

УДК 669.162.261.3:669.162.262:51.001.57.001.5

**О. А. Сохацький**, кандидат технічних наук,  
науковий співробітник Інституту чорної металургії  
ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України  
**О. Л. Чайка**, кандидат технічних наук, старший  
науковий співробітник Інституту чорної металургії  
ім. З. І. Некрасова Національної академії наук України

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ДОМЕННІЙ ПЕЧІ В ПЕРІОД ЇЇ ЗАДУВКИ

*Показано і підтверджено на практиці можливість використання методів математичного моделювання для дослідження теплогазодинамічних процесів у період задувки доменної печі. На підставі комплексу теплогазодинамічної й теплоенергетичної моделей з урахуванням інформації про розподіл шихтових матеріалів, теплофізичні та геометричні властивості системи огороження та охолодження печі обґрунтовано й реалізовано теплогазодинамічний режим задувки доменної печі № 9 ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” із застосуванням дуття, збагаченого нагрітим азотом. Виконано тестування програми шляхом порівняння числових результатів розрахунків з відомими теоретичними та експериментальними дослідженнями. Наведено результати обчислювального експерименту.*

*Показана и подтверждена на практике возможность использования методов математического моделирования для исследования теплогазодинамических процессов в период задувки доменной печи. На основании комплекса теплогазодинамической и теплоэнергетической моделей с учетом информации о распределении шихтовых материалов, теплофизических и геометрических свойств системы ограждения и охлаждения печи обоснован и реализован теплогазодинамический режим задувки доменной печи № 9 ПАО “АрселорМиттал Кривой Рог” с применением дутья, обогащенного нагретым азотом. Выполнено тестирование программы путем сравнения численных результатов расчетов с известными теоретическими и экспериментальными исследованиями. Приведены результаты вычислительного эксперимента.*

*Shown and confirmed in practice the use of mathematical modeling to study the thermal gas-dynamic processes during blown blast furnace. Based on the complex thermal and heat energy gas dynamic model taking into account information about the distribution of charge material, thermal and geometrical properties of the system enclosures and cooling furnace justified and implemented thermal gas-dynamic regime blown blast furnace № 9 PJSC “ArcelorMittal Kriviy Rig” with the use of blast enriched hot nitrogen. Done testing program by comparing the numerical results with known theoretical calculations and experimental studies. The results of computational experiments.*

**Ключові слова.** Математичне моделювання, числові методи, доменна піч, теплообмін, газодинаміка, задувка, нагрітий азот, температура, тиск.

**Вступ.** Задувка – важливий етап початку роботи доменної печі (ДП). У цей період відбувається формування теплових і газодинамічних умов у її робочому просторі, які визначають рівність ходу, витрати сировини й палива, технічний стан і тривалість кампанії доменної печі.

© О. А. Сохацький, О. Л. Чайка, 2012

---

Складність процесу задувки доменної печі та виходу на робочий режим визначається тим, що в робочому просторі печі міститься холодний матеріал. Для прогріву цього матеріалу потрібно вносити теплоту з дуттям. Природа цієї теплоти різна. Піч може отримати ту саму кількість теплоти за різний інтервал часу з різним ступенем використання окисного потенціалу дуття й енергетичних добавок [1–7]. Залежно від параметрів і складу дуття динаміка перебігу теплообмінних процесів і техніко-економічні показники задувального й роздувального періоду роботи печі будуть також різні.

Процеси прогріву стовпа шихти і формування в ньому газового потоку в період задувки вивчено мало. Неоднозначність розуміння цих явищ – привід для численних дискусій про раціональні прийоми задувки доменної печі: застосування енергетичних добавок до дуття різної природи (кисень, азот, природний, доменний газ та ін.), темпи нарощування тиску, кількості дуття й управління його температурним потенціалом [1–3, 7, 8].

**Постановка завдання.** Практичний інтерес становить розробка методів прогнозу й вибору раціональних умов теплової роботи доменної печі з урахуванням розподілу матеріалів, параметрів газового потоку та її охолодження. Для дослідження динаміки перебігу процесів тепломасообміну в період задувки використано системний підхід, що ґрунтується на спільному застосуванні теплогазодинамічної і теплоенергетичної моделей, реалізованих у середовищі Compaq Visual Fortran 6.6 та Excel [1, 9–11].

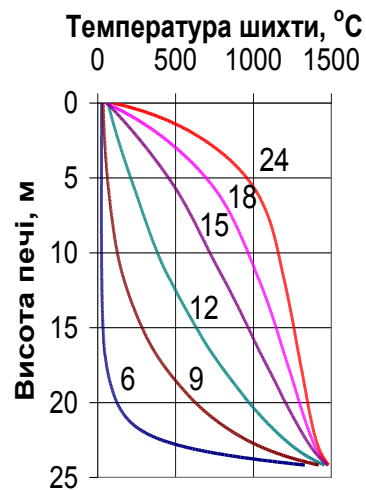
#### **Результати досліджень**

**Порівняльний аналіз задувок.** Дослідження проводилися за даними задувки ДП № 9 ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” об’ємом  $5000 \text{ м}^3$  у 2003 і 2009 рр. [7, 10, 11]. Порівняння з теоретичними та експериментальними даними вітчизняних і японських дослідників розподілу температур по висоті печі в період її задувки показано на рис. 1 [2, 3]. На рис. 1 б наведено експериментальні дані японських дослідників для ДП № 2 в Огісімі об’ємом  $4052 \text{ м}^3$  [3], а на рис. 1 в – дані, які отримали Б. І. Китаєв і Ю. Г. Ярошенко з використанням закладних термодатчиків, уведених на відстань 80 мм від кладки [2]. Ми отримали динаміку прогріву шихтових матеріалів по висоті шахти печі (рис. 1а), що якісно повторює дані, японських та вітчизняних дослідників рис. 1 б, в.

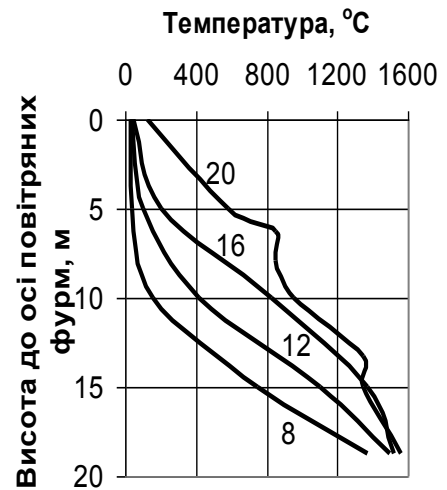
Порівняльний аналіз розподілу теплоти на розвиток теплообмінних і відновлювальних процесів під час задувки печі та її нормальної роботи на передільний чавун показав, що головна відмінна особливість задувального періоду – висока потреба в теплоті для формування теплогазодинамічних умов по висоті печі, що забезпечують стійкий перебіг процесів виплавки чавуну.

З використанням методів моніторингу теплового стану печі, аналітичних і числових методів розрахунку встановлено, що для задувки потрібно понад 15 год для прогріву оголодження печі (рис. 2а) [11]. Потужність холостого ходу під час задувки печі до випуску першого чавуну більша в 9 раз у відсотковому співвідношенні і в 3–4 рази в абсолютних значеннях (МВт), ніж за стабільної роботи печі на передільний чавун (рис. 2). Кількість теплоти, що витрачається на прогрів шихтових матеріалів, вища більш ніж у 2 рази.

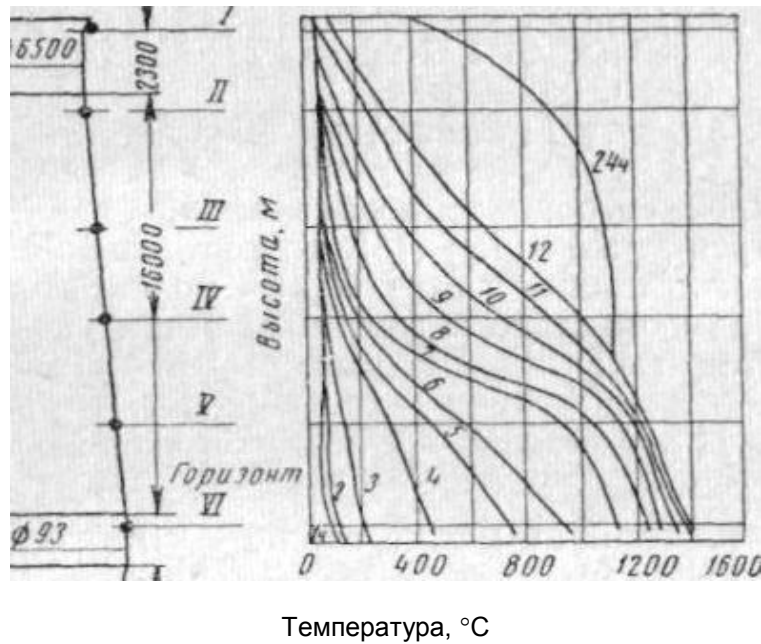
Визначальний вплив на прогрів шихтових матеріалів і формування сприятливих теплогазодинамічних умов у задувальному періоді роботи печі після її завантаження здійснили кількість і склад дуття – теплова потужність печі [11]. Кількість газу, поданого в піч (дуття), у порівнянні з його температурою, – домінуючий фактор, що дозволяє забезпечити прогрів шихтових матеріалів по всій висоті доменної печі (рис. 3).



*a*

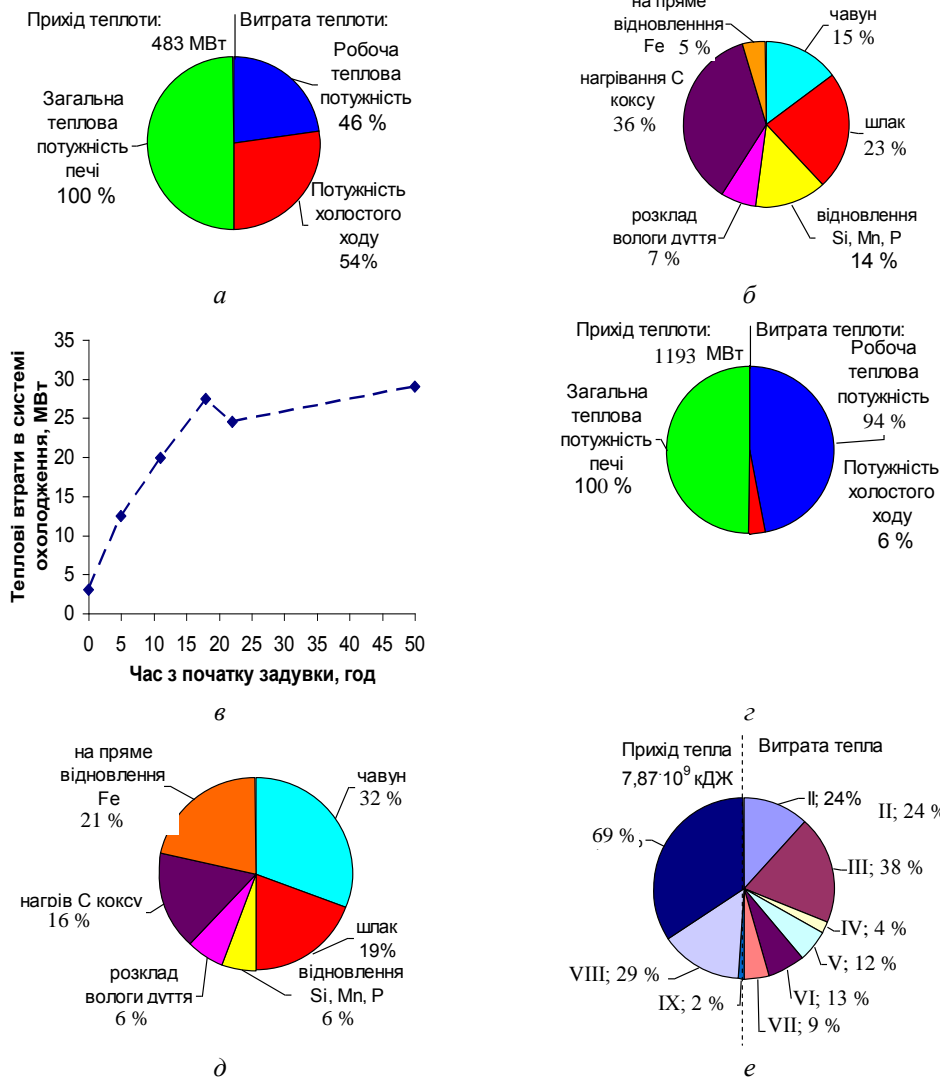


*б*



*в*

Рис. 1. Порівняння результатів розрахунку задувки ДП № 9 ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” у 2003 р. (а) з експериментальними й теоретичними даними японських дослідників (б) [3] та експериментальними даними Б. І. Китаєва та Ю. Г. Ярошенка [2]. Цифри у кривих відповідають часові в годинах після початку задувки печі



*а, б, в* – задувка ДП № 9 ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг”

*г, д* – робота на передільному чавуні ДП № 9

*е* – задувка ДП № 4 в Тобаті [3]

Рис. 2. Загальна діаграма розподілу теплоти в печі (*а, г*), діаграма теплового дефіциту (*б, д*), розподіл зовнішніх теплових втрат у часі за даними ручних замірів (*в*) і тепловий баланс під час задувки ДП № 4 в Тобаті (*е*). (I – тепло від згоряння коксу, II – фізичний нагрів кускової шихти; III – тепло в нижній частині шихти, IV – тепломісткість футерівки; V – тепло на пряме відновлення, VI – втрати з охолодженням; VII – зовнішні втрати, VIII – тепло дуття, IX – тепловий ефект непрямого відновлення)

Фактором, що сприяє поліпшенню прогріву шихтових матеріалів по висоті ДП без порушення рівності “ходу”, є збагачення дуття нагрітим азотом, що дозволяє підняти температуру дуття при задувці з 500–700 до 1000°C і вище, знизити коефіцієнт використання теплоти палива (КВП) в горні і збільшити його по печі в цілому на ~0,1 і за рахунок цього працювати з теоретичною температурою на 200–400°C вищею в порівнянні з іншими технологіями задувки печі.

Застосування температури дуття порядку 1000°C збільшує середню температуру шихти по висоті печі на 15–20 % у порівнянні з температурою дуття при 500°C, яка практикується під час задувки печі без застосування нагрітого азоту (рис. 3).

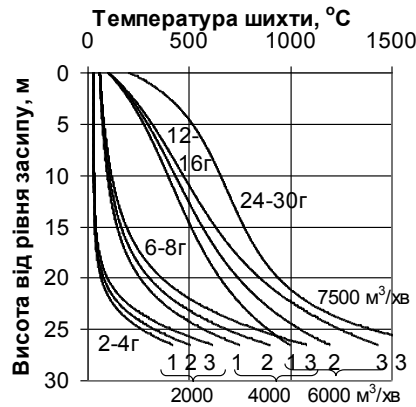


Рис. 3. Залежність температури шихтових матеріалів у період задувки від витрат і температури дуття (1–100; 2–500; 3–1000°C)

Труднощі в забезпеченні теплогазодинамічного режиму роботи печі за наявних технологій задувки із застосуванням атмосферного дуття, природного газу й технологічного кисню полягають, перш за все, в тому, що для прогріву стовпа шихти до колошника за різними даними потрібно близько 15–30 год, а за цей час у процесі спалювання коксу шихта опускається до фурменної зони і починає плавитися, не прогрівшись по всій висоті печі [2, 3, 7, 12]. При цьому спостерігається збільшення газодинамічного опору висхідному потокові горнових газів і зниження витрати дуття. Таким чином, не забезпечуються типові умови для стійкого теплообміну між газовим потоком і матеріалами, завантаженими в піч: теплообмін між газовим потоком і шихтою не закінчено, а процес плавлення активізовано.

Найсприятливіший варіант для формування зони розм'якшення і плавлення – це умови, коли до

початку плавлення залізородних матеріалів, що містяться над холостими подачами коксу, в робочому просторі печі під час задувки буде сформовано температурне поле шихти і газового потоку, що забезпечує стійкий перебіг теплообмінних процесів. Виконані розрахунки для печі об'ємом 5000 м<sup>3</sup> показали, що для цього необхідна подача в піч теплоносія, який не спалював би кокс, – нагрітого азоту з витратою дуття близько 5000–6000 м<sup>3</sup>/хв і температурою дуття близько 1000 °C і вищею.

Застосування нагрітого азоту, в порівнянні з іншими енергетичними добавками, дозволяє в ширших діапазонах і ефективніше для прогріву шихти по всій висоті доменної печі при забезпеченні рівності її “ходу” регулювати розвиток теплообмінних та газодинамічних процесів. Ефект від застосування нагрітого азоту зростає в міру зниження концентрації кисню в дутті і збільшення його температури. Підвищення температури дуття на 100°C збільшує КВП вуглецю коксу в печі на 5–10 % при вмісті кисню в дутті 21–14 %. КВП палива в разі збагачення дуття азотом зменшується в горні, а в зоні помірних температур і в печі в цілому зростає. Це сприятливо впливає на газодинаміку і розвиток фізико-хімічних процесів, що відбуваються в печі. З наявних енергетичних добавок нагрітий азот – найкращий у період роздувки ДП, він забезпечує формування центрального газорозподілу, зниження теплових навантажень на футерівку і кожух печі, інтенсивне підвищення основних технологічних параметрів процесу, зниження витрат коксу в середньому на 15 %, закладає базис для надійної, тривалої та ефективної роботи печі й агрегатів, які її обслуговують.

У 2009 р. для ДП № 9 з використанням теплогазодинамічної й теплоенергетичної моделі розроблено рекомендації (технологічна програма задувки) застосування дуття, збагаченого нагрітим азотом, які при задувці з технічних причин випробувано частково. Від проектних відрізнялися параметри і склад дуття.

**Результати дослідження задувки ДП № 9 у 2009 р.** Аналіз зміни параметрів і складу газового потоку, сходу шихтових матеріалів при задувці ДП № 9 підтвердив, що період задувки печі умовно можна розбити на чотири стадії [3]: I – прогрів шихти; II – початок формування зони розм'якшення і плавлення; III – завершення формування зони розм'якшення і плавлення; IV – стабілізація зони розм'якшення і плавлення, випуск продуктів плавки.

Час перебігу кожної зі стадій оцінювався на підставі порівняння даних про витрату, склад і температуру колошникового газу, витрату дуття, перепад тиску по висоті печі, показань стаціонарних термопар, установлених у кладці печі, і на підставі моделювання теплообмінних процесів, що відбуваються в печі. Для умов задувки в 2009 р. час першої стадії становив 0–11 год, другої – 11–17 год, третьої – 17–28 год, четвертої – більше 28 год.

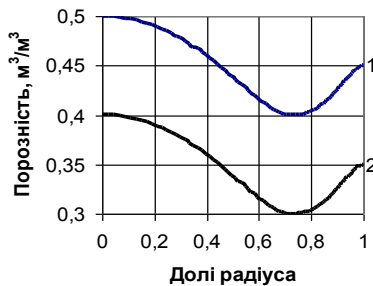


Рис. 4. Розподіл порозності шихти по радіусу печі: 1 – колошник; 2 – запличики

Параметри газового потоку розраховувалися за фактичними даними дуттьового режиму і параметрів газового потоку на колошнику при задувці печі в 2009 р. Дані про розподіл шихтових матеріалів взяті близькими до зафіксованих у практиці роботи і задувки печі, а також інших печей з центральним газорозподілом. Порозність шихтових матеріалів задавалася, виходячи з літературних даних [13–15], з урахуванням розподілу матеріалів у задувальній шихті ДП № 9 (рис. 4).

На першій стадії прогріву шихти для забезпечення стійкого протікання й теплообміну між газом і шихтою, і на наступних стадіях задувки важливо забезпечити прогрів шихтових матеріалів на верхніх горизонтах печі на максимально можливу величину до початку формування зони плавлення матеріалів. Більш рівномірному прогріванню й сушінню шихти по висоті печі сприяє використання атмосферного дуття, збагаченого нагрітим азотом (рис. 5, 6).

Це досягається за рахунок збільшення виходу горнового газу на 1 кг вуглецю, що згорає (потрібна більша кількість дуття в порівнянні з атмосферним дуттям), можливості підвищення температури дуття при забезпеченні тієї ж температури в осередках горіння, що й за атмосферного дуття (рис. 5, 6).

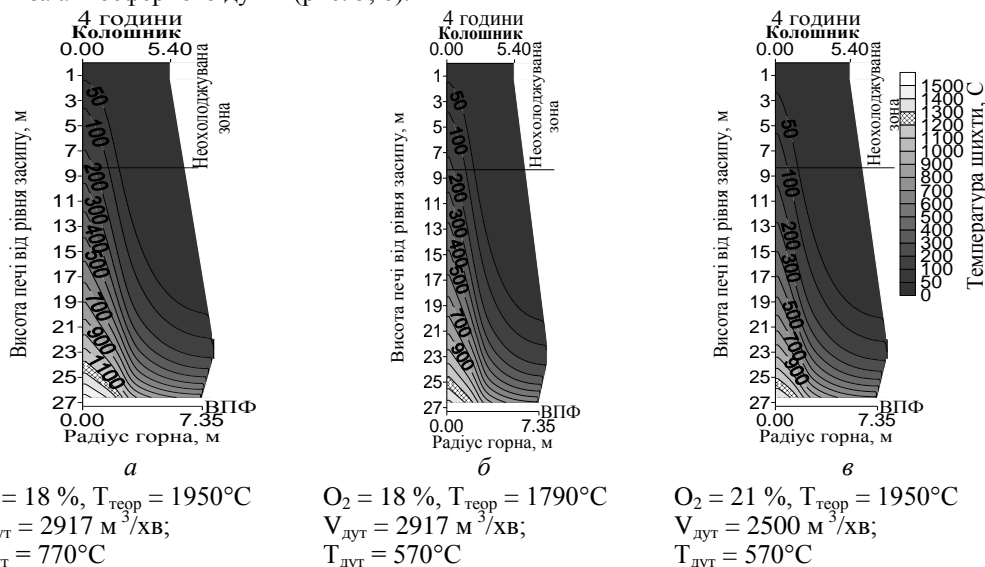


Рис. 5. Розподіл температури шихти в об'ємі ДП за різних параметрів дуття

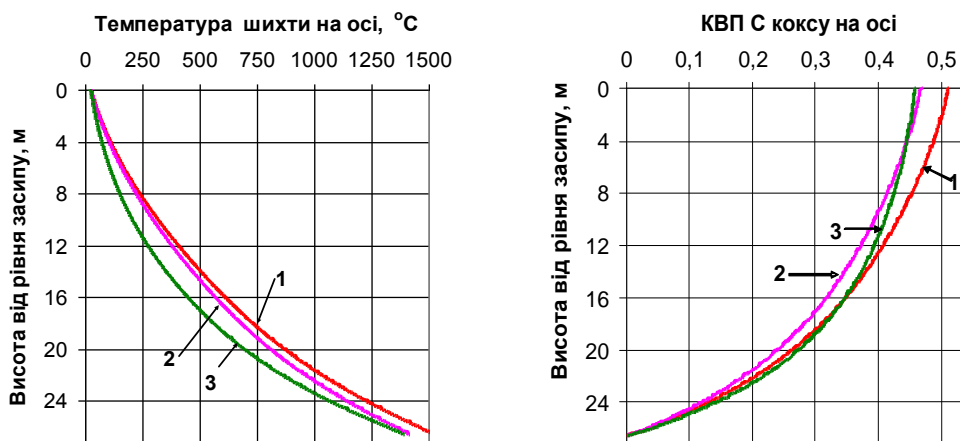


Рис. 6. Зміна температури шихти і КВП вуглецю коксу в осьовій області ДП:

- 1 –  $O_2 = 18\%$ ,  $T_{\text{теор}} = 1950^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{дут}} = 2917 \text{ м}^3/\text{хв}$ ,  $T_{\text{дут}} = 770^\circ\text{C}$ ;  
 2 –  $O_2 = 18\%$ ,  $T_{\text{теор}} = 1790^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{дут}} = 2917 \text{ м}^3/\text{хв}$ ,  $T_{\text{дут}} = 570^\circ\text{C}$ ;  
 3 –  $O_2 = 21\%$ ,  $T_{\text{теор}} = 1950^\circ\text{C}$ ,  $V_{\text{дут}} = 2500 \text{ м}^3/\text{хв}$ ,  $T_{\text{дут}} = 570^\circ\text{C}$

Ефект від збагачення дуття нагрітим азотом посилюється в міру збільшення температури дуття (рис. 5а, б; рис. 6). З рис. 5, 6 випливає, що при спалюванні тієї самої ж кількості вуглецю коксу з однаковою температурою дуття використання нагрітого азоту забезпечує вищий КВП у печі й кращий прогрів шихти по висоті та в радіальному напрямку в порівнянні з атмосферним дуттям. При цьому теоретична температура за використання атмосферного дуття буде на  $160^\circ\text{C}$  вища, ніж при дутті, збагаченому азотом (рис. 5б, в).

Рівномірніший прогрів шихти по висоті дозволяє зменшити ймовірність локального перегріву шихти на окремих горизонтах і знизити втрати тиску газового потоку під час переходу від прогрітих шарів шихти до непрогрітих. У зону високих температур приходять більш прогріті матеріали, зона помірних температур розтягнеться по висоті, покращиться дренажна здатність шихти, знизиться ймовірність порушення рівності "ходу" печі, підвищиться стійкість газодинамічного режиму роботи й рівність сходу шихти.

У разі однакової теоретичної температури або однакової витрати дуття з температурою дуття більшою на  $200^\circ\text{C}$ , збагаченого нагрітим азотом, у порівнянні з атмосферним дуттям, прогрів шихти посилиться: ізотерми розтягнуться в радіальному напрямку й піднімуться в середньому на один метр угору в нижньому ступені теплообміну (рис. 5а, в).

З технічних причин рекомендацію, пов'язану з підтриманням температури дуття  $800\text{--}700^\circ\text{C}$  в перші 6–10 год від початку задувки печі (стадія прогріву шихти і формування основи зон розм'якшення), виконано не було, азоту в піч подавалося в 1,5–2 рази менше запланованого. Перераховані вище причини не дали повною мірою використовувати потенціал дуття, збагаченого азотом, під час задувки печі. Ізотерми шихти, зображені на рис. 5б і 6 (крива 2), близькі до умов, що склалися в робочому просторі печі через 2–7 год після її задувки.

Моделювання процесу прогріву шихти з урахуванням її опускання показує, що ізотерми  $1300\text{--}1600^\circ\text{C}$  поблизу осі печі наклалися на другу шихту, що містить конвертерний шлак, а ізотерми  $1000\text{--}1300^\circ\text{C}$  досягнуть третьої задувальної шихти, де містилися агломерат і руда (рис. 7).

У перші 11 год від початку задувки спостерігався центральний розподіл газового потоку. На це вказувало незначне підвищення температури в газовідводі й падіння температури на периферії та кладки шахти, в порівнянні з показаннями термопар до початку задувки.

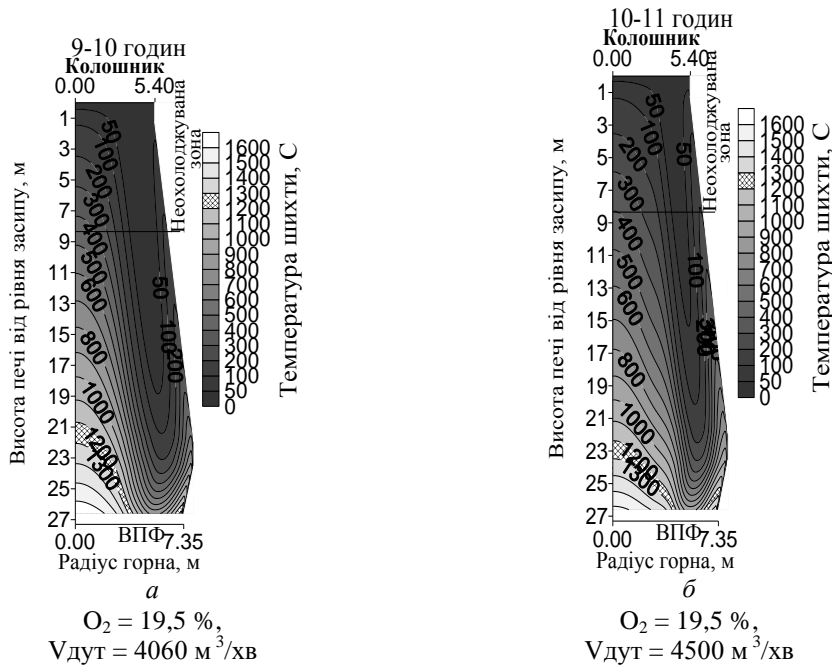


Рис. 7. Зміна температури шихти в об'ємі ДП під час задувки: а – через 9–10 год від початку задувки, б – через 10–11 год

Перша стадія прогріву шихтових матеріалів у 2003 р. відбувалася за нижчою (на 1 %) концентрації кисню в дутті, вищих температурах дуття, в середньому на 150°C, що дозволило краще прогріти шихтові матеріали по висоті і зменшити витрату коксу в першій шихті, створюючи резерв для кращого прогріву, плавлення й фільтрації продуктів плавки [7]. Так, з рис. 8 видно, що КВП у печі в цілому був значно вищий у 2003 р., порівняно із задувкою в 2009 р., це й зумовило отримання добре прогрітого чавуну вже на першому випуску.

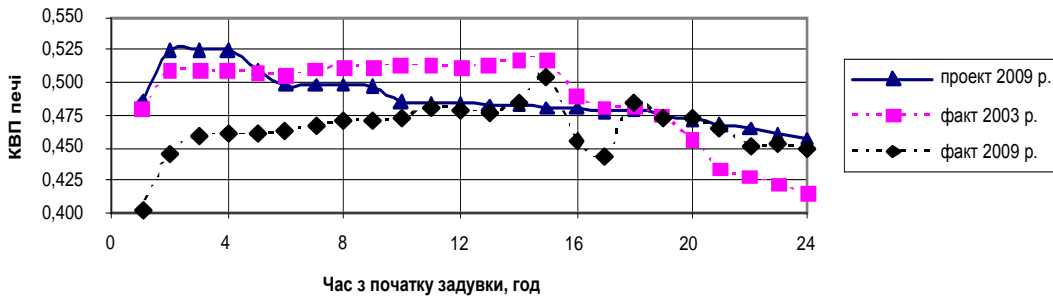


Рис. 8. Коефіцієнт використання теплоти палива в печі



Друга стадія початку формування зон розм'якшення і плавлення відбувалася приблизно протягом 11 до 17 год від початку задувки. У цей період рівень використання CO в колошниковому газі й нижній перепад тисків збільшилися в 2 і 3 рази відповідно, а витрата дуття знизилася в 3 рази. Температура периферійних газів знизилася на 10°C, кладки шахти зросла на 20°C, а в газовідводі залишилися практично без змін.

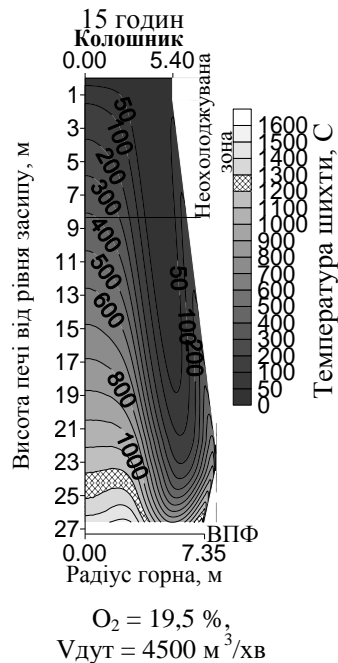


Рис. 9. Прогноз прогріву шихти з урахуванням зменшення її порозності до  $0,3 \text{ м}^3/\text{м}^3$  за рахунок розм'якшення шихти на ізотермі в  $1500^\circ\text{C}$

- Шари тугоплавких матеріалів 2 і 3 завантажувальних шихт (конвертерний шлак, агломерат з високою основністю) розривати коксовими кільцями не тільки в осьовій зоні, але й прилеглої до периферійної зони на відстані 1–3 м від рила повітряних фурм.

Досвід задувки у 2003 р. показав, що для нормального прогріву горна й отримання добре прогрітих продуктів плавки можна обійтися і без тугоплавкого конвертерного шлаку.

Третя стадія – завершення формування зони розм'якшення і плавлення – відбувалася в інтервалі часу приблизно від 17 до 28 год від початку задувки. На розвиток переважно осьового газового потоку в цей період часу вказують і ручні виміри теплових навантажень у системі охолодження доменної печі (рис. 10в). Теплові втрати в системі охолодження за 4 год впали на 3 МВт. З 22-ї год від моменту задувки починає інтенсивно зростати верхній перепад тиску і падати нижній, зростає температура в газовідводі і кладці шахти печі. Це дозволяє говорити про початок інтенсивного теплообміну між газом та шихтою по всій висоті доменної печі й про завершення формування зон розм'якшення і плавлення.

Ймовірною причиною затяжного порушення газодинамічного режиму роботи печі в аналізований період часу є ланцюг взаємозалежних подій: різке підвищення температури в ділянці, де перебував конвертерний шлак, його розм'якшення і плавлення, погіршення газопроникності шихти, зниження витрати дуття й перерозподіл газового потоку до периферії, недостатній прогрів та інтенсивність плавлення на цей момент часу верхніх шарів шихти, їх низька газопроникність у периферійній ділянці, що пов'язана з особливостями завантаження залізородних матеріалів і коксу (рис. 9, 10).

Теплотехнічний аналіз причин погіршення рівності ходу печі на стадії формування зон розм'якшення і плавлення шихти дозволяє дати певні рекомендації, спрямовані на покращання теплової та газодинамічної роботи печі в період задувки.

- Застосовувати дуття, збагачене нагрітим азотом, особливо корисно на стадіях прогріву і початку формування зон розм'якшення і плавлення. Ефективність зростає в міру зниження концентрації кисню в дутті і збільшення температури дуття. Це не допускає пікових температур у горні та сприяє кращому прогріванню матеріалів у шахті, впливає на розвиток центрального потоку газу, на фізико-хімічні процеси, що відбуваються в печі, знижує навантаження на футерівку й забезпечує економію коксу.

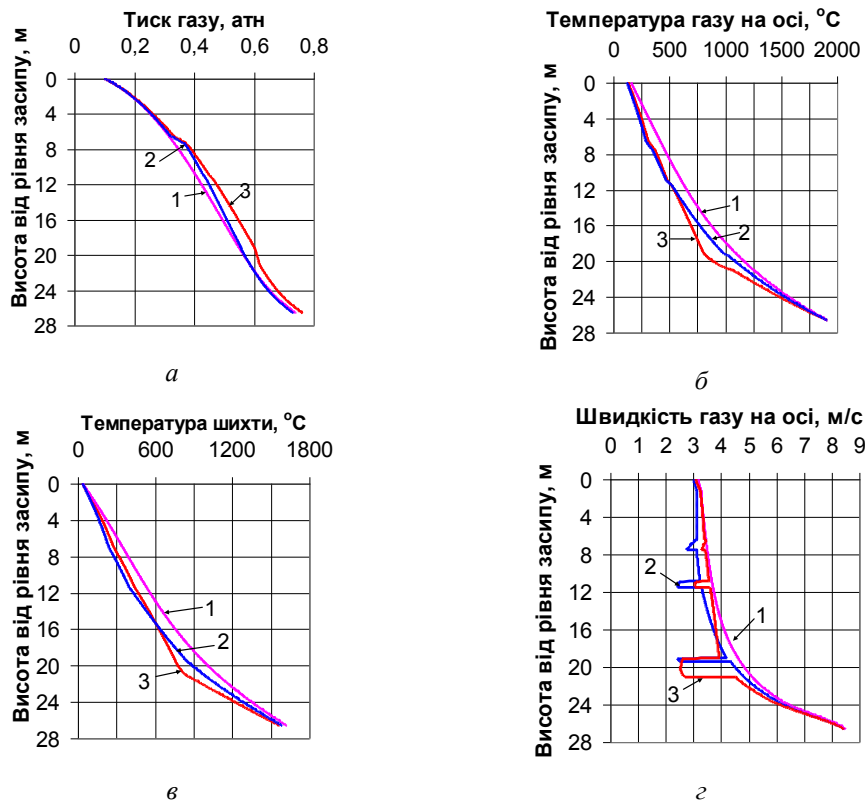


Рис. 10. Вплив зменшення газопроникності в шарах задувальної шихти на відмітках 6,5÷7,5; 10,9÷11,5 і 19,1÷19,4 м на її прогрів, тиск, температуру і швидкість газу: 1 – проект; 2 – факт при зниженні порозності з 0,48; 0,46 і 0,43 до 0,3 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> відповідно; 3 – прогноз при збільшенні висоти шару з 0,3 до 1 м на відмітці 19,1 м

Через 24 год від початку задувки печі організовано перший випуск продуктів плавки, які, виходячи з візуального спостереження, склалися в основному з нормально прогрітого шлаку. За даними заводського аналізу шлак містив S – 1,5; SiO<sub>2</sub> – 36,24; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 19,04; CaO – 34,64; MgO – 5,6; FeO – 0,91. Випуск продуктів плавки поліпшив дренажну здатність коксової насадки і газопроникність шихти.

Четверта стадія – стабілізація зон розм'якшення і плавлення – настала через 28 год від початку задувки. Через 28 год організовано другий випуск продуктів плавки – шлаку. За даними заводського аналізу, шлак містив: S – 1,74; SiO<sub>2</sub> – 35,03; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – 20,11; CaO – 38,07; MgO – 5,59; FeO – 0,23.

Розподіл температури шихти, газового потоку і тиску газу в печі через 33 год після задувки за результатами теплогазодинамічного розрахунку показано на рис. 11. Отримані результати розрахунку температури шихти, газового потоку і його тиску добре збігаються з показаннями: периферійних термопар і термопар, закладених у кладку шахти на позначці 26,6 м, термопар, розташованих у газовідводі, і показаннями датчиків тиску в печі.

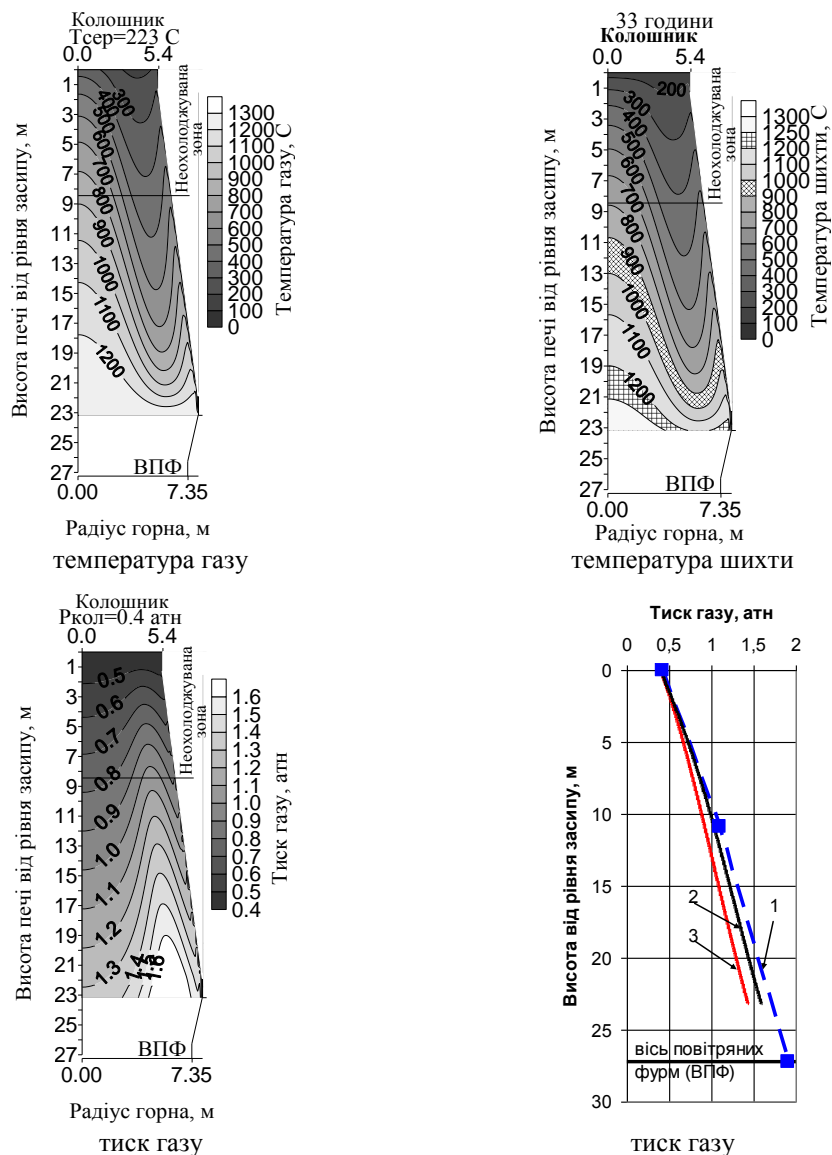


Рис. 11. Розподіл температур шихти, газового потоку і тиску в печі через 33 год після задувки при витраті дуття 6000 м<sup>3</sup>/хв.

Цифрами позначено: 1 – за лінійною апроксимацією фіксованого тиску; 2, 3 – за розрахунком на відстанях 100 і 1000 мм від стінки відповідно

**Висновки.** На основі математичного моделювання та узагальнення результатів розрахунків розроблено й реалізовано на ДП № 9 ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” теплогазодинамічний режим задувки, що дозволяє забезпечити сприятливі умови для прогріву шихтових матеріалів по висоті й радіусу печі. Нагрітий азот є найкращою з наявних енергетичних добавок у період задувки доменної печі. Дослідження показали, що його використання дозволяє:

---

підняти температуру дуття при задувці до 1000°C і вище; знизити КВП у горні й збільшити його по печі в цілому на ~0,1; формувати центральний газорозподіл; знизити теплові навантаження на систему огороження печі; підвищити стійкість теплогазодинамічного режиму роботи печі; зменшити витрати коксу в середньому на 15 %; закласти базис для надійної, тривалої та ефективної роботи печі й обслуговуючих її агрегатів.

#### Література

1. Домна в энергетическом измерении / [А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, Г. И. Орел]. – Кривой Рог : Мир, 2004. – 412 с.
2. Китаев Б. И. Теплообмен в доменной печи / Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. Л. – М. : Metallurgy, 1966. – 356 с.
3. Кутнер С. М. Технология задувки доменных печей за рубежом / Кутнер С. М. // Обзорная информация. Ин-т “Черметинформация”, сер. “Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна”. – М., 1984. – Вып. I. – 43 с.
4. Жембус М. Д. Тепловая работа доменной печи в период раздувки / М. Д. Жембус, А. П. Монаршук, А. В. Бородулин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 1987. – № 6. – С. 145–146.
5. Раздувка доменной печи с применением азота / А. С. Янковский, М. Ф. Марьясов, А. В. Бородулин [и др.] // Металлург. – 1988. – № 11. – С. 29.
6. Демидов В. А. Технология выдувки и задувки доменной печи с использованием азота / В. А. Демидов, А. И. Таранец, В. В. Котов // Металл и литье Украины. – 2005. – № 5. – С. 16–20.
7. Бородулин А. В. Задувка доменной печи объемом 5000 м<sup>3</sup> с применением нагретого азота / А. В. Бородулин, А. И. Васюченко, К. А. Дмитренко и др. // Сталь. – 2006. – № 9. – С. 6–9.
8. Гулыга В. И. Задувка доменной печи № 4 Новороссийского общества // В. И. Гулыга // ЖРМО. – 1912. – № 1. – С. 24–36.
9. Сохацкий О. А. Використання інформаційних технологій для моделювання теплогазодинамічних процесів / О. А. Сохацкий // Вісник Академії митної служби України. – 2011. – № 2 (46). – С. 143–153.
10. Сохацкий А. А. Исследование тепловой работы доменной печи в период ее задувки с применением нагретого азота / А. А. Сохацкий // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2008. – Вып. 18. – С. 21–31.
11. Чайка А. Л. Тепломассообмен в донах большого объема при задувке и использование нагретого азота / А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий, В. С. Листопадов и др. // Тепло- и массообменные процессы в металлургических системах : междунар. науч.-техн. конф., 7–9 сент. 2010 г. : сб. трудов. – Мариуполь, 2010. – С. 237–244.
12. Охлаждение и нагрев коксовых насадок при выдувках и задувках доменных печей / Н. С. Иноземцев, Г. В. Коршиков, В. В. Капорулин [и др.] // – Современная металлургия начала нового тысячелетия : сб. науч. трудов. – Липецк : ЛГТУ, 2005. – Часть 1. – С. 56–60.
13. Коршиков Г. В. Энциклопедический словарь-справочник по металлургии / Коршиков Г. В. – Липецк : Наука и технологии, 2000. – 781 с.
14. Логинов В. И. Газопроницаемость агломерата и окатышей / В. И. Логинов, С. М. Соломатин, А. Т. Корж // Металлургия и коксохимия. – 1970. – Вып. 19. – С. 46–51.
15. Yagi J. Two-dimensional simulation on the gas flow and heat transfer in the blast furnace / J. Yagi, K. Takeda, Y. Omori // Transactions ISIJ. – 1982. – Vol. 22. – № 11. – P. 884–892.