

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.4

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

ВПЛИВ ДОДАТКОВОГО ВМІСТУ АЗОТУ В НАГРІТОМУ ДУТТІ НА ПЕРЕБІГ ЗАДУВАЛЬНОГО ПЕРІОДУ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Метою роботи є визначення доцільності використання азоту для задування доменних печей. На підставі аналізу практичних даних про використання азоту в якості енергетичної добавки до атмосферного дуття при задуванні доменних печей, а також на підставі аналізу відповідності азотної технології задування основам теорії доменного процесу показано негативний вплив азоту на перебіг задувального періоду, що ставить під сумнів доцільність використання азоту в пусковий період роботи доменних печей.

Ключові слова: додатковий азот; нагріте дуття; доцільність використання; задувальний період; доменна піч.

The purpose of the work is to determine the expediency of using nitrogen for blowing blast furnaces. On the basis of the analysis of practical data on the use of nitrogen as an energy additive to atmospheric blasting when blasting blast furnaces, as well as on the basis of the analysis of the compliance of nitrogen blasting technology with the foundations of the theory of the blast furnace process, the negative influence of nitrogen on the course of the blasting period is shown, which calls into question the feasibility of using nitrogen in start-up period of blast furnaces.

Keywords: additional nitrogen; heated blast; expediency of use; blowing period; blast furnace.

Постановка проблеми

Починаючи з кінця 70-х років ХХ століття в колишньому СРСР активно просувалася технологія задувки доменних печей з використанням збагаченого азотом нагрітого атмосферного дуття [1], М.Д. Жембус зі співавторами (1984, 1989 р.р.), О.С. Янковський та ін. (1988 р.) та ін. Виникнення проблеми з часом було обумовлено неоднозначністю результатів впровадження нової технології – разом з позитивними повідомленнями, наприклад [1, 2], з'явилися і протилежні (В.М. Григор'єв зі співавторами, 1999 р.; О.В. Бородулін з авторським колективом, 2006 р. та автори роботи [3]). Характерно і то, що автори останніх двох публікацій повідомляли про суттєві проблеми з використанням нагрітого азоту, але вбачали в ньому найкращу енергетичну добавку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технологія задування доменних печей з використанням азоту передбачала його використання у чистому вигляді для сушіння футерівки і прогрівання стовпа шихти після капітальних ремонтів I і II розрядів і для зниження концентрації кисню в період роздування після будь-якого ремонту або тривалої стоянки печі. Сушіння футерівки і прогрівання шихти здійснюються шляхом подавання азоту в трубопровід холодного дуття з наступним нагріванням його в повітрянагрівнику до необхідної температури і вдуванням його в піч крізь повітряні фурми. Цей процес може бути суміщеним зі завантаженням печі шихтовими матеріалами.

Після подавання атмосферного дуття і спалахування коксу на фурмах витрата азоту регулюється для отримання розрахункової теоретичної температури горіння. Через 8–24 год від

задування розробники технології (М.Д. Жембус зі співавторами, 1989 р.) вважали, що піч практично готова до виведення на нормальний режим.

Посилаючись на свій досвід, набутий у 80-х роках ХХ століття, розробники стверджували, що витрату коксу в разі застосування нагрітого азоту можна знизити на 12—35 %, продуктивність підвищити на 17—39 %, а тривалість роздування скоротити з 7—15 % до 3—5 діб.

Механізм впливу азоту, що додається до дуття, на газодинамічні і теплові процеси в задувальному періоді доменної печі за даними тих же авторів складається з трьох складових. По перше, додаткове тепло, що вноситься нагрітим у повітрянагрівниках азотом з атмосферним дуттям прискорює теплообмін. По друге, збільшення об'єму горнових газів призводить до розбавлення кисню дуття і відновників і, як наслідок, до їх більш ефективного використання. По третє, вважалось, що збільшення об'єму дуття і швидкості його на фурмах призведе до віддалення окислювальної зони від стін печі, послаблення периферійного газопотоку і відповідно впливу на футерівку.

В останній роботі [4], з теми, що розглядається, стверджується про корисне зниження концентрації кисню в дутті, яке дає змогу в інтервалі більшого часу прогрівати і сушити шихтові матеріали по висоті печі до настання фази їхнього плавлення завдяки уповільненню процесу спалювання вуглецю коксу та опусканню матеріалів до високотемпературної фурменної зони.

Об'єктивній оцінці азотної технології задування доменних печей заважають суттєві недоліки публікацій про практичне її застосування. Головними з цих недоліків є відсутність даних про зміну газодуттєвих параметрів протягом задувального періоду (майже всі розглянуті вище роботи), некоректне порівняння технічних показників роздувальних періодів різних років без приведення порівнюваних даних до однакових умов (М.Д. Жембус та ін. публікації, 1984 і 1989 рр.), скорочена тезисна форма викладу змісту (О.С. Янковський та ін., 1988 р.).

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є визначення доцільності використання азоту для задування доменних печей.

Виклад основного матеріалу

Для аналізу і реалізації поставленої мети використали дані про задувальні періоди доменної печі № 9 комбінату «Криворіжсталь» (зараз ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»), опубліковані в 2006 р. (О.В. Бородулін зі співавторами). З метою розширення інформації про порівнювані задувальні періоди додали дані про конструктивні відмінності досліджуваної печі і розраховали швидкість витоку дуття із повітряних фурм разом з відносною до корисного об'єму хвилинною витратою дуття (табл. 1).

ДП № 9 тоді ще комбінату «Криворіжсталь», задута 30.12.1974 р., була оснащена 36 повітряними фурмами і завантажувальним пристроєм клапанного типу конструкції ВНДІметмаш — УЗВМ (В.І. Большаков зі співавторами, 1982 р.). внаслідок конструктивних недоліків цього засипного пристрою і його невідповідності технологічним вимогам (неможливість створення регульованої осьової коксової віддушини, висока окружна нерівномірність розподілу матеріалів) задування і роздування печі було пов'язане з суттєвими труднощами. До цих труднощів слід додати вкрай низькі відносні витрати дуття і швидкості його витоку (табл. 1, період I), що не сприяло своєчасному утворенню активних фурмених вогнищ і зональності стовпа шихти. Внаслідок цього тривалість задувального періоду становила 34 години. Слід зазначити, що із-за суттєвої різниці в конструкції досліджуваної печі викладене порівняння першого і решти задувальних періодів не зовсім коректне оскільки порівнюються показники по суті різних за конструкцією печей однакового об'єму.

Першу спробу застосування азоту для задування ДП № 9 автори на чолі з О.В. Бородуліним вважали невдалою, оскільки, на їх погляд, задування проводили лише на половині повітряних фурм з 42 існуючих. На наш погляд задування на половині фурм не було «цеховою майстеровщиною», як вважали згадані автори, а цілком технологічно обґрунтованим заходом, про що свідчить достатньо висока середня швидкість витоку дуття 225 м/с (табл. 1, період II). Однак перепоною для своєчасного утворення класичної п'ятизональної структури стовпа шихти було п'ятидобове подавання азоту, внаслідок чого вміст кисню в дутті знизився до 17 %, а три-

валість задувального періоду зростає до 48 годин, що вдвічі довше ніж при задуванні на атмосферному дутті (табл. 1, період III).

Таблиця 1. Параметри конструкції доменної печі № 9 «Криворіжсталі» об'ємом 5000 м³ і її задувальних періодів за даними В.І. Большакова зі співавторами (1982 р.) і узагальнення з роботи О.В. Бородуліна зі співавторами (2006 р.)

Параметр	Час задувань			
	30.12.1974* (I)	31.10.1984* (II)	06.12.1989* (III)	14.11.2003* (IV)
Засипний пристрій	ВНДіМетМаш-УЗВМ	Paul Wurth	Paul Wurth	Paul Wurth
Повітряні фурми:				
число	36	42	42	42
діаметр, мм	190	150	140	150
діаметр зі вставкою, мм	160	0	0	0
число закритих фурм	0	21	0	0
число горілих фурм	15	0	15	0
швидкість витоку дуття, м/с	62—76	225	121—135	56—177
Дуттьовий режим до першого випуску чавуну:				
витрата, м ³ /хв	900—1500	3000	2000	900—4500
м ³ дуття / (м ³ V _{кор} ·хв)	0,18—0,30	0,60	0,40	0,18—0,90
надмірний тиск, кПа	20—80	120	40	20—120
температура, °С	700—800	750	600—700	650—800 ¹⁾ 300—650 ²⁾
вміст кисню, %	21	17 (5 діб)	21	21 ³⁾ 17 ⁴⁾
Час, через який відбувся перший випуск чавуну, год	34	48	22	34
Вміст кремнію в чавуні, %	1,5	5—6	0,9	2,0

Примітки: Негативні явища на печі при задуваннях I—IV: I — шлаки малорухомі, чавуни холодні. Забруднення при випуску продуктів плавки. Загромадження горна і часті прогари фурм; III — продуви кожуху в районі льоток № 2 і № 3, набивка футлярів, часті простой на заміну фурм і сопел; IV — перший чавун вийшов з льотки свавільно. Піддоменник чистили 4,5 діб з одночасним використанням 8 одиниць спеціальної техніки.

* В перші три кампанії при задуванні використовували дрова

¹⁾ — перші 14 год; ²⁾ — в подальшому ³⁾ — перші 2 год; ⁴⁾ — подальші 12 год

Недоліками задування 06.12.1989 р. (III період) на всіх повітряних фурмах були низькі відносна витрата дуття і швидкості струменя дуття, які завадили транспорту газів і тепла в центральну зону печі. Наслідком периферійного руху газів були погіршення дренажу в коксовій насадці, в результаті чого різко погіршилися умови служби повітряних фурм і сопел.

На початку четвертої кампанії (табл. 1, період IV) спираючись на теоретичну уяву про готовність печі з підігрітою додатковим азотом шихтою прийняти збільшену кількість дуття фахівці на чолі з О.В. Бородуліним намагалися форсувати задування збільшеними разовими добавками дуття. Автори зазначали: «Опір матеріалів висхідному газовому потоку зростає, піч приймала меншу кількість дуття, що примусило рано перейти на подавання атмосферного дут-

тя (через 14 годин після початку задувки). Тривалість роботи на дутті, збагаченому азотом, була скорочена внаслідок осадження стовпа шихти на ходу і наступного підвисання її, що було викликано черговим переходом з одного повітрянагрівника на інший. Витрата дуття протягом 1,5 год була скорочена з 4500 до 1000 м³/хв. Збільшити його витрату до попереднього рівня вдалося через 6 годин після переходу на атмосферне дуття з температурою 400 °С.

Слід зазначити, що табличні дані (табл. 1, період IV) і коментар О.В. Бородуліна зі співавторами до таблиці не зовсім співпадають з графіком змін витрати дуття і його температури (рис. 1). Згідно з графіком (рис. 1, а) фактичні витрати дуття значно перевищували табличні дані і допустимі для задувального періоду. Так, через 2 години після пуску печі витрата дуття складала 6100 м³/хв або 1,22 $V_d/V_{кор}$ хв при бажаних 0,5–0,6 $V_d/V_{кор}$ хв, тобто 2500–3000 м³/хв.

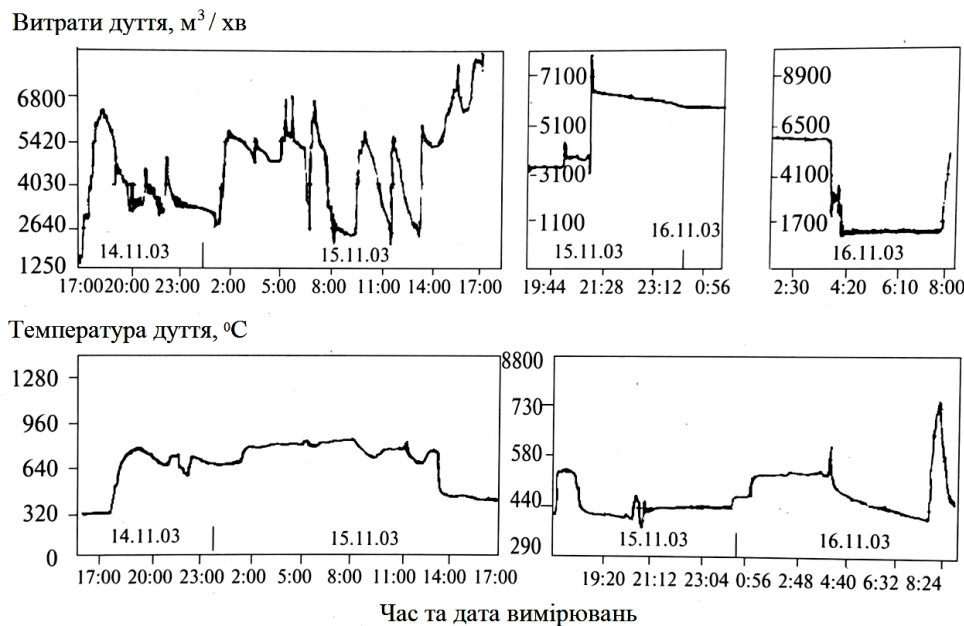


Рис. 1. Витрати та температура дуття при задуванні печі № 9 «Криворіжсталі» 14.11.2003 за даними О.В. Бородуліна зі співавторами

Не менш критичною була витрата дуття в кінці задувального періоду майже 8200 м³/хв (1,64 $V_d/V_{кор}$ хв), що відповідала стаціонарному робочому діапазону форсування ходу печі. Як наслідок невиправдано високий темп задування ДП № 9 14.11.2003 р. призвів до вкрай нерівномірного сходу шихти, підвисань і обривів, про що свідчать дані рис. 1. При задуванні 14.11.2003 р. було порушено головний принцип задування печі — принцип поступовості нарощування витрати і температури дуття.

Таким чином О.В. Бородулін зі співавторами (2006 р.) і О.А. Сохацький з О.Л. Чайкою [3] в тій чи іншій мірі повідомляли про зтяжні порушення газодинамічної роботи печі в задувальному періоді з використанням нагрітого азоту разом з атмосферним дуттям. Цей факт потребує вивчення і пояснення.

Краєкутовим каменем азотної технології задування вважається можливість підняття температури дуття без підняття теоретичної температури горіння [1]. Розглянемо з точок зору розробників цієї технології і теорії доменного процесу (О.Н. Рамм, 1980 р.) вплив нагрітого азоту і температури дуття на перебіг доменного процесу. Результати порівняння представлені на рис. 2.

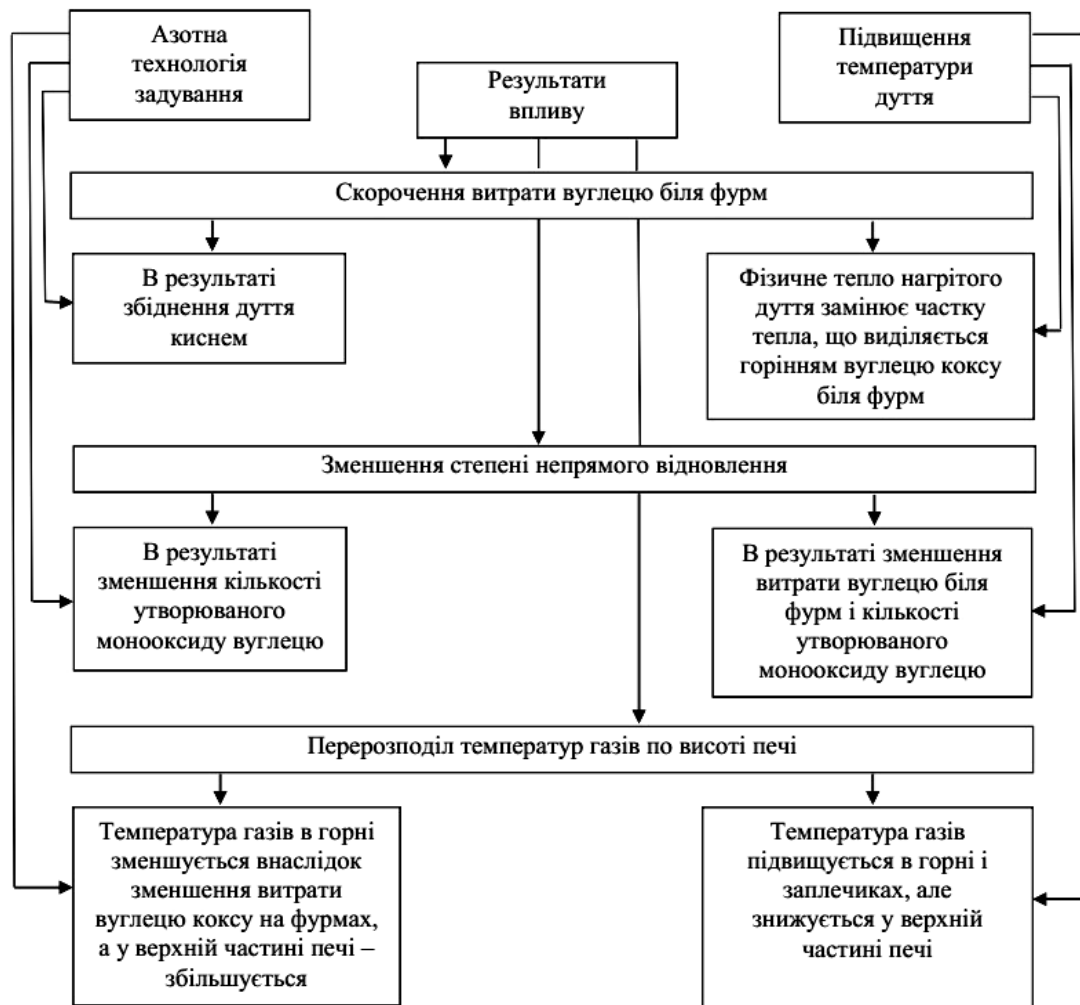


Рис. 2. Порівняння впливів азотної технології задування доменної печі і температури дуття на доменний процес

Порівняння показує, що тільки в одному різновиді впливу азотна технологія задування і температура дуття діють у зворотних напрямках, тоді як у перших двох вони діють в одному конкурентному напрямку, що ставить під сумнів доцільність їх одночасного застосування в задувальний період.

Не слід виключати з розгляду і взаємний негативний вплив добавочного азоту в атмосферному дутті і підвищення температури дуття. Відомо (Б.С. Фіалков і В.Т. Пліцин, 1971 р.), що з утворенням прифурменої порожнини і збільшенням її розмірів знижується опір шихти газовому потоку. Збагачення дуття азотом зменшує об'єм порожнини при дефіциті кисню, а підвищення температури дуття збільшує об'єм і тиск газів, як в порожнині, так і за її межами. Взаємна дія двох перерахованих факторів суттєво зменшує газопроникність шихти, що є перешкодою для її рівномірного опускання.

Щодо механізму впливу азоту, який на думку розробників технології складається з трьох складових, є застереження відносно перших двох (див. п. Аналіз останніх досліджень). По перше прискорення теплообміну повинно прискорити утворення первинної зони когезії, в якій передчасно підуть процеси злипання кусків залізородних матеріалів з втратою газопроникності і макропор з утворенням рідкої фази.

По друге, розбавлення кисню дуття і відновників в пічному газі аж ніяк не сприяє покращенню відновлювання залізородних матеріалів, особливо в передчасно утвореній зоні когезії,

адже відомо [5], що навіть при інтенсивних режимах ведення доменних печей з високим вмістом відновників близькість пічного газу до рівноваги не дозволяє відновлювати FeO в кільцевій зоні гребеня на 60 % робочої висоти печі від рівня засипу. Тобто концентрація уваги на розвитку температурного поля в стовпі шихти доменної печі в задувальному періоді [3, 4] не повинна викреслювати з розгляду динаміку змін механіки руху шихти і концентраційного поля, адже проблемою азотної технології задування є відсутність відносно рівномірного опускання шихти і обробки її гарячими відновлювальними газами.

З чотирьох причин опускання шихтових матеріалів в доменній печі, яка працює в робочому стаціонарному режимі [6], на початку задувального періоду відома тільки одна — вигорання коксу на фурмах (якщо піч задувають без дров'яного шару в горні). Додатковий азот в нагрітому дутті уповільнює процес спалювання коксу на фурмах, чим відтягує початок руху шихти, збільшення її порознуватості і відповідно газопроникності.

Крім цього, одночасне зменшення маси коксу, що згорає біля фурм, і скорочення розмірів прифурменої порожнини разом зі збільшенням виходу фурменого газу в результаті збагачення дуття азотом погіршує газопроникність шихти в зоні високих температур. З другої сторони збіднення пічного газу відновниками і передчасне нагрівання залізородних матеріалів (ЗРМ) з втратою їх сипучості погіршують процес відновлення. Непідготовлені ЗРМ при опусканні униз викликають зростання прямого відновлення і охолодження горна.

Якщо б розробникам азотної технології задування вдалося подолати негативні прояви додаткового азоту відносно перебігу задувального періоду, тоді б вказана технологія набула визнання і поширення.

Висновки

В результаті аналізу практичних даних про використання азоту в якості енергетичної добавки до атмосферного дуття при задуванні доменних печей виявлено наступне:

- в жодній роботі зі вказаного питання, крім відомої публікації О.В. Бородуліна зі співавторами (2006 р.) не приведено практичних даних про вплив нагрітого додаткового азоту на перебіг задувального періоду;

- порівняння показників задувального і роздувального періодів різних задувань доменних печей, проведених в різний час, виконані некоректно, оскільки при порівнянні не були виконані обов'язкові операції приведення параметрів плавки до однакових умов і співставлення складу та архітектури задувальних шихт;

- на сьогодні надійної доказової бази про доцільність використання азотної технології задування доменних печей не існує.

Разом з тим встановлено, що добавка нагрітого азоту гальмує своєчасне утворення зональності доменного процесу по висоті печі і збільшує тривалість задувального періоду в залежності від витрати азоту і тривалості його застосування.

На досвіді задування доменної печі № 9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» показано, що використання азоту супроводжувалось порушенням принципу поступовості нарощування газодуттьових параметрів і утворення характерних зон по висоті доменної печі.

З точки зору основ теорії доменного процесу розглянуто негативний вплив додаткового нагрітого азоту в дутті на перебіг задувального періоду доменної печі і пояснено причини цього впливу.

Список використаної літератури

1. Применение азота при раздувке доменных печей. М.Д. Жембус, А.П. Монаршук, Г.А. Зуенок и др. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1986. №2. С. 7—9.
2. Демидов В.А., Котов В.В. Технология выдувки и задувки доменной печи с использованием азота. *Металл и литейные технологии Украины*. 2005. №5. С. 16—20.
3. Сохацький О.А., Чайка О.Л. Математичне моделювання та дослідження теплогазодинамічних процесів у доменній печі в період її задувки. *Вісник Академії митної служби України. Серія «Технічні науки»*. 2012. №2 (48).

4. Аналіз розвитку технологій задувки доменних печей в 20—21 століттях. М.А. Альбер, О.Л. Чайка, Б.В. Корнілов, А.О. Москалина. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2003. Вип. 37. С. 26—49.
5. О профиле проектируемых доменных печей большого объема. Г.Ю. Крячко, П.К. Лебедь, О.А. Бабенко и др. В сб. *«Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема»*. Металлургия. 1981. №7. С. 4—10.
6. Металлургия чугуна. Г.Г. Ефименко, А.А. Гиммельфарб, В.Е. Левченко. К.: Вища школа. 1988. 351 с.

THE INFLUENCE OF ADDITIONAL NITROGEN CONTENT IN THE HEATED DUTTY ON THE PERFORMANCE OF THE BLOWING PERIOD OF BLAST FURNACES

Abstract

An analysis of the effect of heated nitrogen and blowing temperature on the course of the blast furnace process was performed from the point of view of the developers of this technology and the theory of the blast furnace process. It is shown that enriching the blowing with nitrogen reduces the volume of the cavity in case of oxygen deficiency, and increasing the blowing temperature increases the volume and pressure of gases, both in the cavity and outside it. The mutual effect of the two listed factors significantly reduces the gas permeability of the charge, which is an obstacle to its uniform lowering. With regard to the mechanism of nitrogen influence, it is shown that, firstly, the acceleration of heat exchange should accelerate the formation of the primary cohesion zone, in which the processes of sticking together pieces of iron ore materials with the loss of gas permeability and macropores with the formation of a liquid phase will prematurely proceed, and secondly, the dilution of blowing oxygen and reducing agents in the furnace gas does not contribute improving recovery of iron ore materials, especially in the prematurely formed zone of cohesion. Additional nitrogen in the heated blast slows down the process of burning coke on the tuyeres, thereby delaying the start of movement of the charge, increasing its porosity and, accordingly, gas permeability. Focusing attention on the development of the temperature field in the charge column of the blast furnace during the blowing period should not exclude from consideration the dynamics of changes in the mechanics of the movement of the charge and the concentration field, because the problem of nitrogen blowing technology is the lack of relatively uniform lowering of the charge and its treatment with hot reducing gases. In addition, the simultaneous decrease in the mass of coke burning near the nozzles and the reduction in the size of the nozzle cavity, along with the increase in the output of nozzle gas as a result of nitrogen enrichment of the blast, worsens the gas permeability of the charge in the high temperature zone. On the other hand, the depletion of furnace gas by reductants and premature heating of iron ore materials with loss of their fluidity worsen the recovery process. Unprepared iron ore materials, when lowered down, cause an increase in direct recovery and cooling of the furnace. On the basis of the analysis of practical data on the use of nitrogen as an energy additive to atmospheric blasting when blasting blast furnaces, as well as on the basis of the analysis of the compliance of nitrogen blasting technology with the foundations of the theory of the blast furnace process, the negative influence of nitrogen on the course of the blasting period is shown, which calls into question the feasibility of using nitrogen in start-up period of blast furnaces.

References

- [1] Zhembus, M.D., Monarshuk, A.P., Zuenok, G.A. [et al.] (1986). Primeneniye azota pri razduvke domennykh pechey [Application of nitrogen in blast furnace blowing]. *Metallurgical and mining industry*. No 2. 11—15 [in Russian].
- [2] Demidov, V.A., Kotov, V.V. (2005). Tekhnologiya vyduvki i zaduvki domennoy pechi s ispol'zovaniyem azota [Blast furnace blowing and blowing technology using nitrogen]. *Metal and casting of Ukraine*. No 5. 16—20 [in Russian].
- [3] Sohatsky, O. A., Chaiyka, O. L. (2012). Matematychnе modelyuvannya ta doslidzhennya teplohazodynamichnykh protsesiv u domennyi pechi v period yiyi zaduvky [Mathematical model-

- ing and research of thermal and gas-dynamic processes in a blast furnace during its blow-down period] *Bulletin of the Academy of the Customs Service of Ukraine. Series "Technical Sciences"*. No 2 (48). [in Ukrainian].
- [4] Alber, M. A., Chaika, O. L., Kornilov, B. V., Moskalina, A. O. (2003). Analiz rozvytku tekhnolohiy zaduvky domennykh pechey v 20—21 stolittiyakh. [Analysis of the development of blast furnace technologies in the 20—21st centuries]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. Vip. 37. 26—49.
- [5] Kryachko, G. Yu., Lebed', P. K., Babenko, O. A. [et al.] (1981). O profile proyektiruyemykh domennykh pechey bol'shogo ob'yema. [About the profile of large-volume designed blast furnaces]. *On Sat. "Intensification of blast furnace processes and development of large-volume furnaces"*. *Metallurgy*. No 7. 4—10 [in Russian].
- [6] Efimenko, G. G., Gimmelfarb, A. A., Levchenko, V. E. (1988). Metallurgiya chuguna. [Metallurgy of cast iron]. K.: *Higher school* [in Russian].

Надійшла до редколегії 14.10.2024