 °С аж до температури продуктів плавки. Кожна з вертикальних зон характерна своєю специфікою протікання процесів тепло- і масопередачі, а також переходу матеріалів від твердої фази до рідкої через тістоподібний стан. Рівновеликим по горизонтальній площі колошника кільцевим зонам відповідають 10 кутових положень лотка безконусного завантажувального пристрою. Завантаження цих зон відрізняється одне від одного співвідношенням компонентів шихти (у першу чергу коксу й залізорудної частини), що задаються програмою завантаження й обчислюються в моделі завантаження. Це обумовлює різний склад шихти й відповідно різний склад формованих шлаків у різних радіальних кільцевих зонах (РКЗ). Відповідно до цього, температурні границі початку розм'якшення, плавлення й повного зрідження визначаються для кожної РКЗ. Залежність

температур початку розм'якшення, плавлення й повного зрідження від хімічного складу шихти визначали для кожної РКЗ і розраховували за розробленою в ІЧМ НАНУ узагальненою моделлю, яка є одним з модулів загальної багатозонної моделі доменної плавки, заснованої на прогнозуванні цих температур за допомогою інтегральних критеріїв «згортки» хімічного складу з урахуванням міжатомної взаємодії компонентів шлакової ув'язки з наступним коригуванням зазначених температур по ступеню відновлення матеріалів і кількості внесених і циркулюючих у печі лужних оксидів ( $K_2O+Na_2O$ ).

Таким чином, увесь об'єм стовпа шихти розбито на  $10 \times 12 = 120$  умовних чарунок, для кожної з яких виконуються розрахунки зонального матеріально-теплого балансу, ув'язаного із загальним матеріально-тепловим балансом печі. Висоти індексуються номерами вертикальних зон зверху вниз – верхній індекс (з 1 по 12) і кільцевих зон від центру до периферії – нижній індекс (з 1 по 10).

Для реалізації моделі розроблено розрахункову схему, особливістю якої є одноманітний вираз і розрахункова взаємопов'язаність основних характеристик процесів у загальних і зональних балансових співвідношеннях, а також наявність нових елементів, відсутніх у відомих аналогічних методиках:

1. Задавання розподілу між радіальними кільцевими зонами кожного окремо компонента шихти поряд з можливістю задавання розподілу рудного навантаження (відношенням суміші залізорудних компонентів до суміші коксів); розміщення коксу із заданими якісними характеристиками в осьовій зоні стовпа шихти.

2. Враховується робота розширення газу, яка включена у видаткову частину балансу й становить 0,4–0,5 від залишкового члена теплового балансу. Таке урахування наближає структуру теплового балансу до реального й робить величину залишкового члена теплового балансу близькою до величини теплових втрат, виміряних на доменних печах.

3. Тепловтрати печі, визначені по залишковому члену теплового балансу, розподілені по висоті периферійної кільцевої зони пропорційно поверхні охолодження й середній температурі газу у вертикальних зонах. Отримані розрахунками результати узгодяться з відомими експериментальними даними, отриманими д.т.н. О.В. Бородуліним. Зазначена особливість методики дозволяє оцінювати вплив розподілу матеріалів по радіусу печі на тепловтрати, а також вплив усіх технологічних факторів на витрати коксу з урахуванням зміни тепловтрат, що у відомих методиках не передбачено. Наявність зазначеного компонента методики дозволяє реалізувати також можливість виявлення ролі периферійної зони в загальному тепловому балансі, що дуже важливо при урахуванні того, що, за рахунок тепловтрат печі, витрати теплоти на 1 т чавуну на процеси в цій зоні в 1,5–2 рази більші, чим в інших.

4. У відомих методиках розрахунків теплових балансів величина середньої температури колошникового газу, що відходить зі стовпа шихти, приймається як фактично вимірювана на доменній печі. Однак вимірювані в периферії газовідводів величини занижені на 5–15 % за рахунок тепловтрат від місця

виходу газу зі стовпа шихти до точки вимірювання й не є середніми по масі газу, тому що повного перемішування по діаметру підкупольного простору не відбувається. Тому в розробленій методиці передбачене уточнення величини середньої температури відхідного газу зі стовпа шихти, з урахуванням нерівномірності потоку.

5. Розроблена в рамках загальної багатозонної моделі доменної плавки методика оцінки параметрів зони розм'якшення й плавлення (ЗРП) з урахуванням впливу ступеня відновлення заліза й приходу лужних оксидів ( $K_2O+Na_2O$ ) сприяє підвищенню системності аналізу процесів і дозволяє дати кількісну оцінку впливу параметрів на кінцеві показники плавки, у тому числі на витрату коксу.

Завдання багатозонного балансу включає систему виразів, пов'язаних прямими й зворотними зв'язками. У силу цього для рішення системи використовується ітераційний алгоритм із багатоступінчастими ітераційними циклами.

Аналіз процесів на такій основі дозволяє уникнути, щонайменше, системних помилок, властивих відомим підходам. Прикладом таких помилок є використання для прогнозів виразів, у яких містяться допущення про незначну величину різниці температур газу й шихти на границі двох зон теплообміну ( $<10^\circ$ ) для печі в цілому, або використання завищених значень коефіцієнта теплопередачі, що приводять до цього.

Виявлені закономірності трансформації температурно-концентраційних, фазових і газодинамічних полів в об'ємі доменної печі, а також поперечних перетікань газу по висоті стовпа шихти дозволяють пояснити ряд складних явищ і можуть розглядатися як інструменти саморегулювання у великій системі «Доменна плавка». Встановлена складна система прямих і зворотних зв'язків параметрів зони розм'якшення й плавлення, а також втрат теплоти через стіни з комплексом вхідних, проміжних і вихідних параметрів доменної плавки є важливим компонентом системного аналізу плавки.

**У третьому розділі** виконано аналітичне дослідження впливу розподілу рудного навантаження по радіусу на показники процесів при різних режимах доменної плавки.

За базові режими роботи приймалися фактичні умови доменних печей №9 об'ємом  $5000 \text{ м}^3$  ПАТ «АрселорМіттал Кривий ріг» і №5 об'ємом  $5500 \text{ м}^3$  ВАТ «Северсталь». По-перше: це печі великого об'єму, обладнані безконусними завантажувальними пристроями, численними засобами вимірювання, по-друге: працюють в різних паливно-сировинних умовах. Для перевірки розробленої моделі виконали адаптацію до умов роботи доменних печей. В якості основного критерію адаптації прийнято значення витрат кускового палива (кокс+антрацит) в базовому періоді. Так для ДП-9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» при фактичних технологічних параметрах плавки і завантаження шихти, прийнятих в якості базових, результати розрахунків дозволили виконати аналіз показників і процесів плавки з виявленням можливості скорочення витрат коксу за рахунок раціональної зміни параметрів завантаження шихти (табл. 1).

Таблиця 1 - Відносні рудні навантаження в радіальних кільцевих зонах.

РКЗ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
База	0,536	0,839	1,02	0,827	0,812	0,877	1,168	1,474	1,498	1,441
Дослід.	0,454	0,738	0,972	0,906	0,936	0,956	1,208	1,524	1,46	1,399

Нові параметри розподілу компонентів по радіусу колошника отримали по моделі завантаження, розробленої в ІЧМ НАН України. Потім на багатозонній моделі доменної плавки виконали розрахунок очікуваної зміни показників і процесів плавки при новому розподілі компонентів шихти по радіусу колошника. Після цього нові параметри завантаження встановили на ДП №9 ПАТ «АрселорМіттал» і випробували протягом 8 діб. Очікувані розрахункові показники плавки при зміні параметрів завантаження шихти порівняли з фактично одержаними на доменній печі і отримали, що прогнозована економія коксу (9,3 кг/т) виявилася близькою до отриманої практично (10 кг/т).

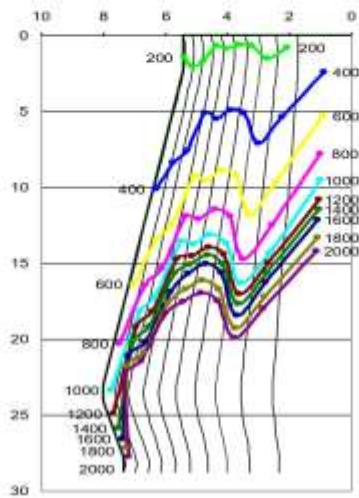
Витрати кускового палива в дослідному періоді скоротилися на 4 кг/т при зменшенні витрат природного газу на 4 м<sup>3</sup>/т, що при еквіваленті заміни коксу ПГ 0,75 кг/м<sup>3</sup> відповідає економії коксу 7 кг/т чавуну. З урахуванням мінливих чинників і при перерахунку на кокс економія склала 10 кг/т, що близько до прогнозованої величини (табл.2, рис.1).

Таблиця 2 Показники роботи печі в базовому, прогнозному і дослідному режимах.

Показники	База	Прогноз	Дослід
Витрата кускового палива, кг/т	515	505,7	511
Дугтя: температура, град.	1093	1093	1098
Кисень, %	29,2	29,2	28,7
Витрата природного газу, м <sup>3</sup> /т	80	80	76
Колошниковий газ: температура, град	79	190	84
%CO	29,19	26,8	28,3
%CO <sub>2</sub>	18,43	20,63	17,8
%H <sub>2</sub>	7,0	6,0	7,0
Втрата залізорудної шихти, кг/т	1616	1616	1643
Залізо в шихті, %	55,7	55,76	55,5
Чавун, % кремній	0,9	0,9	0,96
марганець	0,24	0,21	0,25
сірка	0,014	0,014	0,012
вуглець	4,71	4,71	4,7
Шлак, % кремнезем	37,94	37,88	39,03
глинозем	7,19	7,15	7,36
вапно	46,28	46,2	47,09
магnezія	5,26	5,2	5,48
оксид марганцю	0,21	0,21	0,21
сірка	0,89	0,88	1,12
Основність шлаку	1,22	1,22	1,21
Кількість шлаку, кг/т	412	412	413
Приведена витрата коксу, кг/т	510	509,3	500

## База

Температура газів : T , 0C



## Дослідження

Температура газів : T , 0C

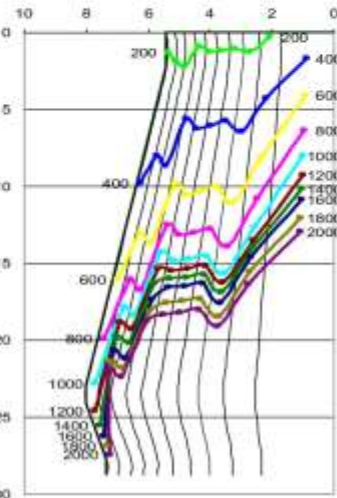
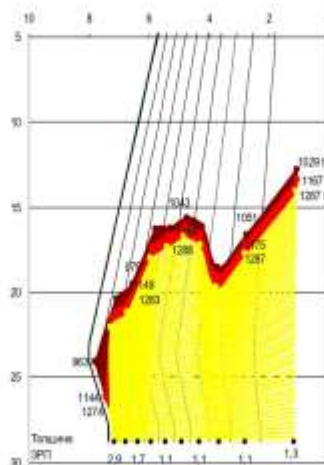
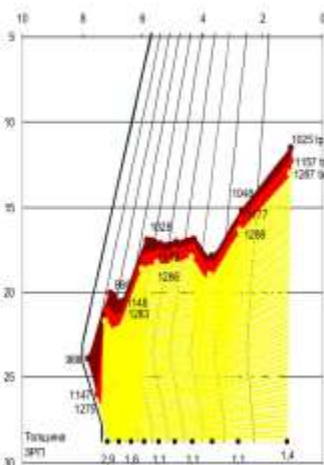


Рис. 1. Ізотерми газу (T) по радіусу (відстань по горизонталі від осі, м.), а також параметри зони розм'якшення і плавлення ЗРП по радіусу на різній висоті (відстань по вертикалі від верху, м.) для базового і дослідного розподілу відносних РН в РКЗ-1-10 (по горизонталі від осі, м.).  $t_p$ ,  $t_{пл}$ ,  $t_{зрж}$  - температури розм'якшення (коричн.), плавлення (червон.) і зрідження (жовтий) відповідно.

Температури фазової трансформації



Температури фазової трансформації



Розподіл матеріалів по радіусу колошника доменної печі характеризується відносним рудним навантаженням (РН) у кожній з 10-ти рівновеликих радіальних кільцевих зон – РКЗ (відносно середньої РН). Використання в якості показника відносного рудного навантаження обумовлено зручністю зіставлення програм завантаження з різними масою подачі і середнім рудним навантаженням. Розглянуто 2 режими розподілу РН: **Кон** – конусний, **Лот** – лотковий. Кожному з них властиві характерні криві розподілу РН по радіусу колошника: **Кр** – крута, **Пл** – полого, **Рн** – рівномірна в РКЗ № 2–10, **От** – з формуванням віддушини біля периферії, **Ст** – ступінчаста, **Ба** – базового періоду. Повне позначення складається з 2-х частин – перша відображає режим розподілу РН, друга відображує характер отриманої кривої розподілу РН по радіусу колошника: **ЛотБа**–**Лотковий** базового періоду; **ЛотРн**– лотковий рівномірна; **КонКр**– конусний крута; **КонПл**– конусний полого; **ЛотПл** – лотковий полого; **ЛотОт**– лотковий з віддушиною в периферії; **ЛотСт**– лотковий ступінчаста. На рис. 2 наведені зазначені розподіли РН.

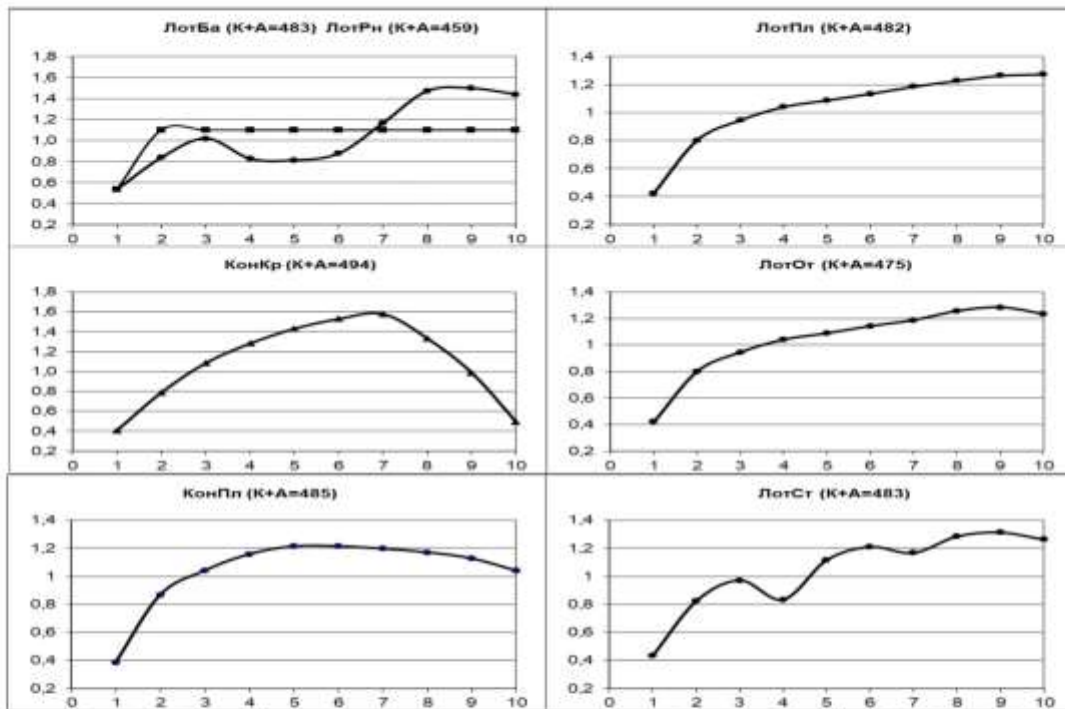


Рис. 2. Розподіл відносних рудних навантажень (по вертикалі) в РКЗ № 1-10 (по горизонталі від осі) для різних режимів завантаження шихти (в тексті). У дужках - витрати коксу + антрацит, кг/т.

Ідеалізований варіант із рівномірним розподілом РН у РКЗ 2–10 (ЛотРн) дає скорочення витрат коксу на 5 % у порівнянні з базовим (ЛотБа).

У двох варіантах з конусним режимом завантаження при крутому профілі розподілу РН (КонКр) витрати коксу на 2,3 % вищі, чим у базовому, а формування пологого профілю (КонПл) дозволяє скоротити витрати коксу на 2,0–2,2 %. Робота в лотковому режимі забезпечує витрати коксу, близькі до значення в базовому періоді, а оптимізація цього режиму з організацією віддушини біля периферії (ЛотОт) сприяє скороченню витрат коксу на 1,7 %.

Суттєво впливає на економічність плавки плавність профілю розподілу РН по радіусу колошника. У варіанті ступінчастого профілю (ЛотСт) витрати коксу на 1,7 % вищі, чим у відповідному варіанті без ступенів (ЛотОт).

Обчислені величини відображають балансово-кінетичну частину впливу режиму завантаження шихти на процеси й показники плавки. Повний вплив включає також зміну стійкості процесів сходу шихти в протитечії зі збільшенням загального ефекту від раціоналізації параметрів завантаження.

Термохімічний механізм інтенсифікації процесів тепломасообміну при збільшенні рівномірності розподілу матеріалів по радіусу печі наступний. Протитечія шихти й газу являє собою єдину взаємозалежну систему руху шихти й газу в сукупності з продуктами їх взаємодії, фазових перетворень і енергообміну. При цьому рух газу відбувається не тільки по вертикалі. Найбільш складні траєкторії мають осьовий і периферійний потоки, особливо в області «обтікання» зони розм'якшення і плавлення (ЗРП). У РКЗ–10

(периферія) це спостерігається на рівні 20–25 м, у РКЗ–1 (вісь) – 7–10 м. Вище зони обтікання відбувається відтік газу від периферії й осі в проміжні РКЗ–2–9 зі скороченням кількості газу в РКЗ–1 в 1,5–2 рази (до  $0,06 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) і зміною складу, у тому числі за рахунок відібрання кисню від шихти й транспортування у вертикальному й горизонтальному напрямках.

При переході від КонКр до ЛотОт суттєво змінюється загальна конфігурація ізотерм газу за рахунок зміщення вниз периферійної й припериферійних температур, у результаті чого зблизилися значення температур по радіусу в РКЗ–2–10, а також поменшала різниця температур газу й шихти в периферійній зоні. Конфігурація ЗРП змінилася за рахунок переміщення початку розм'якшення й плавлення біля периферії із шахти в розпар і заплічків зі збільшенням об'єму твердофазної зони в шахті. Це сприяло поліпшенню контакту газу й шихти в цілому по радіусу печі, що привело до зменшення температури колошникового газу й ступеня прямого відновлення.

При переході ЛотОт–ЛотРн параметри змінюються в тому ж напрямку з одержанням аналогічного ефекту. Ті ж закономірності ілюструються при переході ЛотПл–ЛотОт. Однак при переході ЛотОт–ЛотСт отримані протилежні результати. Тут ЛотСт є відображенням ЛотОт з накладенням ступенів на профіль розподілу РН по радіусу. При ступінчастій формі профілю РН відбувається ускладнення процесів, що вимагає підвищених витрат коксу.

Механізм установлених закономірностей полягає в тому, що в міру зменшення нерівномірності РН по радіусу відбувається ослаблення лімітуючого впливу найбільш навантажених зон на загальний результат з перенесенням частини термохімічної роботи в менш навантажені зони. Це сприяє запобіганню формування в найбільш навантажених зонах «критичних» умов (виродження зон теплообміну, падіння відновлювального потенціалу газу, газо- і гідродинамічний опір і ін.), які приводять в остаточному підсумку до збільшення загальної потреби теплоти.

На основі отриманих результатів можна оцінити граничні нормативні величини економії коксу від поліпшення розподілу рудного навантаження (РН), які слід використовувати при виконанні «приведення» витрат коксу до порівнянних умов:

- поліпшення рівномірності розподілу РН на колошнику при роботі із КЗП – економія від 0 до 2 % коксу;
- використання лоткового режиму завантаження замість конусного при установці БЗП замість КЗП – економія 4 % коксу;
- поліпшення рівномірності розподілу РН на колошнику при роботі із БЗП – економія від 0 до 3 % коксу.

Вперше виконана на основі запропонованої методики аналітична оцінка переваг безконусних завантажувальних пристроїв щодо конусних відповідає виконаній оцінці фактичних результатів унікальної багаторічної практики ДП-5 і ДП-6 ВАТ «Новолипецького МК».

Викладеним показано можливість поглиблення й розширення аналізу в порівнянні з балансовим підходом за рахунок оперування внутрішніми параметрами процесів.

У четвертому розділі виконано оцінку впливу шихтових і дуттьових параметрів на формування температурно-концентраційних полів у доменній печі. Чисельне дослідження впливу вхідних параметрів плавки на формування температурно-концентраційних і фазових полів у печі показало істотні кількісні відмінності для різних параметрів: найбільш сильним виявився вплив попередньої металізації шихти, витрат природного (коксового) газу, кисню й температури дуття; інші параметри впливають слабкіше.

Розрахункові прогнози показників процесів плавки виконали для наступних варіантів розподілу відносних рудних навантажень на колошнику, рис. 3.

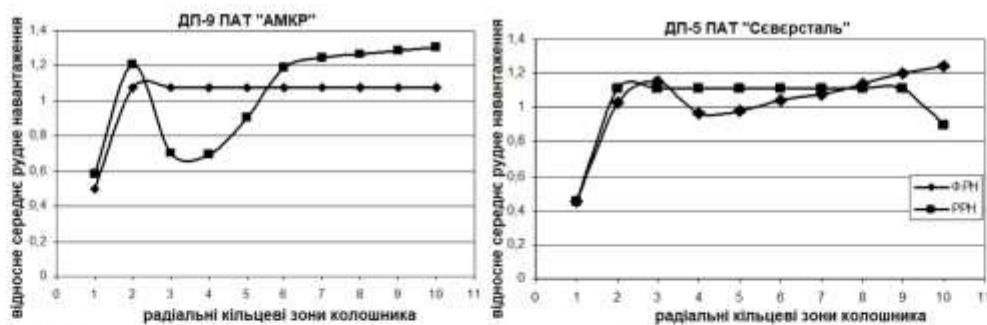


Рис. 3. Розподіл відносних рудних навантажень по РКЗ колошника ДП-9 і ДП-5 при фактичних умовах (ФРН) і при переході до рівномірного розподілу матеріалів в РКЗ 2-9, 10 (РРН).

Попередньо металізована шихта. При заміні частини окисленої шихти, попередньо металізованою, основним фактором економії коксу є скорочення теплоспоживання на пряме відновлення заліза. При ступені попередньої металізації до 20 % величина економії коксу на кожний додатковий 1 % металізації становить 0,25–0,55 %, а приріст продуктивності – до 0,4 %. Вони близькі до відомих експериментальних і розрахункових балансових значень і залежать від вихідного ступеня прямого відновлення. При зростанні ступеня попередньої металізації до 30 % економія коксу зменшується вдвічі. У міру збільшення ступеня попередньої металізації шихти скорочується теплоспоживання на пряме відновлення заліза й відповідно зменшується відношення теплоємностей шихти й газу, а також інтенсивність теплопередачі в нижній зоні. Внаслідок цього збільшується потрібна для нагрівання продуктів плавки висота нижнього ступеня теплообміну й відповідно скорочується висота верхнього при збільшенні мінімальної по висоті різниці температур шихти й газу. У результаті ізотерми газу переміщуються вгору, збільшуючи втрати через колошник, а зона розм'якшення й плавлення розташовується вище базового положення й товщає. Під дією зазначених явищ основний балансовий фактор економії коксу від використання попередньо металізованої шихти не може бути реалізований досить повно при ступені металізації більше 20 %, тому що

процеси тепломасообміну, фазових перетворень і газомеханіки розвиваються в напрямку, що обмежує ефективність реалізації цієї технології.

В таблиці 3 наводяться результати розрахунку відношення теплоємностей потоків  $m_B$  і  $m_H$  для різних РКЗ при різному ступені попередньої металізації шихти. У базовому варіанті в ВТЗ-7 (900-1000 °С)  $m_H$  досягає 4,34 і 3,957 на ДП-9 і ДП-5 відповідно, а у варіанті з металізацією шихти до 30-55 %  $m_H$  зменшується до 1,578 для ДП-9 і 2,319 для ДП-5.

Таблиця 3 - Зміна ставлення теплоємностей потоків шихти і газів у верхній ( $m_B$ ) і нижньої ( $m_H$ ) зоні доменної печі при різного ступеня попередньої металізації шихти ( $Fe_M/Fe_\Sigma$ ) і фактичному розподілі рудного навантаження на колошнику

		ДП-9 «АрселорМіттал Кривий Ріг»					ДП-5 «Северталь»			
		100·Fe <sub>M</sub> /Fe <sub>Σ</sub> , (%)					100·Fe <sub>M</sub> /Fe <sub>Σ</sub> , (%)			
		0	17,3	33,1	47,8	78,2	0	16,0	30,6	43,8
t <sub>зав.</sub> -400°	$m_B$	0,838	0,842	0,828	0,807	0,783	0,693	0,667	0,644	0,631
400-500°		0,974	0,971	0,925	0,888	0,856	0,893	0,880	0,838	0,797
500-600°		0,879	0,915	0,902	0,901	0,895	0,786	0,733	0,741	0,755
600-700°		1,087	1,108	1,071	1,010	0,938	0,989	0,947	0,922	0,892
700-800°		0,970	0,971	0,950	0,916	0,898	0,912	0,876	0,884	0,864
800-900°		1,055	1,075	1,049	1,018	0,981	1,040	1,009	0,965	0,927
900-1000°	$m_H$	<b>4,340</b>	<b>3,699</b>	<b>3,032</b>	<b>2,625</b>	<b>1,578</b>	<b>3,957</b>	<b>3,090</b>	<b>2,628</b>	<b>2,319</b>
1000-1100°		0,984	1,145	1,194	1,210	1,416	0,833	0,819	0,823	0,828
1100-1200°		1,373	1,522	1,541	1,559	1,848	1,181	1,161	1,142	1,136
1200-1300°		1,902	2,082	2,098	2,091	2,336	1,765	1,742	1,725	1,719
1300-1400°		1,384	1,482	1,501	1,462	1,485	1,258	1,246	1,238	1,237
1400- тпл		1,132	1,208	1,216	1,161	1,185	0,846	0,828	0,818	0,815

Таке скорочення  $m_H$  і відповідно інтенсивності теплообміну призводить до переміщення високих температур газу в верхні горизонти стовпа і підвищенню температури колошникового газу. При цьому, як впливає з аналізу температурних кривих, мінімальна по висоті печі різниця температур газу і шихти в РКЗ 2-9 збільшується від 15 ÷ 97 (середн. 66) до 98 ÷ 167 (середн. 132) градусів на ДП-5 і від 70 ÷ 140 (середн. 105) до 80 ÷ 180 (середн. 130) градусів на ДП-9 при зміщенні вверх по висоті печей зазначених точок на 1 ÷ 5 м. Останнє означає збільшення потрібного для нагрівання продуктів плавки висоти нижнього ступеня теплообміну і відповідно скорочення висоти верхнього. Відповідно до переміщення ізотерм відбувається й змішування вверх ЗРП і, при заданих властивостях матеріалів, також збільшення її товщини.

Найважливішою характеристикою класичної доменної плавки є двоступінчаста схема теплообміну по висоті, обумовлена наявністю в середній частині стовпа зони сильного внутрішнього теплоспоживання, який відокремлює верхню зону інтенсивного теплообміну з відношенням теплоємностей потоків шихти й газу  $m_B=(W_{ш}/W_{г})<1$  від нижньої зони інтенсивного теплообміну з відношенням теплоємностей потоків шихти й газу

$m_H=(W_{ш}/W_r)>1$ . Основним фактором внутрішнього теплоспоживання шихти є розвиток прямого відновлення заліза. Чим воно більше, тим інтенсивніше теплообмін у нижній зоні. Однак у міру збільшення ступеня попередньої металізації шихти об'єм розвитку прямого відновлення скорочується, і інтенсивність теплообміну зменшується. Відбувається поступова трансформація властивій доменної плавці схеми теплообміну в напрямку схеми, властивій вагранці.

Специфічною особливістю технології доменної плавки із застосуванням попередньо металізованої сировини є ослаблення впливу розподілу матеріалів на колошнику на показники плавки, а також різке скорочення ефективності (часто недоцільність) вдування відновлювальних газів, що обумовлено скороченням об'єму прямого відновлення.

Природний газ (ПГ). У міру збільшення витрат ПГ скорочується теплоспоживання на пряме відновлення заліза й відповідно зменшується відношення теплоємностей шихти й газу, а також інтенсивність теплопередачі в нижній зоні при збільшенні її у верхній зоні. Внаслідок цього збільшується висота нижнього ступеня теплообміну й відповідно скорочується висота верхнього. У результаті ізотерми газу й шихти переміщуються вгору, збільшуючи втрати через колошник, а зона розм'якшення й плавлення розташовується вище базового положення й товщає. Зменшення температур газу в нижній зоні сприяє скороченню загальних теплових втрат. Під дією зазначених факторів, що не враховуються при балансових розрахунках, зміна диференціального еквівалента заміщення коксу (ДЕЗ) при збільшенні витрат ПГ змінюється не настільки плавно: у діапазоні до  $100 \text{ м}^3/\text{т}$  чав. він скорочується рівномірно – на  $0,1 \text{ \%}/\text{м}^3$  від вихідної величини  $1,0\text{--}0,9 \text{ кг}/\text{м}^3$ . При подальшому збільшенні витрат ПГ і зменшенні ступеня прямого відновлення до  $r_d < 20 \text{ \%}$  відбувається різке збільшення температури колошникового газу, що приводить до зменшення ДЕЗ в  $1,5\text{--}4$  рази. Перехід до більш рівномірного розподілу рудного навантаження (РН) у РКЗ–2–9 послабляє падіння ДЕЗ в області  $\text{ПГ} > 100 \text{ м}^3/\text{т}$  чав., підвищуючи ефективність.

Температурне поле газового потоку в об'ємі печі при збільшенні витрат ПГ деформується в напрямку зменшення температур нижньої й збільшення температур верхньої зон  $T$ . При цьому у всіх РКЗ суттєво зменшується різниця температур газу й шихти  $T-t$  у нижній зоні ( $>900 \text{ }^\circ\text{C}$ ) і збільшується аналогічна величина по висоті верхньої зони ( $<900 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Одночасно відбувається зменшення відношення теплоємностей потоків шихти й газу  $m$  у зоні прямого відновлення від  $3\text{--}5$  до  $1,5\text{--}2$  за рахунок скорочення середнього ступеня прямого відновлення від  $35\text{--}40 \text{ \%}$  до  $r_d < 20 \text{ \%}$ , а в периферійній зоні й деяких РКЗ із малим рудним навантаженням – до малозначних величин.

Зменшення величин  $T-t$  і  $m$  у нижній зоні приводять до зменшення інтенсивності теплообміну в цій зоні, а збільшення  $T-t$  у верхній зоні – до збільшення інтенсивності теплообміну в ній. У результаті цього в більшості радіальних кільцевих зон збільшується висота нижнього й скорочується висота верхнього ступенів теплообміну, причому загальна висота (зверху) прогрівання матеріалів до заданих температур зменшується. Відповідно з переміщенням

ізотерм відбувається й зміщення нагору ЗРП і, при заданих властивостях матеріалів, збільшення її товщини. Спостерігається також деяке збільшення температур початку розм'якшення й плавлення, обумовлене скороченням кількості монооксиду заліза в первинних шлаках, яке сприяє переміщенню ЗРП униз. Однак величина цього зсуву значно менша, чим від переміщення ізотерм ввверх.

Зменшення температур газу в нижній зоні сприяє скороченню теплових втрат значно більшому, ніж їхнє зростання у верхній зоні, де температури газу збільшуються. У результаті загальні теплові втрати скорочуються.

Таким чином, напрямок деформації температурного поля газового потоку при збільшенні витрат ПГ аналогічно його деформації при використанні попередньо металізованої шихти, де відбувається поступова трансформація властивій доменній плавці схеми теплообміну в напрямку схеми, властивій вагранці (див. вище).

Температура дуття. У міру збільшення температури дуття ( $T_d$ ) при фактичному розподілі рудного навантаження (ФРН) відбувається скорочення витрат коксу ( $\Delta k$ ) і збільшення продуктивності ( $\Delta P$ ), що відрізняються для різних умов, у тому числі різних витратах природного газу (ПГ) і вмісту кисню в дутті (%  $O_2$ ). У межах кожного варіанту умов зі збільшенням  $T_d$  величини  $\Delta k$  і  $\Delta P$  плавно скорочуються в 1,5–2 рази; більші значення  $\Delta k$  відносяться до варіанта атмосферного дуття із ПГ=100 м<sup>3</sup>/т (0,7÷0,2 %/10<sup>o</sup>), менші – до варіанта кисневого дуття (% $O_2$ =30 %, ПГ=100 м<sup>3</sup>/т) (0,4÷0,1 %/10<sup>o</sup>). Одним з факторів скорочення величин  $\Delta k$  і  $\Delta P$  при збільшенні  $T_d$  є затримка зменшення температури колошникового газу ( $t_k$ ). При цьому виявлено, що область мінімальних значень  $t_k$  відповідає діапазону значень теоретичної температури горіння ~ 2000–2200 °С. При завантаженні шихти з одержанням на колошнику рівномірного розподілу рудного навантаження в кільцевих зонах 2–9 (РРН) величини економії коксу й приросту продуктивності від нагрівання дуття на 10–20 % (відн.) менші, чим при ФРН, внаслідок досягнення високого середнього ступеня використання енергії газів і відповідно більшого наближення до граничних термохімічних умов плавки. Особливості переносу теплоти в стовпі шихти при збільшенні  $T_d$  наступні:

– у випадку фактичного розподілу рудних навантажень (ФРН) у нижніх високотемпературних зонах (>900 °С) через більш проникні радіальні кільцеві зони (РКЗ–1,3–5) з низьким рудним навантаженням проходить більше газу (по масі), чим через менш проникні РКЗ (2,6–9) з високим рудним навантаженням, що внаслідок меншого охолодження газу в перших й збільшення його об'єму відносно других стимулює перетікання газу з перших у другі через коксові шари й сприяє підтримці інтенсивності теплопередачі в зоні помірних температур на рівні, який забезпечує зменшення  $t_k$  при збільшенні  $T_d$  ~1000 °С й достатньому для її підтримки на рівні, дещо вищим мінімально–досягнутого при збільшенні  $T_d$  вище 1000 °С; у випадку збагачення дуття киснем інтенсивність перетікань зменшується, що приводить до збільшення  $t_k$  при високих концентраціях кисню;

– у нижній частині печі при фактичному розподілі рудного навантаження (ФРН) з'являються додаткові високотемпературні ізотерми газу, а переміщення ізотерм відбувається залежно від газопроникності: ізотерми шихти й газу високонавантажених малопроникних РКЗ переміщуються вниз, збільшуючи область помірних температур у шахті, а ізотерми низьконавантажених високопроникних РКЗ переміщуються вгору, що сприяє затримці зниження  $t_k$ ;

– різниця температур газу й шихти збільшується при фактичному розподілі рудного навантаження (ФРН) у всіх РКЗ знизу й у низьконавантажених – зверху, а зменшується – у високонавантажених РКЗ зверху;

– застосування рівномірного розподілу рудних навантажень у радіальних кільцевих зонах 2–9 (РРН) приводить до переміщення всіх ізотерм шихти й газу вниз із розширенням області помірних температур у шахті;

– зазначений характер переміщення ізотерм властивий варіантам на атмосферному й збагаченому киснем до 30 % дутті, однак у другому випадку високотемпературні ізотерми розташовані вище, чим у першому, а більшість значень різниць температур газу й шихти збільшуються й зміщуються вгору, що визначає й більш високу температуру колошникового газу в першому випадку.

Зона розм'якшення й плавлення (ЗРП) при збільшенні  $T_d$  до 1000 °С у всіх варіантах із ФРН переміщається вниз у високонавантажених РКЗ–2,6–9 і вгору – у низьконавантажених РКЗ–1,3–5 при деякому скороченні товщини ЗРП. У варіантах із РРН ЗРП усіх РКЗ переміщуються вниз зі скороченням товщини. Тенденція такого переміщення ЗРП слабшає в міру зростання  $T_d > 1000$  °С з перевагою деякого переміщення вгору в периферійних РКЗ–10 і центральних РКЗ–1.

Кисень. Для аналізу ходу процесів в об'ємі печі результати розрахунків представлені чисельними значеннями інтенсивності теплопередачі (градусів на 1 метр висоти при фактичному розподілі рудного навантаження ФРН), яка характеризується швидкістю нагрівання шихти від температури завантаження до 900 °С –  $\text{ШН}_{<900}$  і від 900 до 1300 °С –  $\text{ШН}_{>900}$ , а також охолодження газу від початкової температури в горні до 1000 °С –  $\text{ГТ}_{>1000}$  та від 1000 до 400 °С –  $\text{ГТ}_{<1000}$  для РКЗ із високим і низьким рудним навантаженням (вн, нн):

Варіант	Кисень 21 %, ПГ = 100 м <sup>3</sup> /т					Кисень 30 %, ПГ = 100 м <sup>3</sup> /т				
	10	9–вн	2–вн	3–нн	1–нн	10	9–вн	2–вн	3–нн	1–нн
$\text{ШН}_{<900}$	39,1	36,4	38,4	70,0	78,6	38,8	37,2	46,3	72,4	78,6
$\text{ШН}_{>900}$	75,5	93,0	81,6	100,0	105,3	75,5	83,3	80,0	108,1	114,3
$\text{ГТ}_{<1000}$	48	61	61	67	74	45	59	55,5	69	74
$\text{ГТ}_{>1000}$	151	200	178	151	145	172	217	192	170	164

Із чисельних даних випливає, що при збільшенні концентрації кисню в дутті від 21 до 30 % при витратах ПГ=100 м<sup>3</sup>/т і фактичному розподілі рудного навантаження (ФРН) спостерігаються наступні зміни:

– у високотемпературних зонах інтенсивність передачі теплоти від газу до шихти ( $\Pi_{T>1000}$ ) збільшується у всіх радіальних кільцевих зонах (РКЗ), а швидкість нагрівання шихти ( $\Pi_{\dot{T}>900}$ ) збільшується тільки в РКЗ із низьким рудним навантаженням, але зменшується в РКЗ із високим рудним навантаженням (у варіанті з температурою дуття 200 °С – не змінюється);

– в низькотемпературних зонах інтенсивність передачі теплоти від газу до шихти ( $\Pi_{T<1000}$ ) збільшується в РКЗ із низьким рудним навантаженням і зменшується в РКЗ із високим рудним навантаженням;

– більша частина ізотерм шихти й газу переміщуються вгору, за винятком низькотемпературних (<900 °С) периферійних (РКЗ–10) ізотерм шихти, які зміщуються вниз із розширенням низькотемпературної області в цій зоні; вгору переміщується й значення різниць температур газу й шихти.

Розглянуті особливості переносу теплоти значною мірою визначаються розподілом газу по радіусу печі і його перетіканнями на різних горизонтах. З результатів розрахунків випливає, що в нижніх високотемпературних зонах ВТЗ–8–12 через більш проникні РКЗ–1,3–5 з низьким рудним навантаженням проходить більше газу (по масі), чим через менш проникні РКЗ–2,6–9 з високим рудним навантаженням. У ході тепловіддачі в стовпі шихти газ у РКЗ–1,3–5 (**ни**) охолоджується менше, чим у РКЗ–2,6–9 (**ви**), а температура його стає вищою, чим у РКЗ–2,6–9. Відповідно збільшується й об'єм газу в РКЗ–1,3–5 відносно РКЗ–2,6–9, що стимулює перетікання газу з перших у другі через коксові шари, які більш проникні, чим рудні, в 5–6 разів, іноді на порядок. В результаті у верхніх низькотемпературних зонах (ВТЗ–1–6) маса газу в РКЗ–2,6–9 (**ви**) збільшується, а в РКЗ–1,3–5 (**ни**) зменшується. Таке «підживлення» газом малопроникних РКЗ через коксові шари сприяє поліпшенню теплопередачі у верхніх ВТЗ у цілому, але лише частково компенсує недосконалість теплопередачі через нерівномірність розподілу матеріалів.

Таким чином, зі збільшенням вмісту кисню в дутті ( $\%O_2$ ) у нижній частині печі утворюються додаткові високотемпературні ізотерми газу, а більша частина ізотерм, а також різниця температур газу й шихти переміщуються вгору. Лише низькотемпературні ізотерми шихти в периферії при ФРН і всі периферійні й центральні ізотерми шихти й газу при РРН зміщуються вниз, розширюючи низькотемпературну область у цих зонах. Істотне розширення низькотемпературної області в шахті спостерігається також при  $T_d=200$  °С. ЗРП зміщується вгору у малозавантажених РКЗ і вниз у високозавантажених при деякому збільшенні її товщини, причому ця тенденція слабшає в міру збільшення  $T_d$  і витрат ПГ; при  $\Pi \geq 100$  м<sup>3</sup>/т вона стає малозначною, а при РРН – незначною. Під впливом зазначених процесів температура колошникового газу  $t_k$  у більшості режимів з підвищенням  $\%O_2$  збільшується або не змінюється й трохи зменшується лише при низьких  $T_d$ . Оскільки величина ступеня прямого відновлення  $r_a$  також суттєво не зменшується при зростанні концентрації відновлювачів і скороченні часу перебування шихти в печі, а питомі втрати теплоти змінюються незначно, переважним фактором теплового балансу виявляється скорочення приходу теплоти з дуттям при виведенні частини азоту. В результаті, на відміну від ряду балансових розрахунків, де

передбачається скорочення  $t_d$  і зменшення  $t_k$ , приріст продуктивності при збільшенні  $\%O_2$  виявився меншим (0,9÷2,7 проти 1,0÷3,0 %/%), а перевитрати коксу більшими (0,5÷1,45 проти 0,1÷0,5 %/%):

%O <sub>2</sub>	ΔП, %/%		Δк, кг/т на 1 % O <sub>2</sub>		Δк, %/%	
	модель	баланс	модель	баланс	модель	баланс
<b>21÷25</b>	1,1÷2,7	1,2÷3,0	1,4÷6,5	1,0÷2,0	0,8÷1,45	0,2÷0,5
<b>25÷30</b>	0,9÷1,35	1,0÷2,1	3,6÷4,7	0,5÷1,0	0,5÷1,0	0,1÷0,4

<sup>\*)</sup>ΔП, Δк – у діапазоні концентрацій кисню від попередньої до поточної.

Для виявлення тенденції до збільшення температури колошникового газу при збагаченні дуття киснем на реальних доменних печах виконали статистичне дослідження параметрів доменних печей №№ 5-9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» за період 5 років при тривалості одиничного періоду 1 місяць. Виявлений аналіз показав, що збільшення  $\%O_2$  призводить переважно до збільшення  $t_k$ . Це відповідає результатам виконаного О.Н. Раммом узагальнення експериментальних даних.

**У п'ятому розділі** виконано аналіз альтернативних технологій заміщення коксу в доменній плавці. На основі виконаного параметричного аналізу сформовані умови комплексного використання кращих параметрів плавки й проведено аналітичне дослідження показників і процесів доменної плавки з позицій максимального скорочення витрат коксу за рахунок його заміщення пиловугільним паливом ПВП (250 кг/т) і коксовим газом (100 м<sup>3</sup>/т) зі збільшенням температури дуття до 1300 °С і концентрації в ньому кисню 25 % при вмісті заліза в повністю офлюсованій шихті до 60 % та необхідному поліпшенні металургійних властивостей коксу й сировини, а також оптимізації розподілу матеріалів на колошнику. Розрахунками встановлено можливість скорочення витрат коксу в зазначеному режимі до 200 кг/т чав. При цьому високоефективна технологія вдування ПВП не може бути єдиною в галузі у зв'язку з дефіцитом високосортного вугілля і динамічною кон'юнктурою ринку. Для одержання величини економії коксу від вдування 250 кг/т високосортного ПВП у випадку його заміщення низькосортним буде потрібно збільшити витрати до 400 кг/т. Цей варіант є умовним, тому що при вдуванні ПВП з високозольного вугілля (особливо в великих кількостях) різко скорочується повнота спалювання вуглецю й зрідження зольної частини, що перешкоджає реалізації технології.

Фундаментальне вирішення проблеми скорочення витрат коксу до 180÷200 кг/т чавуну з використанням для його заміщення низькосортного вугілля може бути отримане на основі технології доменної плавки із вдуванням гарячих відновних газів – продуктів газифікації вугілля (ПГВ), одержуваних за умов попередньої газифікації пиловугільного палива в спеціальних газифікаторах – прифурмених (на доменній печі) і придоменних (в окремих агрегатах).

Для оцінки показників доменної плавки, при заміні високосортного вугілля у вигляді ПВП низькосортним у вигляді ПГВ, для умов роботи ДП №5

«Северсталь» і ДП №9 «АрселорМіттал Кривий Ріг» виконали розрахунковий аналіз.

Розрахункові варіанти включають (при виключенні природного газу – ПГ):

1. Вдування ПВП із високосортного вугілля (до 10 % золи, 13 % летючих) – 250 кг/т чавуну (ПВП<sub>BC250</sub>).

2. Вдування ПГВ отриманого із низькосортного вугілля 25 % золи, 25 % летючих (ПГВ<sub>HC</sub>) при подачі в прифурменій реактор–газифікатор (ПФГ) вугілля – 400 і 450 кг/т чавуну, що припускає заміщення кількості коксу, близького до варіанту 1 і відповідної кількості гарячого дуття, що вдувається через повітряні фурми доменної печі (ПГВ<sub>HC400</sub>, ПГВ<sub>HC450</sub>).

3. Те ж, що п. 2, але із вдуванням через повітряні фурми невідігрітого кисню замість гарячого дуття (ПГВ<sub>HC400O</sub>).

Величина скорочення витрат коксу ( $\Delta k$ , кг/т чавуну) при вдуванні ПВП й ПГВ визначалася не тільки вмістом вуглецю й золи у вугіллях, але також зміною в доменній плавці кількості шлаку ( $\Delta \Pi$ , кг/т чав.), сирого вапняку ( $\Delta B$ , кг/т чав.), температури колошникового газу ( $\Delta t_k$ , град.), ступеня відновлення ( $\Delta r_d$ , %) і втрат теплоти ( $\Delta q$ , % відн.). Зазначені величини, а також отриманий еквівалент заміщення коксу вугіллям ( $E_3$ , кг/кг), склали:

АМКР ДП–9 ССт ДП–5	ПВП <sub>BC250</sub>	ПГВ <sub>HC400</sub>	ПГВ <sub>HC450</sub>	ПГВ <sub>HC400O</sub>
ПГВ, м <sup>3</sup> /т	–	1282 / 1389	1443 / 1739	1282 / 1546
$\Delta k$ , кг/т	–172 / –188	–162 / –160	–186 / –138	–74 / –148
$\Delta \Pi$ , кг/т	+26 / +23	+121 / +124	+148 / +140	+121 / +125
$\Delta B$ , кг/т	+8 / +5	+95 / +78	+108 / +90	+95 / +79
$\Delta t_k$ , град.	+31 / –58	+25 / –24	+33 / –13	+25 / +35
$\Delta r_d$ , %	+2,9 / +6,9	–10,1 / –3,8	–12,3 / –7,4	–10,1 / –19,0
$\Delta q$ , %	–1,6 / –1,6	+2,1 / +5,9	+30,5 / +7,3	+30,5 / –2,0
$E_3$ , кг/кг	1,09 / 1,1	0,61 / 0,63	0,59 / 0,51	0,39 / 0,6

У випадку попередньої газифікації ПВП з подачею у фурмені зони ПГВ економія коксу дещо зменшується за рахунок додаткових втрат теплоти при охолодженні газифікатора (вар. ПГВ<sub>HC400</sub>), а при заміні гарячого дуття невідігрітим киснем економія скоротиться додатково (вар. ПГВ<sub>HC400O</sub>). Підвищення величини економії коксу можливе при збільшенні кількості ПГВ (вар. ПГВ<sub>HC450</sub>).

При заміні на ДП–9 і ДП–5 природного газу (95 і 106 м<sup>3</sup>/т) на ПГВ (1282–1739 м<sup>3</sup>/т) на обох доменних печах має місце зниження ступеня прямого відновлення. При цьому в ряді варіантів, де його значення убуває нижче 20 %, спостерігається тенденція прискорення зростання температури колошникового газу зі збільшенням витрат ПГВ. Це відповідає встановленій закономірності про трансформацію двоступінчастої схеми теплообміну в печі в міру скорочення

внутрішнього споживача теплоти в шихті в області прямого відновлення й дисоціації карбонатів.

Питомі теплові втрати змінюються під впливом деякого зменшення температур газів у нижній частині печі при значному скороченні продуктивності агрегату. У результаті в основних варіантах вони збільшуються.

Зазначені результати характерні для обох доменних печей застосовно до технології з подачею частини гарячого дуття з колектора в прифурмений реактор–газифікатор для газифікації ПВП, а іншої частини – у фурмені зони для спалювання коксу.

Деяко відрізняються результати для випадку заміни гарячого дуття невідігрітим киснем, запропонованого з метою застосування більш компактною конструкції прифурмених газифікаторів. У цьому випадку для ДП–5 «ССт» при низьких вихідних і прогнозованих витратах вуглецю коксу біля фурм потреби кисню дуття на його спалювання малі, що приводить при виведенні нагрітого дуття до невеликого збільшення витрат коксу, яке може бути прийнятним при одночасному зростанні продуктивності печі. Для умов же ДП–9 «АМКР», при більш високих вихідних і прогнозованих витратах вуглецю коксу біля фурм, потреби кисню дуття на його спалювання досить великі, що приводить при виведенні нагрітого дуття до збільшення витрат коксу, порівнянному з економією від вдування ПГВ, а також до деформації процесів з порушенням їх стійкості.

Шляхом коригування отриманої в кожному варіанті величини економії коксу на коксовий еквівалент виведеного із плавки природного газу й ділення на витрату газифікованого вугілля встановили еквівалент заміщення ним коксу (кг/кг). Як впливає із наведених вище результатів, значення  $E_3$  відповідних варіантів двох печей близькі, крім варіанта технології із заміною гарячого дуття невідігрітим киснем, особливості якого розглянуті вище. Відношення еквівалентів заміщення коксу вугіллями прийнятого складу – низькосортним (у вигляді ПГВ) і високосортним (у вигляді ПВП) становить 0,56 – при витратах першого 400 кг/т і 0,54 – при витратах його 450 кг/т. Зазначене відношення може бути використане при оцінці припустимої вартості низькосортного вугілля відносно заміщуваного високосортного. При цьому слід урахувати можливість уведення додаткового вапняку для офлюсування золи до складу агломерату, що приведе до підвищення ефективності технології й збільшення зазначеного відношення щонайменше до 0,65 при відношенні вмісту нелетючого вуглецю 0,64.

Однією із найважливіших проблем технології, які визначають основні характеристики одержуваних газоподібних ПГВ (склад, температура, ентальпія) є вибір величини мольної витрати кисню на газифікацію вуглецю газифікованого вугілля, що обчислюється як відношення  $O/C$ , моль/моль. Вибір величини мольної витрати кисню на газифікацію вуглецю газифікованого вугілля проводиться виходячи з її впливу на відновний потенціал і температуру генерованих ПГВ.

Так для умов ССт при газифікації заданих витрат вугілля в кількості 400 кг/т чавуну об'єм газів ПГВ в міру збільшення значення  $O/C$  від 0,4 до 0,7

збільшується від 1078 до 1576 м<sup>3</sup>/т чавуну при підвищенні їх температури від 1411 °С до 2027 °С і зменшенні частки відновних компонентів у них від 55,1 % до 32,2 %.

Установлено, що збільшення витрат кисню для газифікації вугілля, що вдувається, при відношенні  $O/C > 0,5$  моль/моль сприяє зростанню витрат коксу у всіх варіантах технології за рахунок зростання питомих втрат теплоти, обумовленого скороченням продуктивності плавки, а також за рахунок зменшення тепловіддачі ПГВ, обумовленого зростанням частки азоту, що вносить теплоту нагрівання дуття, меншу, чим теплота горіння біля фурм, що й виносить з печі через колошник таку ж кількість теплоти, як відновлювальні компоненти (в розрахунку на одиницю). При цьому в об'ємі доменної печі відбувається зсув ізотерм униз зі зменшенням висоти нижнього ступеня теплообміну. Тому прагнення збільшити повноту газифікації вугілля шляхом збільшення надлишку окислювача слід обмежити значенням вказаної величини  $\leq 0,5$ .

У випадку застосування позадоменних газифікаторів (ПДГ) передбачається наявність на печі двох колекторів – дуття для окислення коксу й подачі продуктів газифікації вугілля (ПГВ), з яких дуття й ПГВ дозуються по фурмах доменної печі. Для аналізу впливу параметрів газифікації вугілля на формування складу й властивостей, що вдуваються в піч через фурми ПГВ, а також на хід процесів в об'ємі печі й кінцеві показники доменної плавки, виконали комплекс розрахунково-аналітичних досліджень зі змінюваними характеристиками дуття: кисень (%): факт. – 30–40–60; температура (°С): 1300–1100–700–100. Особливістю розрахунків у випадку газифікації вугілля у ВДГ є задавання у вихідних даних складу беззольної маси вугілля, яка вводиться в доменну піч у вигляді ПГВ, залишаючи золу у позадоменних газифікаторах.

У міру збільшення концентрації кисню в дутті ВДГ від вихідної 24,3–27 % до 60 % і зменшення його температури від 1100–1184 °С до 700 °С (для підтримки температури ПГВ в межах 1500–1600 °С) об'єм газів ПГВ скорочується від 1188 до 799 м<sup>3</sup>/т чавуну на ДП-9 «АМКР» і від 1278 до 807 м<sup>3</sup>/т на ДП-5 «Северсталь». Майже пропорційно скороченню об'єму ПГВ збільшується частка відновних компонентів у них, у результаті чого кількість надходження із ПГВ відновлювачів  $CO + H_2$  залишається у вузьких межах (665–675 м<sup>3</sup>/т), а зростання їх концентрації в газі сприяє скороченню прямого відновлення лише на 3 % у всьому діапазоні концентрацій кисню в дутті або тільки на 0,09 %/%. При цьому досить суттєво скорочується прихід теплоти з дуттям і добавками: величина зменшення становить 18–19 % від загального приходу теплоти, що й визначає основну частину величини перевитрат коксу (16–19 %) при збагаченні киснем дуття газифікатора до 60 %. Продуктивність доменної печі з підвищенням концентрації кисню в дутті газифікатора вугілля збільшується на 0,4–0,5 %/%, а істотне зростання теоретичної температури горіння (до 2025 °С) обумовлене скороченням частки ПГВ в загальному об'ємі фурмених газів при меншій їх температурі відносно газів із коксу.

Виявлені зміни показників доменної плавки вказують на доцільність газифікації вугілля атмосферним дуттям з максимально-можливою

температурою. У цьому варіанті досягаються мінімальні витрати коксу, однак, гірші показники продуктивності. Для збільшення продуктивності печі доцільна заміна гарячого дуття непідігрітим киснем. У цьому випадку при збільшенні продуктивності дещо зростають витрати коксу.

У реальних умовах виробничої кон'юнктури вибір варіанта технології заснований на альтернативі й, як правило, пов'язаний з неформальним компромісом. При безумовній пріоритетності найбільш економічних варіантів плавки в ряді випадків і в окремі періоди доцільно віддати перевагу варіантам підвищеної продуктивності. Додатковим технічним аргументом на користь таких варіантів є їхня газодинамічна перевага, яка виражається меншою кількістю пічного газу, що доводиться на одиницю коксу. Це обумовлено тим, що кокс є основним регулятором розподілу газів і газопроникності стовпа шихти. При скороченні його витрат й збільшенні об'єму газів протитечія ускладнюється й потрібне істотне поліпшення фізико-механічних властивостей шихти, яке не завжди можна реалізувати в доступний для огляду час. Величина відношення об'єму пічних газів до величини витрат коксу  $V/K$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ) у розглянутих варіантах складає:

Об'єкти	ДП-9 «АМКР»			ДП-5 «Сєверсталь»		
	КД <sub>60</sub> 100	АД.1300	КД <sub>60</sub> 100	АД.1300	КД <sub>60</sub> 100	АД.1300
Дуття ВДГ	КД <sub>27</sub> 1100	КД <sub>30</sub> 1300	КД <sub>27</sub> 1100	КД <sub>30</sub> 1300	КД <sub>27</sub> 1100	КД <sub>30</sub> 1300
Дуття ДП	5,5	9,3	5,5	9,3	5,5	9,3
$V/K, \text{м}^3/\text{кг}$						

*Вдування в доменну піч кисневого дуття – КД (вміст кисню – нижній індекс – 27–30–90), нагрітого до 100–1100–1300 °С, а також при використанні ПТВ, одержуваних у позадомених газифікаторах (ПДГ) на атмосферному дутті АД і кисневому дутті КД (вміст кисню – нижній індекс – 27–40–60), нагрітому до 100–700–1100–1300 °С.*

Реалізація варіанту газифікації вугілля гарячим атмосферним дуттям при використанні в доменній печі гарячого дуття (1300 °С) приводить до зростання відношення  $V/K$  від 5,5–5,7 до 8,2–9,3, а перехід до заміни гарячого дуття в доменній печі непідігрітим киснем дозволяє скоротити це відношення до 6,2–7,6 ціною деякого збільшення витрат коксу.

**У шостому розділі** на основі узагальнення закономірностей протікання процесів доменної плавки й установлених загальних принципів її функціонування дається нормативна оцінка впливу технологічних параметрів на витрату коксу й продуктивність доменної печі. Зазначена нормативна оцінка є методичною основою для виконання оперативного аналізу технології при зміні окремих параметрів плавки і їх сукупності. Розроблений методичний інструмент «Нормативна оцінка впливу параметрів доменної плавки на витрати коксу й продуктивність доменної печі» є розвитком раніше розробленого під керівництвом проф. Й. Г. Товаровського галузевого документа «Доменні печі. Нормативи витрат коксу», який в подальшому уточнювався по окремих позиціях на металургійних підприємствах на основі практичних даних, аналітичних і експериментальних досліджень. В уточненому вигляді справжня методика містить коригування значень колишніх нормативів і нові доповнення (вибірково викладені в табл.4).

Таблиця 4 - Оцінка впливу факторів на питому витрату коксу і продуктивність печі

п/п	Фактори і одиниці вимірювання	+ збільшення, - зменшення	
		Витрати коксу, %	Продуктивність, %
1	Підвищення вмісту заліза на кожен 1% (у всій шихті без коксу і CO <sub>2</sub> флюсу)		
	в межах до 50 %	-1,4 / -1,88	+2,4
	в межах 50-55 %	-1,2 / -1,61	+2,0
	в межах 55-60 %	-1,0 / -1,34	+1,7
	Те ж, зниження кількості шлаку на кожні 10 кг/т чавуну	-0,35 / -0,46	+0,6
2	Підвищення витрат чистих (100% Fe) металодобавок на кожні 10 кг/т чавуну	-0,4 / -0,53	+0,6
6	Зменшення вмісту сірки в коксі на кожен 0,1% при [S] = 0,05%	-0,18 / -0,24	+0,18
	при [S] = 0,04%	-0,22 / -0,29	+0,22
	при [S] = 0,03%	-0,27 / -0,36	+0,27
	при [S] = 0,02%	-0,38 / -0,52	+0,38
	при [S] = 0,01%	-0,71 / -0,95	+0,71
7	Підвищення міцності коксу, %/‰:		
	за показником M25 за показником CSR	-0,6 / -0,80 -0,54 / -0,7	+0,6 +0,49
8	Заміщення коксу антрацитом, кг/кг	0,8 – 1,0	–
9.	Підвищення температури дуття на кожні 10 °C в діапазонах:		
	при концентрації кисню в дутті до 25 %		
	1000-1100 °C	-0,30 / -0,40	+0,30
	1100-1200 °C	-0,28 / -0,38	+0,28
	1200-1300 °C	-0,25 / -0,34	+0,25
	1300-1400 °C	-0,22 / -0,29	+0,22
10	Збагачення дуття киснем на кожний 1 % (абс.) при концентрації:		
	до 25 %	+0,50 / 0,67	+2,0
	25-30 %	+0,80 / 1,07	+1,7
	30-35 %	+1,10 / 1,47	+1,4
	35-40 %	+1,40 / 1,88	+1,1
11	Коефіцієнт заміни коксу природним газом при витратах:		
	до 100 м <sup>3</sup> /т	0,80 кг/м <sup>3</sup>	–
	100-150 м <sup>3</sup> /т	0,60 кг/м <sup>3</sup>	–
	150-200 м <sup>3</sup> /т	0,40 кг/м <sup>3</sup>	–

В чисельнику вказані нормативи для технології з використанням природного газу, в знаменнику - з вдуванням пилівугільного палива (ПВП).

## ВИСНОВКИ

У роботі розглянуті проблеми пізнання процесів доменної плавки на основі їх моделювання й системного аналізу. Виконані за допомогою багатозонної математичної моделі аналітичні дослідження, дозволили оцінити очікувані показники плавки при різних технологічних режимах, а також виявити й уточнити нові закономірності процесів, які можуть бути використані в ході вдосконалювання технології доменної плавки.

1. Розроблено математичну модель доменної плавки, особливістю якої є розрахункова взаємопов'язаність фазових перетворень, газодинамічних і тепломасообмінних процесів у загальних і зональних балансових співвідношеннях в об'ємі печі, а також наявність нових елементів, відсутніх у відомих аналогічних моделях:

- можливість розрахунків зовнішніх і внутрішніх параметрів плавки при нерівномірності розподілу матеріалів по радіусу печі;

- урахування роботи розширення газу, розмір якої включено у видаткову частину балансу, що робить величину залишкового члена теплового балансу близьким до величини теплових втрат, вимірюваних на діючих доменних печах;

- урахування тепловтрат печі дозволяє оцінювати вплив розподілу матеріалів по радіусу печі на тепловтрати, а також вплив усіх технологічних факторів на витрату коксу з урахуванням зміни тепловтрат;

- передбачене уточнення величини середньої температури відхідного газу зі стовпа шихти з урахуванням нерівномірності потоку;

- оцінка параметрів зони розм'якшення й плавлення з урахуванням впливу ступеня відновлення заліза й приходу лужних оксидів ( $K_2O+Na_2O$ ) сприяє підвищенню системності аналізу процесів і дозволяє дати кількісну оцінку впливу параметрів на кінцеві показники плавки, у тому числі на витрати коксу.

2. На основі аналітичного дослідження за допомогою багатозонної математичної моделі процесів доменної плавки вперше дана прогнозна оцінка впливу характеру розподілу шихтових матеріалів на колошнику на процеси й показники плавки в кількісній формі. Максимальна загальна величина можливої економії коксу від поліпшення розподілу шихтових матеріалів (від гіршого при використанні конусних завантажувальних пристроїв до рівномірного в радіальних кільцевих зонах 2–10 при використанні безконусних завантажувальних пристроїв) становить 7%, у тому числі: перехід від конусного в лотковий режим дозволяє одержати економію 4%; удосконалювання параметрів завантаження конусного завантажувального пристрою може дати економію до 2%; удосконалювання параметрів завантаження безконусного завантажувального пристрою – до 3%. Механізм встановленого впливу полягає в тому, що в міру зменшення нерівномірності рудного навантаження по радіусу відбувається ослаблення лімітуючого впливу найбільш навантажених зон на загальний результат з перенесенням частини термохімічної роботи в менш навантажені зони. Це сприяє запобіганню формування в найбільш навантажених зонах «критичних» умов (виродження зон теплообміну, падіння відновлювального потенціалу газу, газо– і

гідродинамічний опір і ін.), які приводять в остаточному підсумку до збільшення загальної потреби теплоти.

3. У ході чисельного дослідження впливу величин кінетичних коефіцієнтів (об'ємного коефіцієнта теплопередачі в стовпі шихти, коефіцієнта швидкості відновлення заліза, коефіцієнта знімання теплоти зі стін) на показники й процеси плавки встановлено, зокрема, що загальна зміна витрат коксу під впливом змін кожного з них у всьому діапазоні його реальних значень становить  $\pm(5\div 7)\%$  від середнього, й уточнено характер і тепло-фізико-хімічний механізм переміщення температурно-концентраційних полів. Установлено, що:

- збільшення швидкості теплопередачі в стовпі шихти приводить до переміщення ізотерм газу вниз зі зменшенням різниці температур газу й шихти у всіх радіальних кільцевих зонах при скороченні висоти нижніх і збільшенні висоти верхніх зон теплообміну з поступовим виродженням верхнього ступеня теплообміну в ряді радіальних кільцевих зон;

- збільшення швидкості непрямого відновлення приводить до збільшення різниці температур газу й шихти в периферії (РКЗ–10) в області протікання прямого відновлення (900–1100 °С); при цьому в РКЗ–2–9 границя верхньої й нижньої зон теплообміну з мінімальною по висоті печі різницею температур газу й шихти зміщується вниз, зменшуючи висоту нижньої й збільшуючи висоту верхньої зон теплообміну; а в РКЗ–1 і 10 ця границя зміщується вгору внаслідок перетікання газів по висоті із РКЗ–2–9 до периферії й центру;

- збільшення знімання теплоти зі стін приводить до переміщення периферійних ізотерм газів (РКЗ–10) униз, а інших РКЗ – вгору зі збільшенням різниці температур газів і матеріалів у всіх РКЗ; причому границя зон теплообміну з мінімальною по висоті різницею температур газів і матеріалів переміщується вгору, збільшуючи висоту нижньої й скорочуючи висоту верхньої зон, що супроводжується перетіканням газу по висоті стовпа шихти у бік периферії з підвищенням температури колошникового газу й збільшенням потреб коксу для покриття теплового дефіциту периферійної зони; поряд з теплотехнічною виникає технологічна потреба коксу для покриття теплових втрат.

4. При ступені попередньої металізації до 20 % величини економії коксу на кожний додатковий 1 % металізації становить 0,25–0,55 %, а приріст продуктивності – до 0,4 %. Вони близькі до відомих експериментальних і розрахункових балансових значень і залежать від вихідного ступеня прямого відновлення. При зростанні ступеня попередньої металізації до 30 % економія коксу зменшується вдвічі. У міру збільшення ступеня попередньої металізації шихти скорочується теплоспоживання на пряме відновлення заліза й відповідно зменшується відношення теплоємностей шихти й газу, а також інтенсивність теплопередачі в нижній зоні. Внаслідок цього збільшується необхідна для нагрівання продуктів плавки висота нижнього ступеня теплообміну й відповідно скорочується висота верхнього при збільшенні мінімальної по висоті різниці температур шихти й газу. У результаті ізотерми газу переміщуються вгору, збільшуючи втрати через колошник, а зона

розм'якшення й плавлення розташовується вище базового положення й товщає. Під дією зазначених явищ основний балансовий фактор економії коксу від використання попередньо металізованої шихти не може бути реалізований досить повно при ступені металізації більше 20 %, тому що процеси тепломасообміну, фазових перетворень і газомеханіки розвиваються у напрямку, що обмежує ефективність реалізації цієї технології. Специфічною особливістю технології доменної плавки із застосуванням попередньо металізованої сировини є ослаблення впливу розподілу матеріалів на колошнику на показники плавки, а також різке скорочення ефективності (часто недоцільність) вдування відновлювальних газів, що обумовлено скороченням об'єму прямого відновлення.

5. Зі збільшенням витрат природного газу (ПГ) скорочується теплоспоживання на пряме відновлення й зменшується інтенсивність теплопередачі в нижній зоні при збільшенні її у верхній, внаслідок чого ізотерми газу й шихти переміщуються вгору, збільшуючи втрати через колошник, а зона розм'якшення й плавлення розташовується вище базового положення й товщає. Під дією зазначених факторів при витратах ПГ > 100 м<sup>3</sup>/т диференціальний еквівалент заміщення коксу скорочується від вихідної величини 0,9–1,0 кг/м<sup>3</sup> в 1,5–4 рази за рахунок різкого збільшення температури колошникового газу в зоні скорочення ступеня прямого відновлення до < 20 %. Те ж характерно для вдування коксового газу (КГ) при співвідношенні витрат КГ  $\approx$  2·ПГ.

6. Основним фактором економії коксу при збільшенні витрат пилувугільного палива (ПВП) є заміна теплоти горіння коксу теплотою горіння ПВП, який визначає еквівалент заміщення коксу більш ніж на 80 % і мало залежить від умов плавки, у тому числі витрат ПВП. Інша складова економії коксу – скорочення прямого відновлення залежить від умов відновного процесу. У підсумку диференціальний еквівалент заміщення коксу при всіх витратах ПВП близький до середнього в діапазоні 0–250 кг/т чавуну й становить 1,0–0,9 кг/кг. Температурне поле шихти й газового потоку в об'ємі печі при збільшенні витрат ПВП змінюється під впливом тих же тенденцій, що й при вдуванні природного і коксового газу, однак кількісно не настільки значно й неоднозначно для різних умов і розподілів шихти. Товщина зони розм'якшення й плавлення скорочується, а втрати теплоти зменшуються.

7. При збільшенні температури дуття (Тд) у випадку фактичного розподілу рудних навантажень (ФРН) у нижніх високотемпературних зонах через більш проникні кільцеві зони з низьким рудним навантаженням проходить більше газу (по масі), чим через менш проникні кільцеві зони з високим рудним навантаженням. Менше охолодження газу в перших стимулює перетікання газу з них у другі через коксові шари й сприяє підтримці інтенсивності теплопередачі на рівні, що забезпечує зменшення температури колошникового газу при збільшенні Тд  $\sim$  до 1000 °С, при цьому зона розм'якшення й плавлення переміщується вниз у високонавантажених радіальних кільцевих зонах і вгору – у малонавантажених з деяким скороченням товщини. Затримка зменшення температури колошникового газу з наступним невеликим її збільшенням є

одним з факторів скорочення економії коксу й приросту продуктивності при збільшенні  $T_d$  вище  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , причому область мінімальних значень температури колошникового газу для різних варіантів відповідає діапазону значень теоретичної температури горіння  $\sim 2000\text{--}2100\text{ }^\circ\text{C}$ . У межах кожного варіанта умов зі збільшенням температури дуття величини економії коксу плавно скорочуються в  $2,5\text{--}3,5$  рази; найбільші значення економії коксу відносяться до варіанту атмосферного дуття із природним газом ( $0,7\div 0,2$ , сер.  $0,40\text{ } \%/10^\circ$ ), а найменші – до варіантів без природного газу ( $0,4\div 0,13$ , сер.  $0,24\text{ } \%/10^\circ$ ).

8. Зі збільшенням вмісту кисню в дутті ( $\%O_2$ ) у нижній частині печі утворюються додаткові високотемпературні ізотерми газу, а більша частина ізотерм, а також різниця температур газу й шихти переміщуються вгору. Лише низькотемпературні ізотерми шихти в периферії при фактичному розподілі рудного навантаження на колошнику (ФРН) і всі периферійні й центральні ізотерми шихти й газу при рівномірному розподілі рудного навантаження в проміжних радіальних кільцевих зонах 2–9 (РРН) зміщуються вниз, розширюючи низькотемпературну область у цих зонах. Істотне розширення низькотемпературної області в шахті спостерігається також при температурі дуття  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Зона розм'якшення й плавлення зміщується вгору в низькозавантажених радіальних кільцевих зонах і вниз у високозавантажених при деякому збільшенні її товщини, причому ця тенденція слабшає в міру збільшення температури дуття й витрат ПГ; при  $ПГ \geq 100\text{ м}^3/\text{т}$  вона стає малозначною, а при рівномірному розподілі рудного навантаження в проміжних радіальних кільцевих зонах 2–9 – незначною. Під впливом зазначених процесів температура колошникового газу в більшості режимів з підвищенням вмісту кисню в дутті збільшується або не змінюється й трохи зменшується лише при низьких температурах дуття. Оскільки величина ступеня прямого відновлення заліза також суттєво не зменшується при зростанні концентрації відновлювачів і скороченні часу перебування шихти в печі, а питомі втрати теплоти змінюються незначно, переважним фактором теплового балансу виявляється скорочення приходу теплоти з дуттям при виведенні частини азоту. У результаті, на відміну від балансових розрахунків, де передбачається скорочення ступеня прямого відновлення й зменшення температури колошникового газу, приріст продуктивності при збільшенні вмісту кисню в дутті виявився меншим ( $0,9\div 2,7$  проти  $1,0\div 3,0\text{ } \%/ \%$ ), а перевитрати коксу більшими ( $0,5\div 1,45$  проти  $0,1\div 0,5\text{ } \%/ \%$ ).

9. Величина скорочення витрат коксу при вдуванні природного газу (ПГ) і коксового газу (КГ) виявилася більшою у випадку рівномірного розподілу рудного навантаження в проміжних кільцевих зонах 2–9 (РРН) (замість фактичного розподілу рудного навантаження ФРН) за рахунок збільшення еквівалента заміни коксу в області витрат природного газу  $ПГ > 100$ , коксового газу  $КГ > 200\text{ м}^3/\text{т}$  чавуну. У випадку пиловугільного палива вплив рівномірного розподілу рудного навантаження на еквівалент заміни коксу незначний, а при збільшенні температури дуття величини економії коксу й приросту продуктивності на  $10\text{--}30\text{ } \%$  (відн.) менші, чим при ФРН, внаслідок більшого

наближення до граничних термохімічних умов плавки. При збільшенні вмісту кисню в дуття, витрати коксу при рівномірному розподілі рудного навантаження в проміжних радіальних кільцевих зонах 2–9 зростають більше, чим при фактичному розподілі рудного навантаження.

10. Аналітичне дослідження процесів доменної плавки при вдуванні продуктів газифікації вугілля показало, що температурно–концентраційне й фазове поля шихти й газового потоку в об'ємі печі змінюються під впливом тих же тенденцій, що при вдуванні пиловугільного палива, однак, кількісно не настільки значно й неоднозначно для різних умов і розподілів шихти. Можливість значного збільшення кількості вугілля, що вдувається у випадку їх попередньої газифікації зі зрідженням золи в прифурмених газифікаторах, дозволяє у випадку заміни високосортного вугілля (у вигляді пиловугільного палива) низькосортним (у вигляді продуктів газифікації вугілля) одержати не тільки досягнення цільової економії коксу, але також при виборі раціональних параметрів плавки – скорочення витрат коксу до мінімального значення, близького до 200 кг/т. При цьому значення еквівалента заміни коксу вугіллям в кращих варіантах технології (при додатковому введенні вапняку до складу агломерату) близьке до відношення вмісту нелетючого вуглецю в них.

11. Вибір величини мольної витрати кисню на газифікацію вуглецю вугілля, що газифікується, проводиться виходячи з її впливу на відновний потенціал і температуру генерованих продуктів газифікації вугілля (ПГВ). Установлено, що для всіх варіантів технології в міру збільшення відношення O/C від 0,5 до 0,7 моль/моль витрати коксу збільшуються. Тому прагнення збільшити повноту газифікації вугілля шляхом збільшення надлишку окислювача слід обмежити значенням зазначеної величини  $\leq 0,5$ .

12. Виконаний комплекс розрахунково–аналітичних досліджень для аналізу впливу параметрів газифікації вугілля на формування складу й властивостей, що вдуваються в доменну піч через фурми продуктів газифікації вугілля, показав доцільність газифікації вугілля атмосферним дуттям з максимально–можливою температурою. У цьому варіанті досягаються мінімальні витрати коксу, однак, гірші показники продуктивності доменної плавки. Для збільшення продуктивності печі можлива заміна гарячого дуття киснем. У цьому випадку при збільшенні продуктивності дещо зростає витрата коксу.

13. На основі результатів виконаних аналітичних і експериментальних досліджень, а також узагальнення закономірностей протікання процесів доменної плавки й встановлених у роботі загальних принципів її функціонування в нових умовах, суттєво доповнено і уточнено керівний галузевий документ «Доменні печі. Нормативи витрат коксу». Зазначена нормативна оцінка є методичною основою для виконання оперативного аналізу технології й прийнята в якості нормативного документа на всіх металургійних підприємствах ТОВ «МЕТІНВЕСТ ХОЛДИНГ» (Україна).

14. Розроблені пристрій та спосіб подачі гарячих відновлювальних газів у фурмену зону доменної печі, отриманих у прифурменому реакторі газифікаторі з регульованим коефіцієнтом надлишку окислювача, який відрізняється тим, що

гаряче дуття, збагачене киснем, подають із кільцевого повітроводу до кожної фурми двома дуттьовими потоками, перший – на газифікацію вугілля, другий – на газифікацію коксу, при цьому витрати дуттьових потоків через реактор-газифікатор і фурму визначають за розробленими виразами.

## ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Монографії:

1. Товаровский И.Г., Большаков В. И., Меркулов А.Е., Аналитическое исследование процессов доменной плавки.–Днепропетровск: «Экономика», 2011.–206 с.
2. Товаровский И. Г., Меркулов А. Е. Доменная плавка с вдуванием продуктов газификации углей.–Киев: «Наукова думка», 2016.–223 с.

### Статті, проіндексовані в базі даних Scopus, WoS:

3. Tovarovskii I.G., Bol'shakov V.I., Lyalyuk V.P., Merkulov A.E., Pinchuk D.V. Existing and prospective blast-furnace conditions // Steel in Translation, 2009. – Volume 39, Issue 7, pp 559–564. DOI: 10.3103/S096709120907010.
4. Tovarovskii I.G., Bol'shakov V.I., Lyalyuk V.P., Merkulov A.E., Lebed' V.V., Pinchuk D.V. Selecting the economic conditions of blast-furnace smelting by means of an information and simulation system // Steel in Translation, 2009. Volume 39, Issue 11, pp 986–994. DOI: 10.3103/S0967091209110072.
5. Tovarovskii I.G., Merkulov A. E. Influence of preliminary batch reduction on blast-furnace smelting // Steel in Translation. Volume 40, Issue 11, February 2011, pp 966–973. DOI: 10.3103/S0967091210110070.
6. Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Blast-Furnace smelting with the injection of natural gas and coke-oven gas // Steel in Translation, Volume 41, Issue 6, June 2011, Pages 499–510. DOI: 10.3103/S0967091211060179.
7. Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Analytical study of blast-furnace smelting operations performed with different blast temperatures and oxygen contents // Metallurgist, 2011. Volume 55, Issue 5–6, pp 339–346. DOI: 10.1007/s11015–011–9433–3.
8. Tovarovskii I.G., Bolshakov V.I., Merkulov A.E. Analysis of processes and regimes for blast-furnace smelting with maximal replacement of coke // Metallurgist: Volume 55, Issue 9–10 (2012), pp. 702–709. DOI: 10.1007/s11015–012–9490–2.
9. Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Blast-furnace smelting with coal-dust injection // Steel in Translation, 2012. Volume 42, Issue 1, pp 28–40. DOI: 10.3103/S0967091212010202.
10. Tovarovskiy I.G., Merkulov A.E. Analytical study of blast-furnace smelting technologies that entail the injection of coal-gasification products // Metallurgist: Volume 56, Nos. 5–6, Sept., 2012, Pages 347–356. DOI: 10.1007/s11015–012–9582–z.
11. Tovarovskiy I.G., Gordon Y.M., Merkulov A.E. Influence of Preliminary Metallization of Metallic Burden on Blast Furnace Process and Performance

Parameters // AISTech 2012 Proceedings of the Iron&Steel technology conference, 7–10 may 2012, Atlanta, Georgia, USA. pp.449–456.

12. Tovarovskii I.G., Merkulov A.E. Choosing the Parameters of a Blast-Furnace Smelting Technology That Includes the Injection of Coal-Gasification Products // Metallurgist: Volume 57, Issue 1–2, 2013, pp 13–20. DOI: 10.1007/s11015–013–9685–1.

13. Tovarovskiy I.G., Merkulov A.Ye., Lyalyuk V.P. The Analysis of Coke-Saving Modes of Blast furnace Smelting on the Example of Blast Furnace No.9 // Metallurgical and Mining Industry, 2013, Vol. 5, No. 1, pp 1–7.

14. Tovarovsky I.G., Merkulov A.E. Selection of Coal Gasification Parameters for Injection of Gasification Products Into a Blast Furnace // Metallurgist: Volume 57, Issue 9 (2014), pp 883–890. DOI: 10.1007/s11015–014–9817–2.

15. Tovarovskii, I.G., Merkulov A.E. Problems of coal gasification and gasification products usage in blast furnaces // Metallurgical and Mining Industry. Volume 5, Issue 2, 2013, Pages 3–9.

16. Tovarovskiy I.G., Merkulov A.E. Features of Temperature and Concentration Fields During Pig and Cast Iron Smelting in a Blast Furnace Workspace // Metallurgist. – September, 2016.– Volume 60.– Issue 5.– pp. 589–593. DOI: 10.1007/s11015–016–0336–1.

#### **Статті в наукових фахових виданнях України:**

17. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Оценка хода процессов и показателей перспективных режимов доменной плавки // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб.тр. Вып.17, ИЧМ.– С.58–67.

18. Товаровский И.Г., Большаков В.И., Муравьева И.Г., Шутылев Ф.М., Лебедь В.В., Меркулов А.Е. Аналитическое исследование доменной плавки с различными параметрами отдушин и промежуточной зоны // Металлургическая и горнорудная промышленность.– № 1.–2009.– С.45–48.

19. Меркулов А.Е. Расчетная оценка процессов и режимов доменной плавки при различном содержании в шихте известняка // Металл и литье Украины.–№12.–2010.–С. 38–44.

20. Меркулов А.Е. Доменная печь как газогенератор // Теория и практика металлургии.– №3–4.–2010.– С.8–12.

21. Товаровский И.Г., Большаков В. И., Меркулов А.Е. Аналитическое исследование процессов и режимов доменной плавки при различных параметрах железорудной шихты // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб.трудов ИЧМ. Вып.21.–2010. С. 21–45.

22. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Проблемы газификации угля и использования продуктов газификации в доменных печах // Металлургическая и горнорудная промышленность.–№ 2.–2013.–С.10–14.

23. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Энерготехнология резервных доменных печей // Металл и литье Украины.–№12.–2013.–С. 28–31.

**Матеріали наукових конференцій:**

24. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Аналитическое исследование процессов и режимов доменной плавки при различных содержаниях железа в шихте // Новини науки Придніпров'я (збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції присвяченої 100-річчю відомого вченого Г.А.Воловика). – Днепропетровск. – 2010. – С. 65–74.

25. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Анализ процессов доменной плавки и перспектив коксосбережения // Труды XVI Международной конференции "Теплотехника и энергетика в металлургии", НМетАУ, г. Днепропетровск, Украина, 4–6 октября 2011 г. – Днепропетровск: «Новая идеология», 2011. – С. 200–202.

26. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Познание процессов доменной плавки на основе их математического моделирования / Сб. трудов Международной научно-практической конференции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии», 19–21 сентября 2012, г. Екатеринбург. С. 143 – 150.

27. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Влияние скоростей теплопередачи, восстановления и теплосъема со стен на процессы доменной плавки // Сборник докладов международной научно-практической конференции «Творческое наследие В.Е. Грум-Гржимайло» (27–29 марта 2014 г.).– Екатеринбург: УрФУ, 2014. – С. 440–447.

28. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Анализ процессов и параметров технологии доменной плавки с вдуванием продуктов газификации углей / Труды XVII международной конференции «Теплотехника и энергетика в металлургии», НМетАУ, г. Днепропетровск, Украина, 7–9 октября 2014 г. – Днепропетровск: НМетАУ. –С. 173–175.

29. Tovarovsky I. G., Merkulov A. E. Improvement of blast furnace operation based on understanding of ironmaking processes. 2nd International Conference „Advances in Metallurgical Processes & Materials“ AdMet 2015. Kiev, 2015, 4–5 June.

30. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Проблемы технологии доменной плавки с вдуванием продуктов газификации углей // Научно-практическая конференция с международным участием и элементами школы молодых ученых «Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР». 3–5 июня 2015 г.– г.Екатеринбург: Уральский рабочий. – С. 165–171.

31. Меркулов А.Е. Многофункциональная технология доменной плавки // Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: Коллективный труд / Под редакцией докт.техн.наук, профессора Товаровского И.Г.– Дніпро: Журфонд. 2016. –С. 25–41.

32. Товаровский И.Г., Меркулов А.Е. Нормативная оценка влияния параметров доменной плавки на расход кокса и производительность // Металлургия чугуна – вызовы XXI века. Труды VIII Международного конгресса доменщиков.–М.: Издательский дом «Кодекс», 2017.–С. 111–123.

**Патенти:**

33. Патент України №87917. Спосіб роботи доменної печі в режимі газогенератора. Бюл. №16 от 25.08.2009 г.

34. Патент на корисну модель №117035 Спосіб подачі гарячих відновлювальних газів в фурмені вогнище доменної печі. Бюл. № 11 от 12.06.2017.

35. Патент на корисну модель №117584 Пристрій подачі дуття і відновлювальних газів в доменну піч. Бюл. №12 от 26.06.2017.

**АННОТАЦІЇ**

Меркулов О. Є. Розвиток теоретичних основ удосконалення доменної плавки при використанні системного аналізу взаємозв'язку параметрів з показниками ефективності реального процесу. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів» – Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, Національна металургійна академія України, м. Дніпро, 2020.

Дисертаційна робота присвячена створенню методу комплексного розрахунку зональних і інтегральних характеристик доменної плавки і проведення на його основі узагальненого параметричного аналізу режимів функціонування технології при різних газо–дуттьових параметрах, складах шихт, нерівномірності розподілу матеріалів і використанні альтернативних коксозберігаючих технологій.

Виконано аналітичне дослідження процесів доменної плавки на основі розробленої багатозонної математичної моделі, що представляє процеси доменної плавки у вигляді комплексу поліморфних температурно–концентраційних, фазових і газодинамічних полів в об'ємі доменної печі, дискретизованих на 120 локальних об'ємів, які пов'язані між собою єдиною системою матеріально–теплого балансу з виявленням лімітуючого локального об'єму. Зазначений характер побудови моделі обумовлений необхідністю її відповідності вимогам системності параметричного аналізу показників і процесів, у тому числі адекватності одночасного відображення по можливості всіх процесів і показників по всіх параметрах.

Результати дослідження дозволили кількісно уточнити вплив вихідних параметрів на кінцеві результати (витрата коксу, продуктивність), а також розкрити внутрішні зв'язки процесів в об'ємі печі (у тому числі деякі нові), що впливають на характер режимів і результати плавки. Поряд з уточненням впливу балансових факторів економії коксу, що визначають основну величину скорочення теплоспоживання, кількісно оцінений істотний вплив на витрату коксу характеру тепломасообміну, фазових перетворень, газомеханіки й розподілу матеріалів і газів у печі, зв'язаних прямими й зворотними зв'язками з витратою коксу.

У процесі досліджень виявлені й уточнені деякі закономірності ходу процесів, ряд яких якісно підтверджені раніше проведеними експериментальними дослідженнями. Виявлені закономірності трансформації температурно–концентраційних, фазових і газодинамічних полів в об’ємі доменної печі, а також поперечних перетікань газу по висоті стовпа шихти дозволяють пояснити ряд складних явищ. Установлена складна система прямих і зворотних зв’язків параметрів зони розм’якшення й плавлення, а також втрат теплоти через стіни з комплексом вхідних, проміжних і вихідних параметрів доменної плавки є важливим компонентом системного аналізу плавки.

Крім аналізу, багатозонна модель доменної плавки використовується як інструмент пізнання процесів: на моделі імітуються правдоподібні варіанти плавки, потім за допомогою реального об’єкта виконується ідентифікація моделей зі встановленням істинності очікуваних результатів.

Ключові слова: системний аналіз, доменна плавка, математична модель, розподіл шихти, зона розм’якшення, пиловугільне паливо, температура дуття, кисень, заміна коксу, газифікація, гарячий відновлювальний газ.

Merkulov O. The development of the theoretical foundations for improving blast furnace smelting using a system analysis of the relationship of parameters with the performance indicators of a real process – Manuscript of a qualification research.

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

The dissertation is devoted to the creation of a method for the complex calculation of the zonal and integral characteristics of blast furnace smelting and, based on it, a generalized parametric analysis of the modes of operation of the technology for various gas-blowing parameters, charge compositions, uneven distribution of materials and the use of alternative coke-saving technologies.

An analytical study of blast-furnace processes was carried out on the basis of the developed multi-zone mathematical model representing blast-furnace processes in the form of a complex of polymorphic temperature-concentration, phase and gas-dynamic fields in the blast furnace volume, discretized into 120 local volumes, which are interconnected by a single material-heat balance system with the identification of a limiting local volume. The indicated character of building the model is due to the need to comply with the requirements of a systematic parametric analysis of indicators and processes, including the adequacy of simultaneously reflecting, if possible, all processes and indicators in all respects.

The results of the study made it possible to quantitatively clarify the effect of the initial parameters on the final results (coke consumption, productivity), as well as to reveal the internal relationships of processes in the furnace volume (including some new ones) that affect the nature of the modes and the results of melting. Along with clarifying the effect of the balance factors of coke saving, which determine the main amount of reduction in heat consumption, a significant effect on the coke consumption was quantitatively assessed of the nature of heat and mass transfer,

phase transformations, gas mechanics, and the distribution of materials and gases in the furnace associated with direct and feedback connections with coke consumption.

In the course of the research, several regularities of the process flow were identified and clarified, a number of which were qualitatively confirmed by previous experimental studies. The revealed regularities of the transformation of temperature–concentration, phase and gas–dynamic fields in the volume of the blast furnace, as well as transverse gas flows along the height of the charge column allow us to explain a number of complex phenomena. The established complex system of direct and feedback relationships of the parameters of the softening and melting zone, as well as heat loss through the walls with a set of input, intermediate and output parameters of blast furnace smelting, is an important component of the system analysis of smelting. In addition to analysis, a multi–zone model of blast–furnace smelting is used as a tool for cognizing processes: plausible melting options are simulated on the model, then, using a real object, models are identified with the truth of the expected results established.

**Keywords:** system analysis, blast furnace smelting, mathematical model, charge distribution, softening zone, pulverized coal fuel, blast temperature, oxygen, coke replacement, gasification, hot reducing gas.

Підписано до друку 04.09.2020. Формат 60x90/16. Папір офсетний.

Друк плоский. Гарнітура Times New Roman.

Ум. друк. арк. 2,5. Наклад 100 прим. Зам. № \_\_\_\_.

Віддруковано з оригінал–макета ТОВ ВКФ «Візіон»

49107, м. Дніпро, площа Академіка Стародубова, 1, тел.: (0562) 36–27–68.

Свідоцтво про державну реєстрацію № 04052442 Ю 0021076

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

Серія ДП №60–р від 20.03.2001.