

Г.Ю. Крячко, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри металургії ім. проф. В. І. Логінова,
e-mail: krachkogennadij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>

Є.М. Сігарьов, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургії ім. проф. В. І. Логінова,
e-mail: en_sigarev@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

Дніпровський державний технічний університет (Кам'янське, Україна)

Нестационарні перехідні режими роботи доменних печей в пусковий період після будівництва або реконструкції

Метою представленої роботи є визначення задач і характерних ознак трьох періодів переходу доменних печей (ДП) від пуску до стаціонарного режиму ведення плавки, а саме задувального, роздувального і освоєння потужності печі. Показано, що задачею задувального періоду є утворення первинної зони когезії і встановлення п'ятизонної структури стовпа шихти, притаманної стаціонарному режиму доменної плавки. Задачею суміжних роздувального і освоєння потужності печі періодів є досягнення робочого рівня газодуттьових параметрів — витрати і температури дуття разом з підвищенням тиском газів в робочому просторі печі. Показано, що завершенням задувального і початком роздувального періодів є вимушене зменшення витрати дуття в результаті утворення зони когезії в стовпі шихти і зростання його опору. Візуально межею вказаних періодів є характерні переломи на кривих зміни в часі температур колошникового газу і вмісту CO і CO² в ньому — температура після перелома зростає, а вміст газів стабілізується на певних рівнях.

Встановлено, що рекомендація нарощувати витрату дуття в роздувальному періоді зі швидкістю 30—35 м³/год не є універсальною, оскільки не враховує розміри доменної печі. Показано, що при початковій відносній витраті в роздувальному періоді в $1,0 V_d / V_{кор}$ хв з темпом роздування 35 м³/год тривалість задувального періоду ДП 1033 м³ становитиме 1,2 доби, а ДП 5000 м³ — 6 діб. Тобто ще одна відома рекомендація стосовно однакової тривалості роздувального періоду в 5—6 діб потребує коректив.

Сучасна практика будівництва і реконструкції доменних печей спрямована на застосування керамічного стакану в горні і лежачі, тому спираючись на досвід дальнього зарубіжжя, тривалість роздувального періоду може бути скорочена за рахунок періоду виплавки ливарного чавуну.

Печі великого об'єму потребують подовженого періоду освоєння потужності, при якому умовою кожного наступного підвищення газодуттьових параметрів є збереження стабільності температурного режиму футерівки горна, зумпфу і лежачі.

Ключові слова: доменна піч; задувальний; освоєння потужності; перехідні режими; роздувальний; темп роздування; тривалість.

Вступ. Відомо, що доменний процес є складною нелінійною системою, для якої притаманні три основних типи нестационарності, обумовлені виникненням перехідних режимів в результаті зміни вхідних параметрів, періодичності завантаження шихтових матеріалів і випуску продуктів плавки, а також розвитком екзотермічних реакцій в робочому просторі доменної печі (Ю. М. Овчинников зі співавторами, 1989 р.).

Для розмежування трьох різних періодів в експлуатації доменних печей «задувка — кампанія в робочому режимі — видувка на капітальний ремонт» їх умовно поділяють [1, 2] на нестационарні (задувка, видувка) і стаціонарний проєктний (реальний) режим протягом кампанії, оптимізований відносно виплавки переробного чавуну для конкретних умов плавки. Зрозуміло, що зі сторони класичного визначення

нестационарних процесів кожен із зазначених періодів експлуатації печі має свої прояви нестационарності, які вимагають уваги і додаткового вивчення.

Постановка проблеми у загальному вигляді

Відповідно до прийнятих вище визначень нестационарний режим експлуатації доменної печі починається з моменту подавання дуття в піч і переходить в стаціонарний при створенні певних умов в робочому просторі печі, за яких досягаються проєктні продуктивність і питома витрата палива. Загально відоме прагнення, щоби тривалість цього переходу була мінімальною, однак не за рахунок скорочення кампанії [3].

Аналіз поглядів фахівців на проблему пускового періоду (табл. 1) показав суттєву відмінність в підходах до формулювання задач, які підлягали вирішенню.

Задачі задування доменної печі, сформульовані на різних етапах розвитку доменної технології

Автори, рік публікації, в дужках порядковий номер в хронології	А. М. Похвіснев зі співавторами, 1951 р. (1)	М. Я. Остроухов, Л.Я. Шпарбер, 1977 р. (2)	Б. М. Жеребін, 1980 р. (3)	В. В. Капорулін зі співавторами, 1989 р. (4)	В. І. Большаков зі співавторами, 2009 р. (5)
Задачі	1. Відсутність аварій. 2. Збереженість футерівки печі при заповненні її шихтою і в перший період роботи печі. 3. Отримання придатного чавуну.	1. Створення гарнісажу і збереження профілю печі. 2. Забезпечення підвищеного теплового стану печі. 3. Створення достатнього дренажу в горні і видачі продуктів плавки за прискореним графіком. 4. Створення раціонального газорозподілу. 5. Здійснення заходів, що попереджують простої і аварії.	1. Захист лещаді, кладки метало приймача і заплечиків при завантаженні і задуванні печі. 2. Отримання заданого складу чавуну і шлаку. 3. Забезпечення нормального пускового періоду відповідно до плану і графіку роздування.	Однією з основних задач задувального періоду є прогрівання матеріалів в об'ємі печі до робочих температур.	Забезпечення інтенсивного нарощування газодинамічних параметрів при збереженні технології стійкого розвитку процесів плавки.

Джерело: складено авторами на основі аналізу поглядів фахівців на проблеми пускового періоду.

Якщо, ґрунтуючись на досвіді відновлення металургійної галузі 40-х післявоєнних років ХХ ст. першочерговою задачею було уникнення аварій при задуванні печей, то на початку ХХІ ст. на перше місце вийшла задача нарощування газодинамічних параметрів задування при збереженні рівного ходу. Спостерігається відмінність також у поглядах на задачі періоду взагалі, (порядкові номери 1, 2, 5 в хронології табл. 1) і лише на задачі задувального періоду (номери 3, 4 в хронології табл. 1).

Мета дослідження

Метою дослідження є вирішення наступної задачі: сформулювати призначення і характерні ознаки трьох періодів переходу доменних печей від пуску до стаціонарного режиму ведення плавки, а саме задувального, роздувального і періоду освоєння потужності печі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

До появи монографії Б. М. Жеребіна (1980 р.) поділу операції задування на задувальний і роздувальний періоди роботи печі не існувало.

Неоднозначність підходів до регламентації режимів задування печей починається навіть з питання про те, яку операцію слід вважати початком пуску. Якщо за традицією під стартовим моментом задування розуміють подавання дуття в піч [3], то на відміну від цього, стартом роботи пропонують вважати початок спалахування коксу (В. В. Капорулін зі співавторами, 1989 р.).

Відсутня однаковість і стосовно характеру ознак, за якими слід поділяти задувальний і розду-

вальний періоди. Так, за Б. М. Жеребіним помітне потемніння кусків коксу на фурмах внаслідок роботи печі на дутті з надмірним тиском 10—15 кПа повинно бути сигналом для збільшення витрати і тиску дуття, тобто закінчення задувального і початку роздувального періоду. Закінчення задувального періоду за В. В. Капоруліним зі співавторами пов'язується з першими випусками продуктів плавки і встановленням в робочому просторі печі температурного поля, характерного для нормально працюючої печі. Тому однією з основних задач задувального періоду вважали прогрівання матеріалів в об'ємі печі і зокрема в горні до робочих температур.

Б. Ф. Чернобривець та ін. (1992 р.), Е. М. Щеглов зі співробітниками (2013 р.) вважали закінченням задувального періоду час проплавлення шихти заповнення, який в умовах Новолипецького металургійного комбінату (НЛМК) складав 15—20 год.

Багато невизначеності в рекомендаціях відносно задування доменних печей. Так, невідомо, що вважати нормальними витратою дуття і питомою витратою коксу, до яких автори [4] рекомендували переходити якомога швидко. Не ясно, що розуміти під нормальною продуктивністю доменної печі, яка на думку [4] досягається на шосту-сьому добу.

Викликає питання і більш конкретна рекомендація [5] про те, що при сприятливому протіканні роздувального періоду кількість дуття, яка чисельно дорівнює двом корисним об'ємам печі, досягається на 5—6 добу після задувки печі, а проектна продуктивність очікується на 7—8 добу. Було б дуже корисним отримання аргументів на підтвердження вказаної

рекомендації.

Матеріали та методи

Для дослідження методом порівняльного, в тому числі розрахункового аналізу, задіяні матеріали, що характеризують режим пускових періодів доменних печей різного об'єму.

Результати

З метою усунення невизначеності в поділі кампанії доменної печі на відмінні один від одного проміжки часу запропоновано поділяти кампанію на п'ять характерних періодів — задувальний, роздувальний, період освоєння потужності печі — стаціонарний високопродуктивний період експлуатації — тимчасовий період стагнації перед капітальними ремонтами і видувальний період.

Чисельні дослідження структури стовпа шихти діючих і заморожених на ходу доменних печей показали, що умовою реалізації доменного процесу є утворення в робочому просторі печей п'яти характерних зон. Від лещаді до колошника — це коксова насадка, частково занурена в розплави чавуну і шлаку, прифурменні порожнини, зона активного руху коксу над коксовою насадкою, зона когезії (розм'якшення і плавлення залізорудної сировини) і так звана «суха» зона, де в твердому вигляді знаходяться в пошаровому укладанні кокс і залізорудна сировина. Тому задачею першого, задувального періоду роботи печі, є вихід на формування п'ятизонної структури стовпа шихти, притаманної стаціонарному доменному процесу. Особлива увага повинна приділятися утворенню прифурменної порожнини, яка покращує розподіл газів в перетині печі і зменшує опір стовпа шихти в процесі утворення зони когезії, для чого рекомендується швидкість витoku дуття з повітряної фурми до 175 м/с і більше [6].

Розглянемо аргументи на користь цього припущення. В таблиці 2 показано динаміку перетворень в стовпі шихти під час задувального періоду за даними японської практики. З наведених в таблиці даних видно, що визначальним фактором в процесі структуризації стовпа шихти і зміни його газопроникності є процес утворення первинної зони когезії. Так, в проміжку часу між 10 і 17 годинами тим-

часове погіршення газопроникності пояснюється появою в центрі печі зони розм'якшених залізорудних матеріалів. Надалі до 20 години від подачі дуття в піч зона когезії поширюється в перетині печі, і опір стовпа шихти знову зростає.

Залучення дослідних даних з вітчизняної практики (рис. 1) свідчить про існування загальної закономірності в перетворенні стовпа шихти під час задувального періоду.

Приблизно в тому ж проміжку часу поява і поширення зони когезії призводить до різкого зростання коефіцієнту опору стовпа шихти (рис. 1, в) і вимушеного зменшення витрати дуття (рис. 1, а), що є сигналом для зміни газодуттєвого режиму, а саме підняття тиску газу на колошнику. Зростання температури колошникової газу в проміжок часу між 16 і 22 годинами свідчить про перехід завершеного теплообміну в незавершений і структуризацію стовпа шихти.

Додатковою аргументацією стосовно ролі задувального періоду в процесі задування і виведення печі на стаціонарний режим є дослідні дані, отримані шляхом горизонтального зондування доменної печі № 5 НЛМК (рф) об'ємом 3200 м³ (В. В. Капорулін зі співробітниками, 1989 р.). Відмінності характеру протікання процесів в задувальному періоді в порівнянні з японською практикою (табл. 2) полягали в наступному (рис. 2).

По-перше, відлік часу до початку суттєвих змін температури в стовпі шихти розпочато з моменту спалахування коксу, а не з моменту подавання дуття. По-друге, за весь задувальний період (рис. 2 а, б, в) стабільно зберігався посилений осьовий потік газів з пригніченням периферійного, що можна пояснити специфікою форсованої технології задувки печі. Тим не менш, судячи з розміщення ізотерм по висоті стовпа шихти видно, що в задувальному періоді відбулося формування Λ – подібної первинної зони когезії. Ізотерми, отримані при зондуванні печі після 34 годин від моменту спалахування коксу (рис. 2, г), відносяться до іншого періоду процесу задування, а саме роздувального, про що свідчить висока температура колошникової газу 500 °С.

Відмічаючи цінність отриманих дослідних даних, не можна залишити без зауваження використання авторами спотворених профілів доменної печі для

Таблиця 2

Зміни структури стовпа шихти доменної печі в задувальному періоді, характерні для японської практики

Час, год. від моменту подавання дуття в піч	Стадії перетворень	Зміни в структурі стовпа шихти
0—10	I	Підвищення температури шихти. Переважний розвиток осьового потоку газів у вузькому діапазоні перетину доменної печі
10—17	II	Поява і початкове формування зони розм'якшення – плавлення (когезії) в центрі печі з тимчасовим погіршенням газопроникності стовпа шихти
17—20	III	Зона когезії досягає широкого розповсюдження і деякої стабілізації її меж. Ця стадія супроводжується тимчасовим погіршенням газопроникності шихти в периферійній зоні і деяким посиленням осьового газопотоку
> 20	IV	Починається переміщення газопотоку до осі печі, і завершується формування первинної зони когезії

Джерело: за даними С. М. Кутнер, 1984 р.

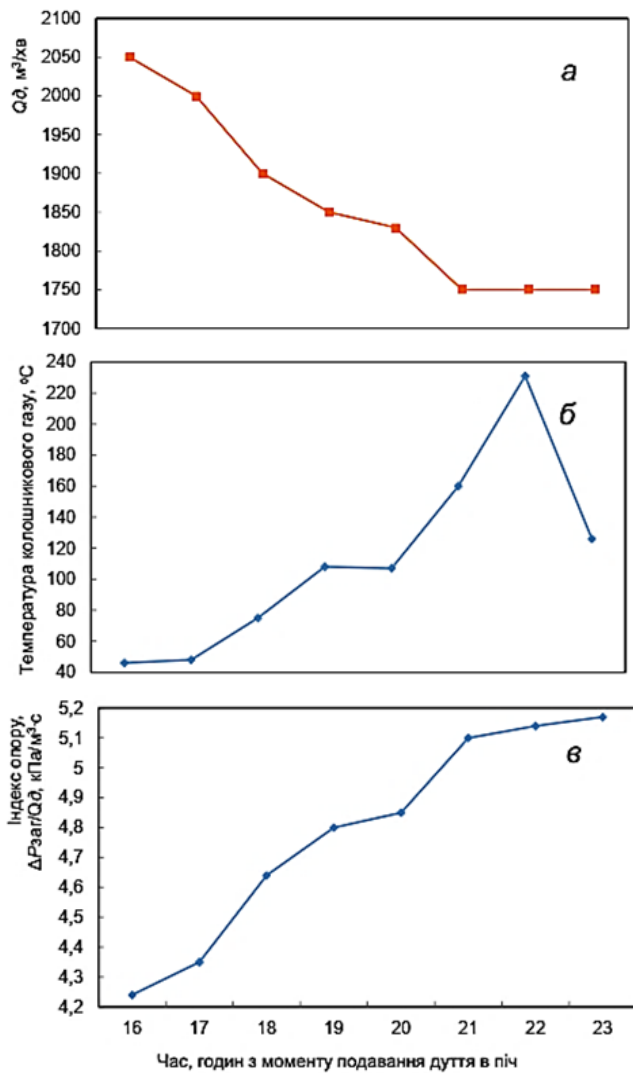


Рис. 1. Зміни витрати дуття (а), температури колошникового газу (б) та індексу опору стовпа шихти (в) в задувальний період роботи доменної печі № 8 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» 12.08.2008 р.

Джерело: за даними П. А. Васюченка

розміщення дослідних ізотерм. Так, на рис. 2, а зображено занадто високий розпар, а на всіх без винятку профілях показані рівновеликі діаметри горна і колошника, що неприпустимо для подібного роду досліджень, оскільки в таких випадках потрібно використовувати або проєктний, або будівельний профіль печі. Не можна погодитись також з пропозицією починати відлік часу пуску печі з моменту спалахування коксу, оскільки подання гарячого дуття в піч само по собі є початком термічного впливу на стовп шихтових матеріалів.

Важливо знати, які поширені і завжди контрольовані параметри процесу можуть дати вичерпну інформацію про видозмінення структури стовпа шихти при задуванні печі. Для ілюстрації принципу, за яким слід розмежовувати задувальний і роздувальний періоди роботи печі, використали дані М. Я. Остроухова і Л. Я. Шпарбера (1977 р.), показані на рис. 3. З наведеної інформації видно, що межею вказаних періодів (вертикальний пунктир) є відмінність в змінах температури колошника і периферії, а також складових колошникового газу, зокрема CO і

CO_2 . На момент закінчення задувального періоду спостерігається характерний перелом на кривих — температури зростатимуть, а вміст CO і CO_2 буде стабілізуватись.

Зважаючи на можливу універсальність рекомендації Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАН України) щодо нарощування витрати дуття в роздувальному періоді, а саме по 30—35 $\text{m}^3/\text{год}$ [7] розраховали тривалість цього періоду з урахуванням кінцевої мети — досягнення витрати дуття в розмірі двох корисних об'ємів доменної печі за хвилину, як було запропоновано авторами [5]. Початковим рівнем витрати дуття в роздувальному періоді також прийнята рекомендація [7], згідно з якою він становить один корисний об'єм печі ($V_{\text{кор}}$) за хвилину.

Дані, наведені в таблиці 3, свідчать про те, що за приведених вище умов тривалість роздувального періоду суттєво залежить від розмірів печі, а рекомендація відносно досягнення витрати дуття в кількості $\approx 2V_{\text{кор}}$ на 5—6 добу після задування може стосуватися лише печей об'ємом 3000 і 5000 m^3 .

На жаль, практика задування доменних печей України в новому столітті не потребувала пришвидшення процесів задування і роздування у зв'язку із рядом причин і здійснювалася за класичною регламентацією. Тому виникла необхідність розгляду результатів швидкісного роздування печі, отриманих в практиці дальнього зарубіжжя.

Особливістю задувки доменних печей середнього об'єму на якісних коксі і залізрудних матеріалах є швидкий перехід від задувального періоду до проєктних параметрів газодуттєвого режиму з початку роздувального періоду (рис. 4). Так, за графіком задувки ступінчасті узгоджені підйоми витрати дуття і тиску газу на колошнику планують тільки в першій половині задувального періоду, тобто в перші 12 год після пуску печі (рис. 4, а, б). Надалі приблизно за період, що дорівнює одній добі, витрату дуття і тиск на колошнику рівномірно піднімають до робочого рівня газодуттєвого режиму роботи печі.

Фактичні дані про зміну витрати дуття і тиску газу на колошнику суттєво відрізняються від запланованих показників внаслідок, як видно з рис. 4, а через недостатню підготовку печі і обладнання перед задувкою. Тому вихід на робочі параметри відбувся не на другу добу після подавання дуття в піч, а лише на п'яту. Ускладнення в сході шихти, викликані періодичними зменшеннями витрати дуття в роздувальний період, обумовили різницю в темпах нарощування температури дуття в задувальний (+ 8,4 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$) і роздувальний (+ 1,6 $^{\circ}\text{C}/\text{год}$) періоди [8].

Наявність керамічного стакану в горні дозволила відмовитись від операції заграфічування метало-приймача і тривалої роботи на ливарному чавуні. Так, за даними [8], задувальна шихта була розрахована на отримання переробного чавуну вже на 40-й годині після пуску печі, тобто вже на другу добу від початку експлуатації, що звісно не могло не відбитися на якості чавуну за вмістом сірки, який в роздувальному періоді був достатньо високим з тенденцією поступо-

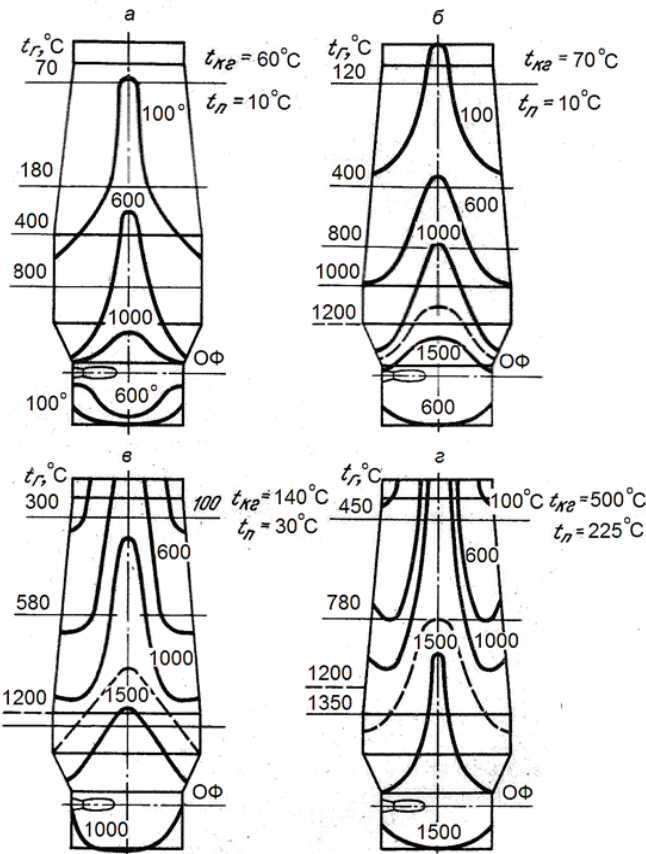


Рис. 2. Схема переміщення температурних полів в задувальний (а — в) і на початку роздувального (г) періодів під час задування доменної печі №5 НЛМК об'ємом 3200 м³: а — 8 год.; б — 10 год.; в — 14 год.; г — 34 год.; $t_{кз}$ і t_n — середні температури колошничкового газу і периферії відповідно; t_g — середні температури на горизонті (умовно)

Джерело: за даними М. Я. Остроухова і Л. Я. Шпарбера, 1977 р. вого зменшення з 0,14 до 0,04 %.

Швидкий темп роздувки спостерігався на ДП № 2 фірми Dragon Steel Corporation, Тайвань. Піч об'ємом 3274 м³ з діаметром горна 12 м була заду-та 06.03.2013 р. За повідомленням фірми Siemens VAI [9] вихід на проєкtnу продуктивність цієї печі у 2,18 т/м³.доб був досягнутий на кінець роздувального періоду тривалістю 13 діб.

Розглянуті дані свідчать про те, що при необхідності форсованого ведення роздувального періоду, у випадку обладнання горна керамічним стаканом, час виведення печі на проєктні показники газодуттєвого режиму може бути суттєво скороченим, як за рахунок відмови від тривалого періоду роботи на ливарний чавун, так і за рахунок прискореного і узгодженого підняття витрати дуття і тиску газу на колошнику зі збереженням рівного ходу печі.

Зрозуміло, що період визначеної тривалості роботи печі на ливарний чавун повинен зберігатися з метою заграфічування металоприймача, якщо піч має вуглецевистий захист лещаді і стін горна або комбінований захист, коли у вуглецевистому стакані обладнується керамічне днище [10]. При цьому важливо уникати виплавки багатокремнистого чаву-

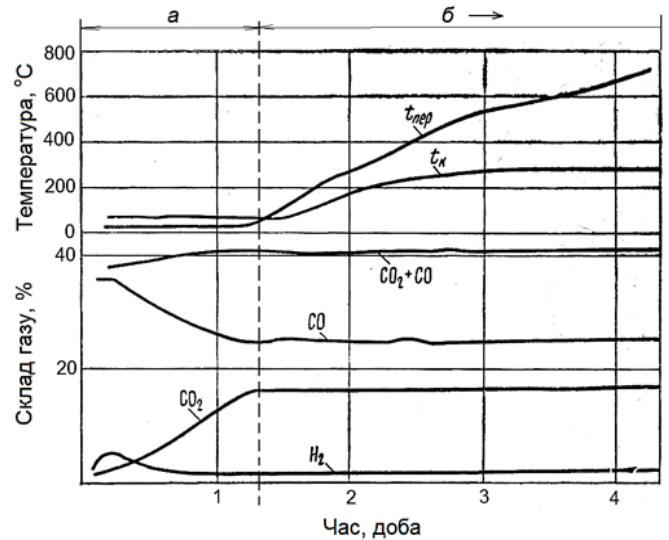


Рис. 3. Розмежування задувального (а) і роздувального (б) періодів задування доменної печі об'ємом 2000 м³ за змінами температур колошника і периферії, а також складу колошничкового газу

Джерело: за даними В. В. Капоруліна зі співробітниками, 1989 р.

ну, оскільки кремній утворює зі залізом більш міцні, ніж карбіди, утворення — силіциди [4], завдяки чому вміст вуглецю в чавуні зі збільшенням вмісту кремнію знижується. Так, ливарний чавун, що містить 3,5 %Si, має у своєму складі до 3,5 %C. Тому для заграфічування стінок горна в роздувальному періоді бажано виплавляти низьокремнистий ливарний чавун, що доцільно також для економії коксу і додаткового палива, а також для підвищення продуктивності печі. Так, при роздувці доменної печі об'ємом 5500 м³ (В. А. Улахович зі співавторами, 1986 р.), в період між 16 та 23 добою після задування, середній вміст кремнію в чавуні склав 1,8 %. В ІЧМ вважають [1], що робота печі в роздувальному періоді на ливарному чавуні повинна тривати 10—20 діб.

Окремого розгляду заслуговує питання про період освоєння потужності доменної печі. Перед початком експлуатації печі збільшеного об'єму або оснащеної новим обладнанням завжди є частка невизначеності в установленні проєктних або планових показників, які розраховуються на основі попереднього досвіду. Прикладом невідповідності планових і фактично досягнутих показників роботи може бути практика експлуатації ДП № 6 НЛМК, вперше в колишньому СРСР оснащеної безконусним засипним пристроєм (БЗП) системи Rawl Wurth (М. Д. Жембус зі співавторами, 1982 р.). Спираючись на досвід роботи ДП № 5 такого ж об'єму (3200 м³) і того ж комбінату, обладнаного конусним засипним пристроєм і скіповим підйомом, проєктна продуктивність ДП № 6 була визначена у 6163 т/доб. Пошук раціональних режимів завантаження за допомогою БЗП і організації газового потоку обумовив поступове наближення показників до проєктного рівня і лише на шостому місяці після задування фактична продуктивність (6399 т/доб) перевищила планову.

В спеціальній літературі (Б. І. Ашпін зі співробітниками, 1982 р., В. М. Беляков зі співавторами,

Розрахункова тривалість роздувального періоду для лінійки доменних печей, що працювали на підприємствах України

Корисний об'єм печі, м³	1033	1386	1513	1719	2000	2300	2700	3000	5000
Тривалість роздувки*: у 30 м³/год чисельник — годин знаменник — діб	34.4 1,43	46.2 1,92	50.4 2,10	57.3 2,39	66.7 2,78	76.7 3,19	90.0 3,75	100.0 4,17	166.7 6,94
у 35 м³/год чисельник — годин знаменник — діб	29.5 1,23	39.6 1,65	43.2 1,80	49.1 2,04	57.1 2,38	65.7 2,74	77.1 3,21	85.7 3,57	142.8 5,95

* при темпі нарощування витрати дуття

Джерело: рекомендації ІЧМ [7]

1991 р.) повідомлялось про різні строки освоєння потужності від чотирьох місяців до 30 діб. Зрозуміло, що у випадках попереднього відпрацювання режимів ведення доменної печі і надійній роботі допоміжного обладнання, тривалість періоду освоєння може збігатися з тривалістю періоду повного прогрівання лежачі зі стабілізацією в ній теплового режиму біля 25 діб з моменту пуску печі [5].

Обговорення результатів

Щодо рекомендації [7] скорочувати періоди роздувки — освоєння потужності доменних печей великого об'єму до 1,0—1,5 місяця є певні застереження. Так, доменна піч великого об'єму дуже високовартісний агрегат і за сучасними вимогами повинна мати кампанію більше 20 років [11]. Тривалість кампанії залежить переважно від стану горна і лежачі — конструкцій печі, що працюють в найбільш критичних умовах експлуатації. Тому всі операції виведення потужних печей на проєктний рівень роботи повинні відбуватися під суворим контролем стану металоприймача.

Позитивним прикладом поступового періоду освоєння потужності є досвід роботи ДП № 1 фірми Shagang Group, Китай, корисний об'ємом 5800 м³ і діаметром горна 15,3 м [11]. Лежачі і горн цієї печі, задутої 20.10.2009 р., обладнано 492 термопарами для постійного контролю в процесі обережного підйому газодуттєвих параметрів. За три місяці після пуску печі у січні 2010 р. надмірний тиск на колошнику досяг відмітки 250 кПа, а продуктивність досягла 2,0 т/м³.доб. Надалі руйнування повітропроводу гарячого дуття змусило перейти на низькі параметри дуття і лише після ремонту повітропроводу в травні 2010 р. вийшли на проєктні параметри 270 кПа надмірних на колошнику і 2,3 т/м³.доб продуктивності. Температурний режим огороження горна і лежачі був на стабільному рівні весь термін переходу на стаціонарний режим.

В якості негативного прикладу слід віднести надшвидкісний роздувальний період ДП № 8 Криворіжсталі в червні 1971 року після капітального ремонту I розряду. За повідомленням Б. М. Жеребіна (1980 р.) основною причиною бокового прориву горна цієї печі у вересні 1971 р. було наступне:

1) надмірний тиск на колошнику 190 кПа був досягнутий на шостий день роботи печі після пуску;

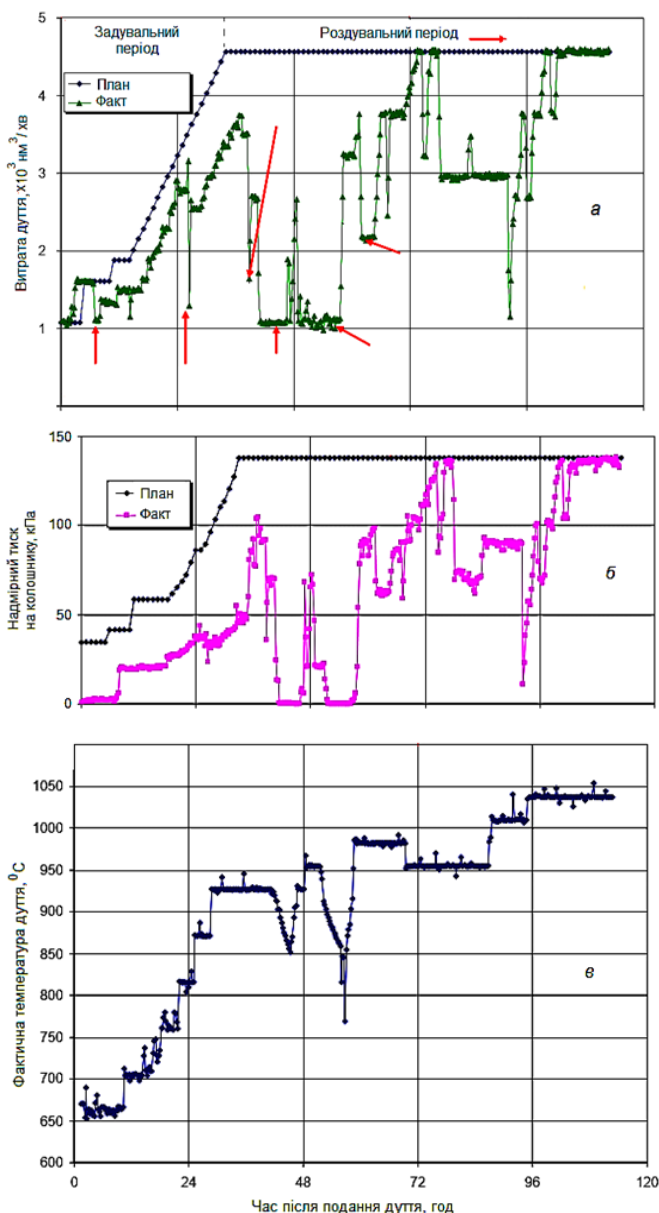


Рис. 4. Зміна планових і фактичних параметрів задувального і роздувального періодів роботи доменної печі № 7 робочим об'ємом 2366 м³ фірми ESSAR STEEL ALGOMA (Канада) [8]: стрілками на рис. 4, а показані зменшення витрати дуття, обумовлені відмовами конструкцій і обладнання доменної печі в пусковий період

Джерело: за даними М. Я. Остроухова і Л. Я. Шпарбера, 1977 р.

2) надмірний тиск дуття на фурмах склав 275 кПа вже на четвертий день, а температура дуття на п'ятий день роботи складала 1100 °С;

3) на п'ятий день роботи продуктивність печі склала 1,62 т/м³.добу, що для тогочасних сировинних умов було високим показником. До речі в 1990 році, ще в умовах планової економіки, продуктивність ДП № 8 складала 1,74 т/м³.добу, коли організація роботи печі і стан її огороження були на більш високому рівні;

4) ливарний чавун після задування виплавляли тільки неповних три дні, що при тодішній низькій якості вуглецевистих вогнетривів горна усунуло операції заграфічування і утворення гарнісажу.

Внаслідок поспішного виведення ДП № 8 об'ємом 2700 м³ на робочі параметри (тоді піч належала до найпотужніших печей світу) через 1,5 місяці після задування глибина ями в центрі лещади при проєктній висоті зумпфу 1196 мм склала 2296 мм, а ще через 1,5 місяці внаслідок прогресуючого розпалу в процесі подальшої роботи у форсованому режимі стався прорив горна з виходом 600 т розплавів і суттєвими руйнуваннями допоміжних конструкцій печі.

На нашу думку, головною причиною аварій при задуванні ДП № 8 була критична недостатність засобів виміру стану стін горна і лещади, яка не дозволила технологічному персоналу цеху і печі своєчасно відступити з темпом форсування печі в пусковий період.

Висновки

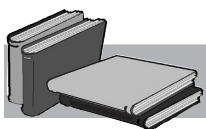
На основі аналізу дослідних даних, отриманих під час початку кампанії доменних печей, сформульовані задачі задування, роздування і виходу на проєктний рівень експлуатації агрегатів. Показано, що задачею задувального періоду є утворення первинної зони когезії і встановлення п'ятизонної структури стовпа шихти, притаманної стаціонарному режиму ведення

доменної плавки. Задачею роздувального періоду і суміжного за ним періоду освоєння потужності печі, існування якого в деяких випадках є доцільним, є досягнення робочого рівня газодуттьових параметрів, перш за все за витратою і температурою дуття разом з тиском газів в робочому просторі печі.

Встановлено, що завершенням задувального і початком роздувального періодів є вимушене зменшення витрати дуття в результаті утворення зони когезії в стовпі шихти і зростання його опору. Показано, що візуальною межею вказаних періодів є характерні переломи на кривих зміни в часі температур колошниковога газу і вмісту в ньому CO₂ і CO — температура починає зростати до робочого рівня, а вміст газів стабілізується.

Тривалість роздувального періоду залежить від багатьох факторів, серед яких визначальними є конструкція футерівки горна і об'єм доменної печі. Вуглецевий захист лещади і стін горна вимагає продовження періоду роботи на ливарному чавуні до 10—20 діб. За наявності керамічного стакану в горні і за умов підтримання однакових темпів нарощування витрати дуття в межах 30—35 м³/год тривалість роздувального періоду зростає з 1,2—1,4 доби для печі об'ємом 1033 м³ до 6—6,9 діб для печі 5000 м³.

Зважаючи на високу вартість доменних печей великого об'єму і тенденції на зростання тривалості їх кампанії, періоди роздування — освоєння слід робити більш тривалими. Оскільки при періоді освоєння потужності можуть досягатися високі показники плавки запропоновано вважати умовно стаціонарним режимом початку кампанії доменних печей великого об'єму відносно тривалий (3—4 місяці) період освоєння проєктної потужності, при якому умовою кожного наступного підвищення газодуттьових параметрів є збереження стабільності температурного режиму футерівки горна, зумпфу і лещади.

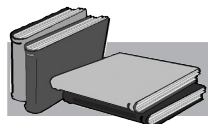


ЛІТЕРАТУРА

1. Большаков В. И., Можаренко Н.М., Тубольцев Л. Г., Голубых Г. Н. Научно-технические решения по обеспечению безопасной работы доменных печей в стационарных и переходных режимах. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2008. Вып. 17. С. 283—300.
2. Большаков В. И., Можаренко Н. М., Муравьева И. Г. Обеспечение безопасности и сохранности футеровки доменных печей при выдувке и задувке. *Металл и литье Украины*. 2009. № 7—8. С. 75—80.
3. Плискановский С. Т., Полтавец В. В. Оборудование и эксплуатация доменных печей. Днепропетровск: Пороги, 2004. 495 с.
4. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. Металлургия чугуна. Київ: Вища школа, 1988. 351 с.
5. Большаков В. И., Голубых Г. Н., Можаренко Н. М., Тубольцев Л. Г. Промышленная безопасность доменных печей при задувке и выдувке. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2007. Вып. 14. С. 290—309.
6. Кузнецов А. М., Коваленко А. Г., Зубенко А. В. и др. Основные положения задувок доменных печей после остановок различной продолжительности. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2015. Вып. 30. С. 90—109.
7. Большаков В. И., Можаренко Н. М., Иванча Н. Г. и др. Технологическое обоснование рациональных приемов задувки доменных печей большого и среднего объемов. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2009. Вып. 20. С. 3—10.

8. Jones L., Vanmarrum D., Tuomi J. et al. Successful Blow-in of Essar Steel Algoma's Blast Furnace 7. Technical contribution to the 3rd International Meeting on Ironmaking, September 22—26, 2008. Sao Luis City — Maranhao State — Brazil. P. 1357—1368.
9. Беберл М., Чермак К., Ферингер Э. и др. Ввод в эксплуатацию новых агломерационных фабрик и доменных печей на заводе компании Dragon Steel. *Металлургическое производство и технология*. 2014. № 1. С. 6—14.
10. Крячко Г. Ю., Сігарьов Є. М. Конструкції металургійних агрегатів. Частина 1. Конструкції доменних печей. Монографія. Кам'янське: ДДТУ, 2023. 275 с.
11. Лиу Д., Ванг В., Фанг Й. и др. Характеристики керамического стакана и углеродистой футеровки горна в доменной печи объемом 5800 м³. *Инженерные решения*. 2012. № 1. С. 2—5.

Надійшла 20.05.2024



REFERENCES

1. Bolshakov, V. I., Mozhareno, N. M., Tuboltsev, L. G., & Golubih, G. N. (2008). Nauchno-tehnicheskie resheniya po obespecheniyu bezopasnoy raboty domennykh pechej v statsionarnykh i perehodnykh rezhimakh [Scientific and technical solutions to ensure the safe operation of blast furnaces in stationary and transient modes]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (17), 283—300 [in Russian].
2. Bolshakov, V. I., Mozhareno, N. M., & Muravieva, I. G. (2009). Obespechenie bezopasnosti i sokhrannosti futerovki domennykh pechej pri vydavke i zaduvke [Providing safety and safe keeping of blast furnaces lining of at blow-out and blowing in]. *Metal and Casting of Ukraine*, (7—8), 75—80 [in Russian].
3. Pliskanovskiy, S. T., & Poltavets, V. V. (2004). Oborudovanie i ekspluatatsiya domennykh pechej [Equipment and operation of blast furnaces]. Dnipropetrovsk: Porogi [in Russian].
4. Efimenko, G. G., Gimmelfarb, A. A., & Levchenko, V. E. (1988). Metallurgiya chuguna [Iron metallurgy]. Kyiv: Vyshcha shkola [in Russian].
5. Bolshakov, V. I., Golubih, G. N., Mozhareno, N. M., & Tuboltsev, L. G. (2007). Promyshlennaya bezopasnost domennykh pechej pri zaduvke i vydavke [Industrial safety of blast furnaces during blowing and blowing]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (14), 290—309 [in Russian].
6. Kuzneysov, A. M., Kovalenko, A. G., Zubenko, A. V. et al. (2015). Osnovnye polozeniya zaduvok domennykh pechej posle ostanovok razlichnoj prodolzhitelnosti [The main provisions of the blowers of blast furnaces after shutdowns of various durations]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (30), 90—109 [in Russian].
7. Bolshakov, V. I., Mozhareno, N. M., Ivancha, N. G. et al. (2009). Tekhnologicheskoe obosnovanie racionalnykh priemov zaduvki domennykh pechej bolshogo i srednego obemov [Technological justification of rational methods of blowing blast furnaces of large and medium volumes]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (20), 3—10 [in Russian].
8. Jones, L., Vanmarrum, D., Tuomi, J. et al. (2008). Successful Blow-in of Essar Steel Algoma's Blast Furnace 7. *Technical contribution to the 3rd International Meeting on Ironmaking*, September 22—26, Sao Luis City — Maranhao State, Brazil, 1357—1368.
9. Beberl, M., Chermack, K., Feringer, E. et al. (2014). Vvod v ekspluatatsiyu novykh aglomeratsionnykh fabrik i domennykh pechej na zavode kompanii Dragon Steel [Commissioning of new agglomeration factories and blast furnaces at the Dragon Steel plant]. *Metallurgical Production and Technology*, (1), 6—14 [in Russian].
10. Kryachko, G. Yu., & Sigarev, E.N. (2023). *Konstruksii metalurhiinykh ahrehativ. Chastyna 1. Konstruksii domennykh pechei. Monohrafiia* [Designs of metallurgical units. Part 1. Designs of blast furnaces. Monograph]. Kamianske: DDTU [in Ukrainian].
11. Liu, D., Wang, V., Fang, Y. et al. (2012). *Harakteristiki keramicheskogo stakana i uglerodistoj futerovki gorna v domennoj pechi obemom 5800 m³* [Characteristics of a ceramic cup and carbon lining of a furnace in a blast furnace by volume 5800 m³]. *Engineering solutions*, (1), 2—5 [in Russian].

Received 20.05.2024

Summary

G.Yu. Kryachko, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metallurgy named after Professor V. I. Loginov, e-mail: krachkogennadij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>

E.M. Sigarev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Metallurgy named after Professor V. I. Loginov e-mail: en_sigarev@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

Dniprovsky State Technical University (Kamianske, Ukraine)

Unstationary transient modes operation of blast furnaces in the start-up period after construction or reconstruction

The purpose of the presented work is to determine tasks and characteristic features of three periods transition of blast furnaces (BF) from start-up to stationary mode of the smelting, namely blowing, blowing and development of the furnace capacity. It is shown that task of the blowing period is the formation of primary zone of the cohesion and establishment of five-zone column structure of the charge inherent in the stationary mode of blast furnace melting. The task of adjacent blowing and development of the furnace power periods is to achieve the working level of gas blowing parameters – flow rate and blowing temperature together with increased pressure of gases in working space of the furnace. It is shown that completion of the blowing and beginning of the blowing periods is a forced reduction blowing flow rate as a result of the formation of a cohesion zone in column of charge and an increase in its resistance. Visually, the boundary of these periods is characterized by breaks in the curves of changes in furnace gas temperatures and CO and CO₂ content over time – the temperature increases after break, and gas content stabilizes at certain levels.

It was established that the recommendation to increase the blowing flow in the blowing period at a rate of 30–35 m³/h is not universal, as it does not take into account the dimensions of the blast furnace. It is shown that at the initial relative flow in the inflation period of $1.0 V_d / V_{cor}$ min with an inflation rate of 35 m³/h, the duration of the blowing period of the 1033 m³ BF will be 1.2 days, and the 5000 m³ BF will last 6 days. That is, another well-known recommendation regarding the same duration of the inflation period of 5–6 days needs correction.

The modern practice of construction and reconstruction of blast furnaces is aimed at the use of a ceramic glass in the furnace and bottom, therefore, based on the experience of far abroad, the duration of the blowing period can be shortened due to the period of melting of cast iron.

Furnaces of large volume require an extended period of power development, in which the condition for each subsequent increase in gas pressure parameters is to maintain stability temperature regime of lining of the furnace, sump and bottom.

Keywords

blast furnace; blowing; development of power; duration; inflating; inflation rate; transition modes.