

МЕТАЛУРГІЯ

DOI: 10.31319/2519-2884.44.2024.1

УДК 669.162

Крячко Г.Ю., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-8773-508X, e-mail: nauka_m4m@ukr.net
Сігарьов Є.М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-8229-7877, e-mail: en_sigarev@ua.fm
Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Kryachko Gennadii, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy
Sigarev Yevhen, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Metallurgy
Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ДЕЯКІ УТОЧНЕННЯ ЩОДО ТЕМПЕРАТУР НА ГОРИЗОНТІ ПОВІТРЯНИХ ФУРМ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Метою роботи є уточнення даних про зміну температур на горизонті повітряних фурм доменних печей. Показано, що поширена уява про схожість змін температури і тиску газів потребує уточнення. Згідно з результатами розрахунку коефіцієнтів варіації температур газу, при периферійному ході печей зона перед фурмою є найбільш критичною в плані коливання температур. Показано, що умови доменної плавки визначають результативність та ефективність доменного процесу, а також можливий рівень досягнення теоретичної температури горіння.

Ключові слова: температура; тиск газів; горизонт повітряних фурм; доменна піч; умови плавки; теоретична температура горіння.

The purpose of the work is to clarify the data on temperature changes on the horizon of the air nozzles of blast furnaces. It is shown that the common idea about the similarity of changes in temperature and pressure of gases needs to be clarified. According to the results of the calculation of gas temperature variation coefficients, the zone in front of the nozzle is the most critical in terms of temperature fluctuations during the peripheral operation of the furnaces. It is shown that the blast furnace melting conditions determine the effectiveness and efficiency of the blast furnace process, as well as the possible level of reaching the theoretical combustion temperature.

Keywords: temperature; gas pressure; air nozzle horizon; blast furnace; melting conditions; theoretical combustion temperature.

Постановка проблеми

Відсутність безперервної достовірної інформації про процеси у фурменній зоні — джерела утворення гарячих відновлювальних газів — багато в чому визначає суперечності поглядів технологів і дослідників. Так, наприклад, вважали (А. Д. Готліб, 1966 р.), що зміни температури і тиску газів підпорядковуються загальній закономірності — обидва параметри зменшуються від периферії до центру горна. Вимагає також пояснень ряд факторів, що стосуються зміни рівня температур газу і коксу на рівні повітряних фурм в процесі удосконалення технології доменної плавки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дискусійним до сьогодні залишається питання про вибір робочого рівня теоретичної температури горіння (ТТГ) — важливого параметра комбінованого дуття, своєрідного замітника інформації про дійсний температурно-тепловий рівень доменного процесу. Якщо в 1975 році в ДонНДЧорметі вважали (В. В. Касьян) доцільним при виборі оптимальних витрат дуттьових добавок збереження рівня вихідної ТТГ, то у виданні, що вийшло на зламі століть [1], рекомендували підтримувати ТТГ на оптимальному для умов України рівні в межах 1900—2100 °С. Автори відносно недавньої роботи [2] пропонують удосконалювати дуттьовий режим доменної плавки орієнтуючись на максимально можливе збільшення ТТГ.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи, викладеної нижче, є вирішення наступних задач:

- проаналізувати, в якій мірі твердження про схожість характеру змін температури і тиску газів по радіусу горна доменної печі відповідає дійсності;
- з'ясувати, чим обумовлений відомий факт різкого в часі коливання температур у прифурменній порожнині — порушеннями ходу печі чи специфікою зон горіння, притаманною доменному процесу;
- з'ясувати коректність використання теоретичної температури горіння в якості незалежного фактора, що визначає головні показники доменного процесу.

Виклад основного матеріалу

Для перевірки коректності усталеного погляду на схожість змін тиску і температури газів в радіальному перетині горна співставили діаграми розподілу температур і тиску газів у прифурменних порожнинах в напрямі до центру печей (рис. 1). Не викликає заперечень факт падіння температури фурменного газу після досягнення максимальної температури в порожнині (рис. 1, а) або фокусу горіння. Зниження температури обумовлено перш за все розвитком ендотермічної реакції Будуара $\text{CO}_2 + \text{C}_k \rightarrow 2\text{CO}$ (А. Д. Готліб, 1966 р.). Тому локацію, від якої починається зниження температури газів у напрямі центру горна слід називати не розпливчастим терміном «периферія горна», а фокусом горіння.

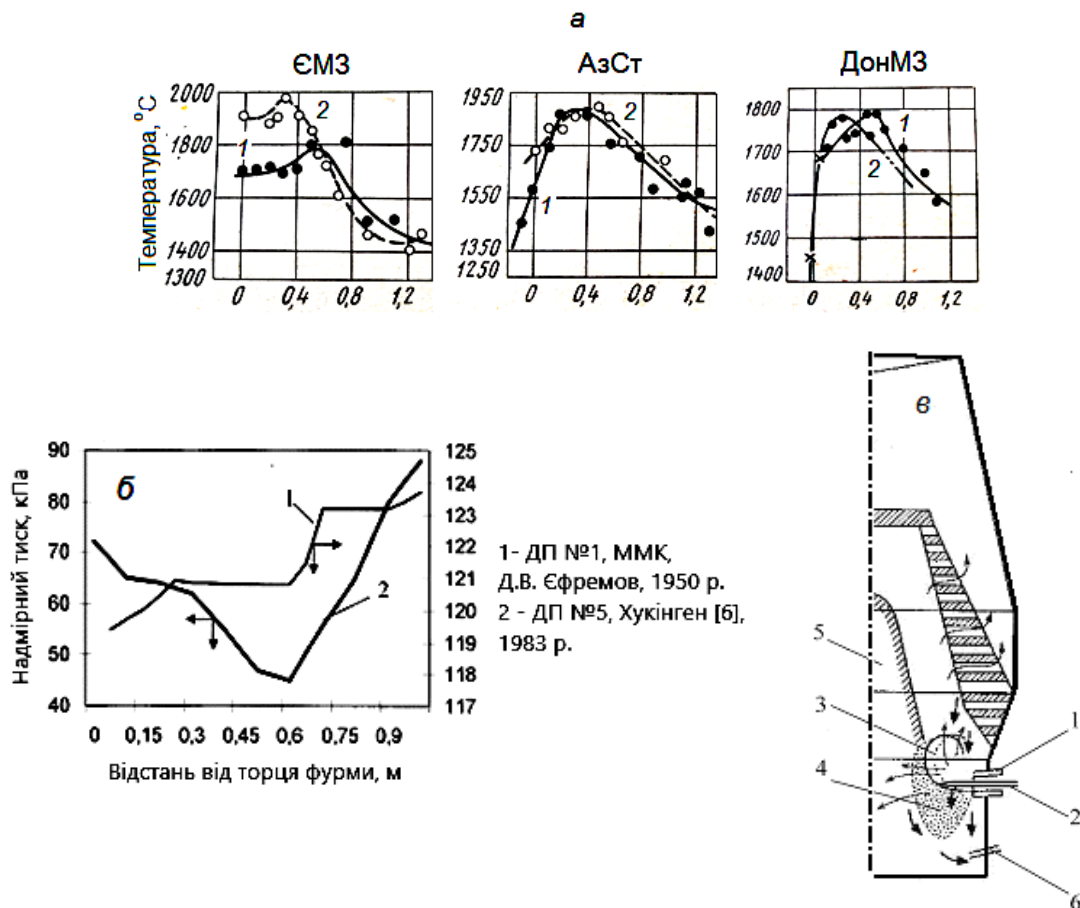


Рис. 1. Розподіл температур по довжині прифурменної порожнини трьох доменних печей України (а), зміна статичного тиску по осі повітряної фурми при зондуванні тільки порожнини (б) (М. І. Красавцев зі співавторами, 1966 р.) і схема зондування зони горіння без руйнування «пташиного гнізда» (в). а: 1, 2 періоди досліджень [3], в: 1 — повітряна фурма; 2 — зонд; 3 — прифурменна порожнина; 4 — «пташине гніздо»; 5 — вісьова зона малорухомого коксу; 6 — чавунна лютка (↓ рух розплавів; → рух газів)

Щодо характеру зміни тиску, то загальним для випадків зондування тільки прифурменної порожнини (рис. 1, б) без руйнування товщі «пташиного гнізда» (рис. 1, в) є зростання тиску в хвостовій частині порожнини в порівнянні з тиском газу на зрізі фурми. З однієї сторони це зростання обумовлено ефектом дифузора (розширенням газового середовища) і зростанням температури фурменного газу в результаті горіння палива [4].

З іншої сторони, в міру віддалення від фурми, витрата рухомого потоку підвищується за рахунок приєднання маси інжектваного горнового газу, ступінь стиснення і тиск зростають — система «сопло – фурма – прифурменна порожнина» працює в режимі струменевого інжектора [5].

Різницю в характері зміни статичного тиску на виході з повітряних фурм доменної печі № 1 ММК (рис. 1, б) і ДП № 5 заводу в Хукінгені (рис. 1, б, крива 2) можна пояснити відмінностями дугтвального режиму і формування прифурменних порожнин. Так, на ДП № 1 ММК, при утворенні фурменного вогнища периферійного типу, фокус горіння відстояв від зрізу фурми на 500—750 мм, тоді як на ДП № 5 Хукінгена — на 1000 мм [3]. Вірогідно, що на локалізацію мінімуму могла впливати геометрія прифурменних порожнин. Нерівномірність зміни тиску по довжині прифурменної порожнини можна пояснити утворенням випуклостей і западин на потоці струменя, появу яких ще в 1944 році теоретично показав Л. Д. Ландау.

Таким чином, уточнення щодо порівняння схожості характеру змін температури і тиску газів на рівні повітряних фурм, полягає в наступному. Температура газів в напрямі до центру горна зростає до фокусу горіння перед фурмою, а тиск — до кінця прифурменної порожнини. Відповідно температура знижується починаючи з фокусу горіння, а тиск — починаючи з коксової оболонки хвостової частини прифурменної порожнини.

Наступне питання, яке потребує додаткового розгляду, стосується коливання температур газу у фурменній зоні доменних печей. Вперше факт такого коливання в часі встановив в 1930 році Р. Рейнлендер (Німеччина), інформацію про який була наведена в монографії І.З. Козловича (1951 р.), хоча останній вважав виявлення різких коливань температури недовіком методики виміру за допомогою оптичного пірометра. Як встановив Р. Рейнлендер коливання температур в одній точці виміру протягом 5 хв були наступними:

Відстань від торця фурми, мм	0	250	500
Діапазон коливання температур, °С	1430–1790	1600–1820	1450–1760
Середня температура в локації, °С	1600	1710	1605
Розмах коливань температури			
$t_{\max} - t_{\min}$, °С	360	220	310

Як видно з наведених даних, результати вимірів мали більш різкий розкид температур в порівнянні з вимірами за допомогою вольфрам-ренієвих термопар (С.Л. Ярошевський зі співавторами, 1966 р.), де середньоквадратичне відхилення було в межах 82—123 °С. До речі виявлений Р. Рейлендером фокус горіння на локації 250 мм від торця фурми з середньою і максимальною температурою в 1710 і 1820 °С, був цілком реальним для доменної плавки на атмосферному дутті. Якщо взяти до уваги частоту обрушень коксу в прифурменні порожнини в межах 6—26 Гц (Є.Ф. Вегман зі співавторами, 2004 р.) інтервал між суміжними обрушеннями становитиме 6—26 с. Тоді за 5 хв в дослідженні Р. Рейнлендера в залежності від інтенсивності плавки могло відбутися від 10 до 50 обрушень коксу в прифурменну порожнину з відповідною зміною температури газу.

Для усунення фактору, пов'язаного з відомими недоліками виміру температур газу за допомогою пірометрів використали дані дослідження температур фурменної зони доменної печі Донецького металургійного заводу, проведеним ДонНДІчорметом (С.Л. Ярошевський зі співавторами, 1966 р.) за допомогою вольфрам-ренієвих термопар занурення в молібденових кінцівниках. На протязі 700 мм від торця фурми в 12 точках було проведено 303 виміри, в середньому по 25 вимірів в одній точці. За результатами цих вимірів нами розраховані коефіцієнти варіації температур і побудовані графіки, представлені на рис. 2. З порівняння графіків видно, що при знаходженні фокусу горіння на відстані від 100 до 150 мм від торця фурми (рис. 2, а) ділянка з максимальними значеннями коефіцієнта варіації температур розміщувалась в межах 0—200 мм від фурми (рис. 2, б).

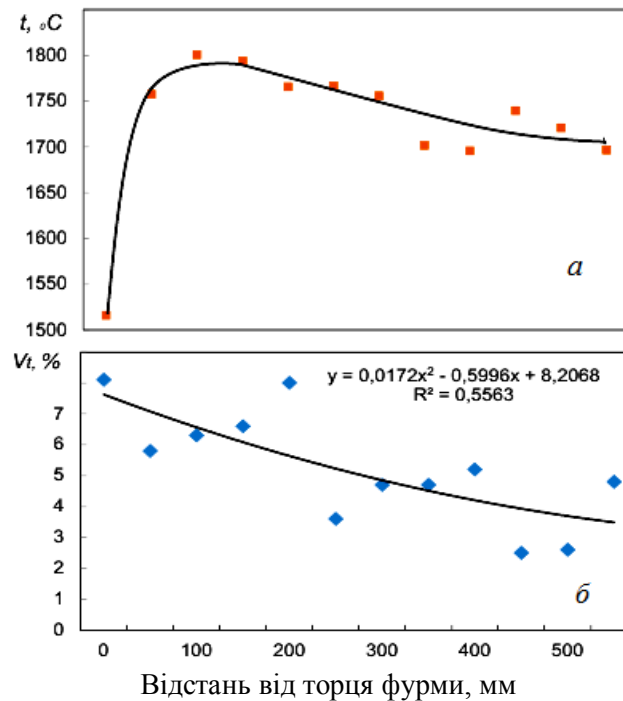


Рис. 2. Розподіл температур (а) і зміна коефіцієнту варіації температур газу (б) по довжині прифурменної порожнини за даними С.Л. Ярошевського зі співавторами (1966 р.)

Автори вважали, що нестійкість нагріву горна витікає із сутності процесів в окислювальній зоні доменної печі. Вочевидь, що періодичний схід шихти, пошарове укладання матеріалів і ряд інших обставин викликають коливання температури горна навіть при завантаженні усередненої шихти і постійності інших параметрів технологічного режиму.

В цілому слід погодитись з висловленими міркуваннями, однак виходячи з сучасного розуміння доменного процесу виникає необхідність уточнити вплив факторів, що визначають нестационарність нагріву фурменної зони. Під тлумаченням періодичний схід шихти слід розуміти дискретне обрушення коксу в порожнину з її нестійких склепінь [6].

Під поясненнями впливу пошарового укладання матеріалів слід розглядати можливість надходження на фурми коксу із зони когезії, де кокс має нижчу температуру, ніж прогрітий до 1600—1700 °С кокс над стійким склепінням прифурменної порожнини. Так, за даними С.Л. Ярошевського зі співавторами (1966 р.), 83 % температур укладалося в межі ± 150 °С, що цілком відповідає різниці температур коксу, який потрапляв у прифурменну порожнину.

Під іншими обставинами, що можуть впливати на коливання температур в зоні горіння, на наш погляд є інжекція горнових газів в прифурменну порожнину і нестационарність доменного процесу, викликана періодичним випуском продуктів плавки.

Таким чином, різке коливання температур газу в межах прифурменної порожнини не є недоліком в регулюванні доменного процесу, а проявою його нестационарності, обумовленою перш за все дискретними руйнуваннями оболонки прифурменної порожнини і надходженнями порцій коксу в її простір.

У зв'язку з відсутністю надійних засобів безперервного виміру температури горіння в доменній печі теоретична температура горіння залишається єдиним комплексним показником температурно-теплогового режиму фурменної зони. Тому виникає спокуса визначати бажаний рівень ТТГ, за якого досягаються найкращі показники плавки за продуктивністю і питомою витратою палива. В якості такого прикладу слід навести залежності (рис. 3), представлені в роботі [2], згідно з якими зростання ТТГ в межах 1980—2220 °С супроводжується підвищенням продуктивності печі (рис. 3, а) і зниженням витрати коксу (рис. 3, б).

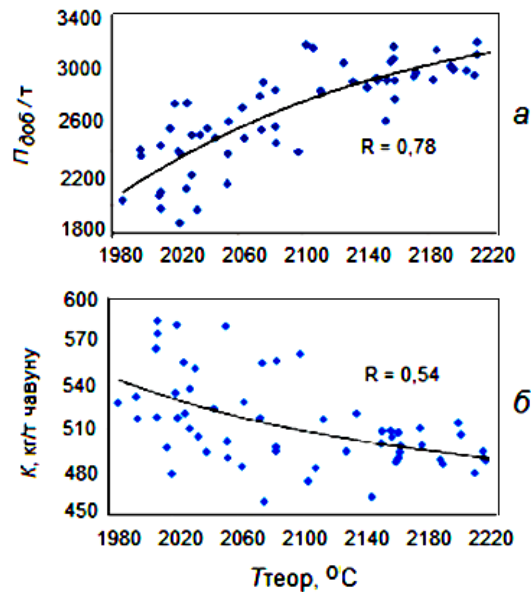


Рис. 3. Дані про зв'язок між теоретичною температурою горіння і добовою продуктивністю ДП № 2 Азовсталі ($P_{\text{доб}}$; а), а також витратою коксу на цій же печі (k ; б) за даними [4]

Виникає закономірне питання, чому технологи конкретної печі не працювали в обмеженому найкращому діапазоні змін ТТГ, в конкретному випадку в інтервалі 2140—2220 °С? Відповідь на це питання криється в особливостях технології доменної плавки в умовах постійних неконтрольованих змін якості завантажуваних залізородних матеріалів і коксу. При погіршенні якості зростає перепад тисків в стовпі шихтових матеріалів — знижують параметри дуття і відповідно падає ТТГ. Покращується якість сировини — знижується перепад тисків — технологи додають все те, що є в чисельнику для розрахунку ТТГ, витрати дуття, добавок, кисню на збагачення дуття, іноді навіть температуру дуття, якщо дозволяють повітрянагрівники, внаслідок цього ТТГ зростає з відповідним покращенням показників плавки. Тобто графіки, наведені на рис. 3, посередньо відображають результати реакції технологів на зміни сировинних та експлуатаційних умов плавки. Іншими словами в конкретних умовах підприємства існує певний діапазон можливостей збільшити ТТГ і покращити показники плавки.

При цьому важливо визначити засоби забезпечення бажаної величини ТТГ. Позитивним прикладом в цьому плані може бути робота Є. В. Овчинникової та А. М. Шаповалова (2013 р.), в якій робочий рівень ТТГ визначили за допомогою оптимізації відношення PG/O_2 , де PG і O_2 витрати природного газу і кисню на 1 т чавуну. Тобто слід враховувати те, що в комплекс ТТГ входять всі відомі інтенсифікатори плавки відносно параметрів дуття, кожен з яких по своєму впливає на доменний процес.

Переконливим прикладом була у свій час невдала спроба підняття температури дуття до 1200—1250 °С на новій доменній печі № 8 Дніпровського комбінату об'ємом 1754 м³, збудованій в 1974 році. Справа в тому, що на вказаній печі, як і на ДП № 9 Криворіжсталі вперше в СРСР були збудовані повітрянагрівники з виносною камерою горіння, які дозволяли підтримувати високий нагрів доменного дуття. Однак тогочасні сировинні умови роботи ДП № 8 ДМК не дозволяли підняття температури дуття вище 1200 °С. Всі спроби перейти межу цієї температури через кілька діб закінчувалися розладнанням ходу печі, що пояснювалось зменшенням виходу горнових газів, гальмуванням тепло- й масообміну в робочому просторі печі і надходженню непідготовлених матеріалів в горн.

У загальному випадку було показано, що саме умови доменної плавки визначають рівень ТТГ, для чого дослідили зв'язки між коефіцієнтом рівня доменної технології і ТТГ для шести доменних печей чотирьох металургійних комбінатів за період з 1958 по 2006 рр. [7]. За досліджуваний період в доменному виробництві відбулися суттєві зсуви, як в покращенні під-

готовки шихти, так і в технології плавки. Завдяки вдуванню природного газу була підвищена температура дуття, впроваджене комбіноване дуття, підвищилась основність і багатство агломерату, знизилися витрати сирого вапняку і вихід шлаку. В окресленому періоді коефіцієнт рівня технології, а саме співвідношення питомої продуктивності печі $P_{\text{пд}}$ до питомої витрати коксу $k_{\text{п}} K_{\text{уг}} = P_{\text{пд}} / k_{\text{п}}$ зріс з 1,74 до 5,54 т / м² год, тобто у три рази. При цьому ТТГ, розрахована за відомим виразом М. Є. Дунаєва і Т. Г. Кухтіна (1977 р.) зросла від мінімального значення 1844 °С до 2287 °С в найбільш сприятливих умовах доменної плавки. Вказаний приклад свідчить про те, що не ТТГ визначає показники плавки, а умови реалізації доменного процесу.

Висновки

Уточнення щодо порівняння схожості характеру змін температури і тиску газів на рівні повітряних фурм полягає в наступному. Температура газів в напрямі до центру горна зростає до фокусу горіння перед фурмою, а тиск — до кінця прифурменної порожнини. Відповідно температура знижується починаючи з фокусу горіння, а тиск — починаючи з коксової оболонки хвостової частини прифурменної порожнини.

Показано, що різке коливання температур газу в межах прифурменної порожнини не є недоліком в регулюванні доменного процесу, а проявою його нестационарності, обумовленої перш за все дискретними руйнуваннями оболонки прифурменної порожнини і надходженням коксу в її простір. Підтверджено, що при периферійному ході печей зона перед фурмою є найбільш критичною в плані коливання температур. Причиною цього явища є особливості гідромеханіки прифурменної зони — знижений тиск на зрізі фурми і деформація повітрогазового струменя, викликана дискретним обрушуванням коксу у прифурменну порожнину.

У конкретних умовах роботи печі в межах коливання сировинних та експлуатаційних умов існує певний діапазон збільшення ТТГ і покращення показників плавки за рахунок застосування тих чи інших засобів інтенсифікації доменного процесу, що є у розпорядженні технологічного персоналу. Показано, що умови доменної плавки визначають результативність та ефективність доменного процесу, а також можливий рівень досягнення теоретичної температури горіння.

Список використаної літератури

1. Плискановский С. Т. Полтавец В. В. *Оборудование и эксплуатация доменных печей*. Дніпропетровськ: Пороги, 2004. 425 с.
2. Тараканов А. К., Бочка В. В., Костомаров А. С., Кариков С. А. Оптимизация параметров дутьевого режима доменной плавки. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 2. С. 11–15.
3. К. Геншер, Г. де Хаас, М. Хёнинг и др. Измерения на доменной печи во время эксплуатации и использование полученных данных на практике. *Черные металлы*. 1983. № 15–16. С. 41–46.
4. Крячко Г. Ю. Особенности формирования дутьевой зоны в доменной печи. *Черные металлы*. 2007. № 9. С. 21–28.
5. Крячко Г. Ю. Газодинамический порог в горне доменной печи: предположение или реальность? *Черные металлы*. 2004. № 6. С. 10–15.
6. Крячко Г. Ю. Движение кокса в фурменной зоне и горне доменной печи. *Теория и практика металлургии*. 2009. № 3. С. 41–49.
7. Крячко Г. Ю. Хвостов М. К. Изменение теоретической температуры горения в процессе совершенствования доменного производства. *Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету*. Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2013. С. 3–6.

SOME SPECIFICATIONS REGARDING TEMPERATURES ON HORIZON AIR TUYERES OF THE BLAST FURNACES

Abstract

The purpose work is to clarify data on temperature changes on horizon air tuyeres of the blast furnaces. Shown that the common idea about similarity of changes in temperature and pressure of gases needs to be clarified. The difference is that the temperature gases in the direction to the centre of the furnace increases to the focus of combustion in front of the tuyeres, and pressure increases to the end of the tuyeres cavity. Accordingly, the temperature decreases starting from combustion focus, and pressure — starting from coke shell of tail part of the tuyeres cavity. The calculation gas temperature variation coefficients V_t based on the DonNDIChormet measurement data showed that V_t decreased from 8 to 3.5 % on average over a distance of 0.5 m as the distance from the tip of the tuyeres increased. This indicates that during peripheral operation of the furnaces, the zone in front of the tuyeres is the most critical in terms of temperature fluctuations. This phenomenon is explained by the characteristic features of the gas mechanics of the tuyere cavity — reduced gas pressure at the tuyere section and discrete deformation of the air-gas jet by coke collapse through dynamically unstable vaults of the tuyere cavity. It is shown that the blast furnace melting conditions determine the effectiveness and efficiency of the blast furnace process, as well as the possible level of reaching the theoretical combustion temperature.

References

- [1] Pliskanovskyi S.T., Poltavets V.V. (2004). Oborudovanie i ekspluatatsia domennih pecheyi [Equipment and operation of blast furnaces]. *Porogi*. 425 p. [in Ukrainian].
- [2] Tarakanov A.K., Bochka V.V., Kostomarov A.C., Karikov C.A. (2015). Optimizatsiya parametrov dutevogo rezhima domennoyi plavky [Optimization of blast mode parameters of blast furnace melting]. *Metallurgical and mining industry*. No 2. 11–15. [in Ukrainian].
- [3] K. Gensher, G. de Haas, M. Hening [et al.] (1983). Izmereniya na domennoyi pechi vo vremya ekspluatatsii i ispolzovanie poluchennih dannih na praktike [Measurements on a blast furnace during operation and the use of obtained data in practice]. *Stahl und Eisen*. No 15–16. 41–46.
- [4] Kryachko G.Yu. (2007). Osobennosti formirovaniya dutevoi zoni v domennoi pechi [Peculiarities of the formation of the blast zone in the blast furnace]. *Stahl und Eisen*. No 9. 21–28.
- [5] Kryachko G.Yu. (2004). Gazodinamicheskiy porog v gorne domennoi pechi: predpolozhenie ili realnost' [Gas dynamic threshold in the blast furnace: assumption or reality?]. *Stahl und Eisen*. No 6. 10–15.
- [6] Kryachko G.Yu. (2009). Dvizhenie koksa v furmennoyi zone i gorne domennoyi pechi [The movement of coke in the blast furnace zone and the bottom of the blast furnace]. *Theory and practice of metallurgy*. No 3. 41–49.
- [7] Kryachko G.Yu. (2013). Izmenenie teoreticheskoy temperatury goreniya v protsesse sovershenstvovaniya domennogo proizvodstva [Change in theoretical combustion temperature in the process of improving blast furnace production]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences)*. P. 3–6. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 25.03.2024