

ГАЗОДУТТЬОВИЙ РЕЖИМ ЗАДУВАЛЬНОГО ПЕРІОДУ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

Анотація. Метою роботи є узагальнення досвіду варіювання газодуттєвих параметрів в задувальних періодах доменних печей і розробка рекомендацій для подальшого удосконалення газодинамічного режиму задування. Систематизовано дані про зміну газодуттєвого режиму задувальних періодів доменних печей різного об'єму у відмінних сировинно-експлуатаційних умовах. Встановлено, що при меншому темпі нарощування витрати дуття в задувальному періоді вища температура дуття в ньому сприяє ускладненню газодинаміки доменного процесу, про що свідчать одночасні зростання тиску дуття, перепаду тисків і тиску газу на колошнику, як компенсатора цих ускладнень. Запропоновано в межах добового задувального періоду з виходом на кінцеву витрату дуття до $1,0 V_d/V_{кор} \cdot XВ$ в другому напівперіоді задування збільшувати кількість разових добавок дуття зі зменшенням їх розміру до меж реального застосування. Обґрунтовано надання переваг збільшенню витрати дуття перед збільшенням його температури в задувальному періоді, оскільки обидва параметри справляють конкурентний вплив на газодинаміку доменного процесу при суттєво різному впливі на структурування стовпа шихти. Доведено, що поширена рекомендація задувати піч на всіх фурмах робочого діаметру не відповідає технології ведення задувального періоду зважаючи на низьку загальну початкову витрату дуття для створення активних фурменних вогнищ. Залучення запропонованих рекомендацій в практику пуску доменних печей дасть змогу вийти на заплановані параметри газодинамічного режиму в короткий термін задувального періоду.

Ключові слова: газодуттєві параметри, задувальний період, доменна піч, темп нарощування, витрати дуття, рекомендації, технологія задування.

Посилання для цитування: Крячко Г. Ю., Сігарьов Є. М. Газодуттєвий режим задування доменних печей // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 39-58. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-39-58>



Вступ. Режими дуття і газу в робочому просторі печі в пусковому періоді є важливим чинником виведення агрегату на нормативні показники. Неоднозначність в розумінні термінів, пов'язаних з пуском доменної печі в експлуатацію заважає аналізу і теоретичному обґрунтуванні тих чи інших прийомів технології задування печей. На плутанину у визначенні поняття «задувка» вперше звернули увагу В. В. Капорулін зі співавторами (1989 р.). Особливо це стосується питання про визначення і розмежування задувального і роздувального періодів. Так, деякі фахівці, наприклад М. Я. Остроухов та Л. Я. Шпарбер (1975 р.), Т. Р. Галіуллін зі співавторами (2008 р.) під пусковим періодом розуміли роздувальний не відокремлюючи задувальний.

Відсутність розмежування в часі задувального і роздувального періодів ставить під сумнів коректність порівняння показників задувань різних доменних печей, як це було здійснено, наприклад в роботі О.В. Ростовського зі співавторами (1998 р.).

Б. М. Жеребін в монографії (1980 р.) розмежував пусковий період на два характерні – задувальний від моменту подавання дуття в піч до потемніння коксу на фурмах після відступу від початкових витрати і тиску дуття і роздувального, що слідував за задувальним, при якому починали збільшувати витрату дуття.

Авторський колектив на чолі з В. В. Капоруліним (1989 р.) розширив межі задувального періоду. Дослідники вважали, що «задувальний період – це пусковий період роботи доменної печі після будівництва, капітального ремонту або зупинки, котрий починається зі загорання коксу після подавання дуття в піч, включає в себе перші випуски продуктів плавки і закінчується встановленням в робочому просторі печі температурного поля, характерного для нормально працюючої печі».

З останнім визначенням можна погодитись лише частково. Перше зауваження стосується фіксації моменту початку задування печі. Оскільки гаряче дуття з моменту потрапляння в піч гріє шихту – це означає початок процесу виведення системи з рівноваги, тобто підготовки її до металургійних перетворень. Тому енциклопедичне визначення задувки (1982 р.), як початок подавання дуття в доменну піч, котрий означає пуск печі в експлуатацію, не заслуговує критики.

Друге, більш суттєве зауваження, стосується кінцевої мети задувального періоду. На наш погляд кінцевою метою цього періоду повинно бути утворення в першому наближенні робочої структури стовпа шихти, яка визначає режим взаємодії газів і шихти, результатом якого і буде температурний профіль, притаманний доменному процесу.

Тому, на наш погляд, задувальним слід вважати період з моменту подавання гарячого дуття в піч протягом якого відбувається формування п'ятизонної структури стовпа шихти, характерної для діючого доменного процесу. Обґрунтуванням цього твердження є наступне. На момент подавання дуття в доменну піч стовп шихти при задуванні без дров'яного прошарку в горні від лещаді до колошника являє собою середовище сипучих матеріалів, розподілених відносно проекту розміщення задувальної шихти. В процесі горіння і вигорання коксу перед повітряними фурмами відбувається поступова зміна структури нульової (кокової) шихти. З утворенням прифурменних порожнин – зони 1 (рис. 1, а) починає формуватися коксова насадка, або зона малорухомого коксу в горні і заплечиках – зона 2 (рис. 1, б) тривало існує утворення, яке при нормальній роботі печі має газопроникність і дренажну здатність.

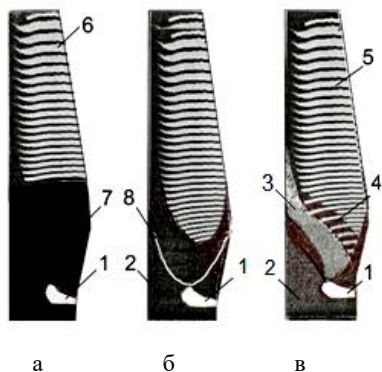


Рисунок 1 - Схема перетворень в стовпі шихтових матеріалів під час задувального періоду доменної печі: 1 – прифурменна порожнина; 2 – коксова насадка; 3 – зона активного руху коксу; 4 – зона когезії; 5 – зона сипучого стану залізорудних матеріалів; 6 – залізорудні матеріали; 7 – кокс; 8 – умовна траєкторія руху коксу до прифурменних порожнин

В процесі задування над прифурменними порожнинами виникає зона активного руху коксу – зона 3 (рис. 1, в). З опусканням униз перших прошарків залізорудних матеріалів при температурах вище 1000 °С починає утворюватися зона когезії – четверта характерна зона (рис. 1, в) з відповідною трансформацією зони рухомого коксу оскільки дещо змінюється джерело постачання коксу в останню зону. Остання по висоті печі п'ята зона між зоною когезії внизу і рівнем засипу на колошнику характеризується знаходженням залізорудних матеріалів в сипучому стані. Проявом утворення робочої зональності доменного процесу в задувальний період є поява перших розплавів чавуну і шлаку в горні доменної печі.

Результати дослідження. Співставлення відомих підходів для вибору газодуттьових параметрів задувального періоду представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Вихідні дані для побудови графіків зміни газодуттвального режиму задувального періоду доменних печей

Параметр	Рекомендації, номер за порядком			НЛМК, рф. ³																				
	Всесоюзної наради «Експлуатація доменних печей», 1946 р.	Монографії «Експлуатація доменних печей» ¹	Технолог-доменщик. Довідкове і методичне керівництво ²																					
Фурми	1 Всі відкриті зі звужувальними кільцями	2 В момент подавання дуття залишену у фурмах глину видаляють або пробивають в ній отвори	3 Швидкості струменя газу із вихідного перетину фурм повинні бути вище, ніж при нормальній роботі печі на 10-20% (але на менше 200 м/с)	4 Всі відкриті, звичайного діаметра																				
Дуття: витрата, об'ємів печі за хвилину	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні	Приблизне відношення об'єму дуття V_d до об'єму печі $V_{кор}$ за хвилину в першу добу (по годинам для печей різного об'єму): <table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td>години роботи</td> <td>1</td> <td>12</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>об'єм печі, м³</td> <td>2000</td> <td>0,2</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3200</td> <td>0,3</td> <td>0,6</td> </tr> <tr> <td></td> <td>5000</td> <td>0,3</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td>1,0</td> </tr> </table>	години роботи	1	12	24	об'єм печі, м ³	2000	0,2	0,5		3200	0,3	0,6		5000	0,3	0,7				1,0	Зазвичай припустима хвилинна витрата гарячого дуття дорівнює одному об'єму печі в перші години задувки і поступово зростає услід за підвищенням рудного навантаження в стовпі ШИХТИ
години роботи	1	12	24																					
об'єм печі, м ³	2000	0,2	0,5																					
	3200	0,3	0,6																					
	5000	0,3	0,7																					
			1,0																					
Темп нарощування витрати дуття $V_d/V_{кор} \cdot хв$ / год	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні	<table border="1" style="margin-left: 20px;"> <tr> <td></td> <td>2000</td> <td>-</td> <td>0,025</td> </tr> <tr> <td></td> <td>3200</td> <td>-</td> <td>0,025</td> </tr> <tr> <td></td> <td>5000</td> <td>-</td> <td>0,029</td> </tr> </table>		2000	-	0,025		3200	-	0,025		5000	-	0,029	Рекомендації відсутні								
	2000	-	0,025																					
	3200	-	0,025																					
	5000	-	0,029																					

Продовження таблиці 1

	1	2	3	4
Параметр				
Температура	На початку не нижче 600 °С, а затім в залежності від нагріву горна і ходу печі	750 – 800 °С	На початку 750 °С. Після загорання коксу на фурмах температуру дуття поступово знижують до 600 °С	Максимально висока, зазвичай 750 - 1000 °С
Тиск	Рекомендації відсутні	На початку надмірних 70 – 80 кПа, Через 30 – 40 хв. відступ до надмірних 25 – 30 кПа	На початку надмірних 70 – 100 кПа. Після загорання коксу на всіх фурмах і продування всієї газової мережі тиск знижують до надмірних 20 – 30 кПа	Рекомендації відсутні
Подання природного газу	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні	В першій годині після запалювання коксу
Підвищення тиску газу на колошнику	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні

¹ М.Я. Остроухов, Л.Я. Шпарфер, 1975 р.

² Ю.П. Волков зі співавторами, 1986 р.

³ В.М. Григор'єв зі співавторами, 1999 р.

Продовження таблиці 1

Параметр	Рекомендації, номер за порядком	
	ГЧМ [2], 2008 р. 5	ГЧМ [3], «Северсталь», рф, 2009 р. 6
Фурми	Задують пч кризь всі фурми. На деяких заводах у фурми в першій період задувки вставляють керамічні кільця з метою відсунути фокус горіння від стін ⁴	Швидкість витіку дуття не менш 1,50 – 1,60 м/с
Дуття: витрата, об'ємів печі за хвилину	Початкова витрата дуття в м ³ /хв чисельно дорівнює приблизно половині об'єму печі	Задуювання печі слід виконувати з початковою витратою дуття 0,5 – 0,6 об'ємів печі за хвилину
Темп нарощування витрати дуття $\frac{V_d/V_{кор} \cdot хв}{год}$		Початком періоду роздувки * печі до видачі першого чавуну поступово довести витрату дуття до 0,9 – 1,0 м ³ /м ³ хв об'єму печі, тобто темп $\frac{V_d/V_{кор} \cdot хв}{год}$ 0,017
Температура	В момент подачі в горн становить 700 – 800 °С	При задуюванні 700 – 750 °С, після запалювання коксу знизити до 450 – 550 °С, затим повільно підвищується відповідно прийнятого графіка роздувки *

Продовження табл. 1

Параметр	5	6	7
Тиск	Через 20 – 30 хв. після задувки надмірний тиск встановлюється в межах надмірних 15 – 30 кПа	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні
Подавання природного газу	Рекомендації відсутні	Природний газ доцільно подавати в піч через 8 – 10 годин після задувки печі	Для умов України не раніш, ніж через 12 годин після задувки. Зазвичай подача природного газу здійснюється після першого випуску
Підвищення тиску газу на колошнику	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні	Рекомендації відсутні

⁴ Те ж досягається закриттям частини фурм, що часто практикується в колишньому СНД і Японії

* термін збережено відповідно оригіналу джерела

Не важко бачити існування невизначеності у виборі діаметра фурм в задувальний період. Зовсім неясно, що рекомендували автори (табл. 1, колонка 2) – пуск печі на всіх фурмах звичайного діаметра («залишену у фурмах глину видаляють») або на всіх фурмах зменшеного діаметру («пробивають в глині отвори»).

Не уникло протиріччя відоме видання (табл. 1, колонка 3), в якому рекомендувалося при нормальній підготовці задувку проводити на всіх фурмах зі швидкістю витоку дуття > 200 м/с. Зовсім незрозуміло, як досягти таку швидкість дуття при дуже обмеженій його витраті $0,2-0,3 V_d/V_{\text{кор}} \cdot \text{хв}$, яку до речі, рекомендували ті ж самі автори. даними згаданого видання в 1983 році з 60-ти доменних печей колишнього СРСР тільки 30% працювали в робочому режимі зі швидкістю витоку дуття > 200 м/с.

Більш зважені підходи працівників ІЧМ [2] (табл. 1, колонка 5). Вони рекомендують задувати піч крізь всі фурми, однак при цьому посилаються на власний досвід і доменщиків Японії, де практикується закриття частини фурм, або зменшення їх робочого діаметра. Друге і наступне збільшення витрати дуття в задувальному періоді автори [2] рекомендують проводити кожні 3-4 години на $50-100 \text{ м}^3/\text{хв}$ в залежності від теплового стану і ходу печі. Звідси виникає закономірне питання про універсальність цих часової і кількісної рекомендацій для задування доменних печей різного об'єму.

Не можна погодитись з рекомендацією закриття 15-25% повітряних фурм через 12 годин після пуску печі [4] (табл. 1, колонка 7) оскільки зупинка печі в процесі формування характерної зональності доменного процесу, а саме на початку утворення первинної зони когезії є небажаним заходом. Автори [4] також рекомендують при більш інтенсивному темпі роздувки в залежності від прийнятого ступеня форсування печі зупиняти її через добу для закриття повітряних фурм, вочевидь для досягнення швидкості витоку дуття 175 м/с і більше. На наш погляд зупинка печі через добу на закриття фурм також не є доцільною, тому що погіршує умови переходу задувального періоду до роздувального.

Метою роботи є узагальнення досвіду варіювання газодуттєвих параметрів задувальних періодів доменних печей і розробка рекомендацій для подальшого удосконалення газодинамічного режиму задування.

Для перевірки обґрунтованості наведених в табл. 1 рекомендацій використали практичні дані про результати задувального періоду доменних печей після будівництва і капітальних ремонтів різних категорій. Напрацювання досвіду задування доменних печей в новій історії розвитку доменного виробництва почалося на початку другої

половини ХХ ст. На рис. 2 показана динаміка зміни газодуттєвих параметрів двох доменних печей з різними підходами фахівців у встановленні режиму задувального періоду.

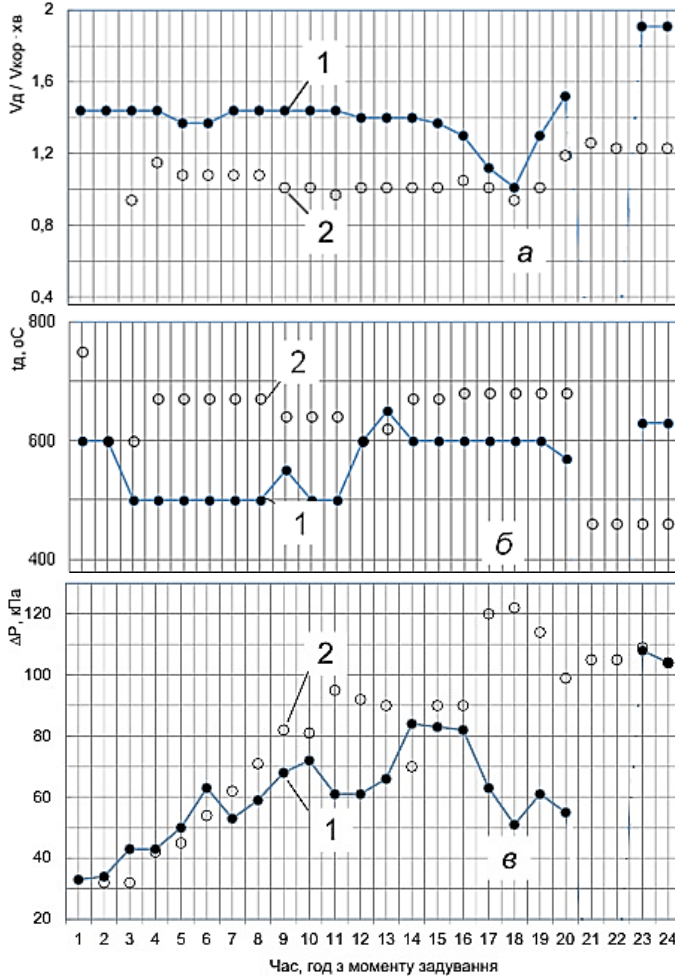


Рисунок 2 – Зміна параметрів газодуттєвого режиму в задувальні періоди доменних печей об'ємом 1386 м^3 з низьким тиском газів на колошнику за даними довідника «Доменное производство» Т.2 (1963 р.): а – відносна витрата дуття; б – температура дуття; в – загальний перепад тисків кільцева труба – колошник; 1 – задувка 24.10.1952; 2 – задувка 11.02.1954

Під впливом рішень всесоюзної наради доменщиків 1946 р. стосовно орієнтації на підтримання хвилинної витрати дуття в межах двох об'ємів печі задування ДП об'ємом 1386 м³ 24.10.1952 р. почали з витрати 1,44 $V_d/V_{кор} \cdot хв$ і довели до 1,91 $V_d/V_{кор} \cdot хв$ (рис. 2, а, крива 1). При цьому температуру дуття підтримували в межах 500- 600 °С (рис. 2, б, крива 1). Форсування в задувальному періоді характеризувалося поступовим підйомом перепадів тиску (рис. 2, в, крива 1). Завищена витрата дуття поряд зі завищеним рудно-флюсовим навантаженням призвели до холодного пуску печі, про що свідчив хімічний склад перших продуктів плавки – на четвертому випуску після задування печі вміст кремнію в чавуні склав 0,70 %, сірки 0,18 %, а вміст FeO в шлаку 4,52 %. Для покращення підготовки залізорудних матеріалів перед надходженням у високотемпературні горизонти печі знижували витрату дуття двічі – на 18-у годину після пуску до 1,01 $V_d/V_{кор} \cdot хв$ і в роздувальному періоді на наступну добу з 1,91 до 1,30 $V_d/V_{кор} \cdot хв$.

Урахування негативного досвіду цього задування призвело до суттєвого коректування параметрів дуття у наступному пуску печі 11.02.1954 р. Так, витрату дуття в задувальному періоді зменшили і залишили в межах 0,94- 1,23 $V_d/V_{кор} \cdot хв$ (рис. 2, а, крива 2), а температуру дуття навпаки підвищили (рис. 2, б, крива 2).

При цьому на останній кривій помітно два характерних відступи – перший на початку загорання коксу, а другий теж вимушений внаслідок утворення зони когезії і різкого зростання перепаду тисків (рис. 2, в, крива 2). Помірне в порівнянні з першим прикладом форсування печі дуттям і виважена величина рудно-флюсового навантаження призвели до успішного пуску печі з випуском нормально прогрітих продуктів плавки.

Обидва наведені приклади є хрестоматійними, оскільки ґрунтовно показали, що форсування задувального періоду витратою дуття і його температурою має певні межі, дотримання яких забезпечує рівний хід печі і подальше роздування. Варто зазначити і те, що задування з меншою інтенсивністю за витратою дуття, але з вищою температурою (випадок 2), призвело до більших втрат напору дуття під час утворення первинної зони когезії, а саме близько 18 години після пуску печі (рис. 2, в). Запобіжним заходом для зменшення критичного перепаду тисків було різке зменшення температури дуття з 680 °С до 460-470 °С.

В подальшому впровадження підвищеного тиску газу на колошнику дозволило значно пом'якшити вплив збільшення витрати і температури дуття на перепад тисків в стовпі шихти під час формування його зональності, про що свідчать дані рис. 3. Перший приклад (позначений кривими 1) відносився до задувального періоду

ДП «АрселорМіттал Кривий Ріг» об'ємом 1719 м³ після консервації без видалення козлового чавуну і ремонту II розряду. Другий приклад (позначений кривими 2) відноситься до задувального періоду ДП «ЗСМК» (рф) об'ємом 3000 м³ після відновлювального ремонту протягом 11 діб.

Задача задувального періоду в прикладі ДП 1719 м³ полягала у прискоренні утворення характерної зональності стовпа шихти, для чого при зниженому тиску газу на колошнику (рис. 3, а, крива 1) підтримували суттєву для сучасних умов витрату дуття (рис. 3, б, крива 1), але низьку температуру дуття (рис. 3, в, крива 1). Приймалося до уваги також наявність козлового нижчельоточного чавуну і небажаний вплив дуття підвищеної температури на передчасне його прогрівання.

Задачами задувального періоду ДП 3000 м³, крім основної структуруючої, були також видалення вологи, нанесеної на стінки печі торкрет-маси і проплавлення залишків останньої («відскоку») на видувальной поверхні шихти внизу шахти. Для утворення потужних фурменних вогнищ, задування провели на шести відкритих повітряних фурмах і лише на 24 годину після пуску кількість відкритих фурм довели до 14. Все це обумовило низьку загальну витрату дуття (рис. 3, б, крива 2).

Разом з тим при дуже низькій загальній витраті дуття для печі об'ємом 3000 м³, а саме 250-700 м³/хв, в перші 12 годин задування на скороченій кількості відкритих фурм вдалося збільшити витрату дуття на окрему фурму в межах 42-117 м³/хв, завдяки чому з'явилась можливість створити достатньо потужні фурменні вогнища для виконання головної задачі задувального періоду – створення робочої структури стовпа шихти. Якби ДП №3 «ЗСМК» задували на всіх фурмах (28 фурм), то витрата на кожен протягом перших 12 годин складала б 9-25 м³/хв, що зовсім не відповідає технології задування, оскільки при такій витраті дуття швидкість його витоку з фурми діаметром 160 мм за умов задування ДП №3 становила б лише 15-42 м/с, що в 4-10 разів менше рекомендованих значень [3].

Необхідну концентрацію тепла в горні згаданої печі збільшували за рахунок підйому температури дуття в перші 12 годин після подавання дуття з 500 до 900 °С (рис. 3, в, крива 2).

Можливість збільшення температури дуття на 400 °С за короткий проміжок часу була обумовлена одночасним підвищенням тиску газу на колошнику (рис. 3, а, крива 2). У двох розглянутих прикладах (рис. 3) рівний хід доменних печей в задувальних періодах був досягнутий завдяки підтриманню загального перепаду тисків в межах 30-70 кПа.

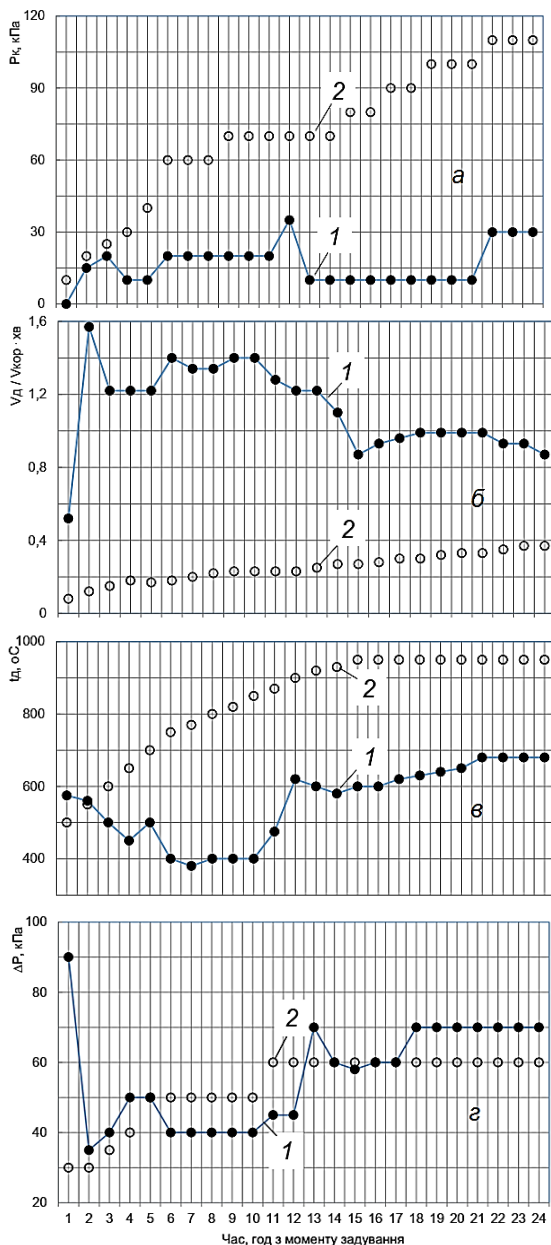


Рисунок 3 - Зміна параметрів газодуттєвого режиму в задувальні періоди доменних печей АМКР об'ємом 1719 м³ і ЗСМК об'ємом 3000 м³ з різними рівнями тиску газів на колошнику за даними [5] і Т.Р. Галіулліна зі співавторами (2008 р.): а – надмірний тиск газів на колошнику, кПа; б – відносна витрата дуття; в – температура дуття; г – загальний перепад тисків; 1 – ДП 1719 м³; 2 – ДП 3000 м³

Узагальнені дані про параметри газодинамічного режиму в задувальні періоди доменних печей, розглянутих на рис. 2 і 3 з додатком інформації про задувальний період печі після ремонту III розряду, представлені в таблиці 2. Про інтенсивність дуття в задувальному періоді свідчить не тільки швидкість нарощування дуття, але й середній його рівень. Темп нарощування витрати дуття в задувальних періодах після ремонтів I і II розрядів знаходився в межах 0,012- 0,020 $V_d/V_{кор} \cdot хв$ за одну годину і значно поступався швидкості додавання дуття в задувальному періоді після ремонту III розряду.

Середній рівень температури дуття і швидкість його підвищення знаходились в оберненому взаємозв'язку з показниками зміни витрати дуття – чим вище витрати дуття в задувальному періоді, тим нижче його температура. Оскільки з утворення фурменних вогнищ починається структуризація стовпа шихти то форсування витратою дуття в задувальному періоді слід надавати перевагу, в порівнянні з підвищенням його температури, тому що обидва фактори збільшують перепад тисків в стовпі шихти і по суті є конкурентами при задуванні, адже відомо [6], що підвищення нагріву дуття і температури в горні збільшують об'єм і тиск газів в горні, в результаті чого рівномірність опускання шихти погіршується. Негативний вплив підвищення температури дуття в задувальному періоді посилює також зниження температури по висоті печі, яке, в свою чергу, не сприяє відновленню залізородних матеріалів у верхніх задувальних шихтах.

Не зважаючи на різні сировинні та експлуатаційні умови задування печей різного об'єму в розглянутих прикладах (табл. 2, колонки 1-4) середній загальний перепад тисків в задувальних періодах знаходився у відносно вузьких межах, а саме 53-83 кПа, що свідчить про намагання уникнути підвисань шихти у відповідальному періоді пуску печі.

Що стосується старої (М.М. Чернов, А.М. Чечуро, 1965 р.) і підтриманої набагато пізніше рекомендації (В.М. Григор'єв зі співавторами, 1999 р.) задувати піч на всіх фурмах звичайного діаметру слід зазначити наступне. Неможливо при всіх відкритих фурмах при дотриманні рекомендованого низького діапазону зміни витрати дуття в задувальному періоді, а саме 0,5- 1,0 $V_d/V_{кор} \cdot хв$ створити активні фурменні вогнища, які є запорукою, по перше, створення робочої зональності стовпа доменної шихти, по друге, віддалення гарячих фурменних газів від нової футерівки і по третє посилення транспорту цих газів до центру печі.

Таблиця 2 - Параметри газодуттового режиму в задувальні періоди доменних печей різного об'єму, що працювали в різних сировинно-експлуатаційних умовах*

Параметри	Доменні печі, м ³ , регіон, підприємство				
	1386, Урал, рф	1386, Урал, рф	1719, АМКР, Україна	3000, ЗСМК, рф	1719, ЧелМК, рф
Вид ремонту	Після будівництва	КР-1, з реконструкцією	КР-П, після консервації	Відновлювальний, тривалість 11 дб	КР-Ш, тривалість 6 дб
Дата задування	24.10. 1952 р.	11.02. 1954 р.	10.04. 2003 р.	н.д., публікація 2008 р.	12.1986, публікація 1988 р.
Середні за задувальний період: надмірні тиски, кПа: - на колошнику - дуття - витрата дуття, $\frac{V_d}{V_{корхв}} \frac{м^3}{год}$	8 72 1,42	9 92 1,07	16 73 1,12	71 123 0,25	н.д. н.д. н.д.
Температура дуття, °С	565	622	554	838	859
Загальний перепад тисків, кПа	64	83	56	53	н.д.
Швидкості зміни: - витрати дуття, $\frac{V_d}{V_{корхв}} \frac{м^3}{год}$ - температури дуття, °С/год - тисків, кПа/год. на колошнику дуття	0,020 - - 3,0	0,012 - - 3,8	0,015 4,4 0,65 3,0	0,012 18,8 4,2 5,4	0,062 15,0 н.д. 7,3

* посилення на джерела у підписах до рисунків

Крім наведеного вище прикладу задування ДП №3 «ЗСМК» слід згадати відомий досвід задування ДП №5 «ЧерМК» після будівництва в 1986 році (В. А. Улахович зі співавторами, 1988 р.). Ця піч, найбільша на той час в світовій практиці, мала об'єм 5500 м³ і 40 повітряних фурм. Після відступу з витратою дуття в піч подавали 1500 м³/хв повітря (0,27 V_д/V_{кор}·хв) крізь 20 фурм. Це дозволило мати середню витрату на одну фурму 75 м³/хв. Якби піч задували на всіх 40 фурмах при тій же загальній витраті дуття, то витрата на одну фурму зменшилася б удвічі, що зовсім недостатньо для утворення фурменного вогнища, яке б відповідало потребам задування потужної печі.

Щодо рекомендацій ІЧМ [2] (табл. 1, колонка 5) стосовно темпу нарощування витрати дуття слід зауважити наступне. Разова добавка дуття через регламентований відлік часу в 50- 100 м³/хв не є універсальною, оскільки її розмір повинен бути функцією об'єму печі. Для прикладу у відповідності до алгоритму задування [2] розраховали кінцеву витрату дуття при завершенні задувального періоду протягом 24 годин. В межах цього часу, починаючи з 6 годин після задувки, можливі 6 добавок по 50- 100 м³/хв з інтервалом 3 години і 4 таких же добавок, починаючи з 8 годин після пуску печі з інтервалом 4 години. Приймаємо на основі рекомендацій [3, 4] початкову витрату дуття в розмірі 0,5 V_д/V_{кор}·хв.

	Об'єм доменних печей		
Початкова витрата дуття	2000	3000	5000
0,5 корисного об'єму за хв.	1000	1500	2500
Сумарна добавка			
за 6 разів по 50 м ³ /хв	300	300	300
те ж по 100 м ³ /хв	600	600	600
Кінцева витрата дуття			
при застосуванні добавок:			
50–100 м ³ /хв	1300-1600	1800-2100	2800-3100
V _д /V _{кор} ·хв	0,65-0,80	0,60-0,70	0,56-0,62

Після 4-х добавок по 50-100 м³/хв в кінцевому рахунку після 24 годин роботи показник V_д/V_{кор}·хв буде ще меншим і відрізнятися від рекомендованого 0,9-1,0 [4]. Якщо для розрахунку розміру добавки використовувати відносний до об'єму печі об'єм дуття, то при умові збереження початкової витрати дуття 0,5 V_{кор}·хв і доведення її в кінці задувального періоду до 0,9-1,0 V_{кор}·хв разова добавка дуття при 6-ти підвищеннях складе 0,4/6–0,5/6 або 0,067-0,083 V_д/V_{кор}·хв. Тоді, наприклад, для ДП 5000 м³ абсолютні величини добавки складуть 335-415 м³/хв. Зрозуміло, що ні перший варіант задування за розміром абсолютної разової добавки дуття, ні другий варіант за розміром

великої відносної добавки не відповідають вимогам технології. Чим менший розмір добавки в абсолютному та відносному вимірі тим менш чутливим до неї стає перепад тисків і тим легше підтримання рівного ходу печі, але кількість обмежених добавок повинна забезпечувати задану витрату дуття в кінці задувального періоду.

Висока швидкість нарощування витрати дуття притаманна задувкам печей після ремонту III розряду, коли протягом 20 годин темп збільшення витрати дуття може складати $0,062 \frac{V_d/V_{кор\cdot хв}}{год}$ (табл. 2, колонка 5). Як виняток, ще більший темп зростання спостерігався на печі «НЛМК» (рф) об'ємом 2000 м³ під час задувального періоду після капітального ремонту II розряду (Е.М. Щеглов зі співавторами, 2014 р.). В перші 9 годин після задувки швидкість нарощування витрати дуття склала $0,106 \frac{V_d/V_{кор\cdot хв}}{год}$. Однак надалі від 9 по 17 годину після пуску печі спостерігалось падіння витрати дуття зі швидкістю $0,024 \frac{V_d/V_{кор\cdot хв}}{год}$, що є небажаним явищем при переході до роздувального режиму оскільки порушується принцип поступовості. До речі на вказаній вище печі середня відносна витрата дуття в задувальному періоді склала лише $1,04 V_d/V_{кор\cdot хв}$, що знаходиться в межах, досягнутих при «класичних» задувках (табл. 2, колонки 2, 3).

Якщо прийняти за основу рекомендацію авторів [2] на розбиття задувального періоду на два напівперіоди тривалістю 6-8 годин перший і 16-18 годин другий, то методика встановлення відносної величини разової добавки дуття і кількості цих добавок у другому на півперіоді повинна бути наступною. Різницю між кінцевими відносними витратами дуття у другому $V_{к2}$ і першому $V_{к1}$ напівперіодах ділять на кількість разових добавок у другому напівперіоді n_d . Якщо інтервал між добавками прийняти за одну годину, то протягом другого на півперіоду задування тривалістю 18 год буде проведено стільки ж збільшень витрати дуття. Приймаючи кінцеві відносні витрати дуття в другому і першому напівперіодах 0,5 і 0,9 $V_d/V_{кор\cdot хв}$ отримаємо величину відносної разової добавки РД:

$$РД = V_{к2} - V_{к1}/n_d = 0,9 - 0,5/18 = 0,022 V_d/V_{кор\cdot хв}. \quad (1)$$

При цьому величина РД повинна бути в межах реального застосування для конкретного задувального періоду. Тобто, якщо задування печі проводиться після капітальних ремонтів першого і другого розрядів розрахункова РД не повинна значно перевищувати досягнуту на практиці саме після цих ремонтів. Так, наприклад, при задуванні печі на залізній руді (табл. 1, колонка 1) і на сучасних

залізорудних матеріалах [1] швидкість нарощування відносної витрати дуття складала $0,02 V_d/V_{кор} \cdot \text{хв}$.

У разі необхідності збільшення кінцевої відносної витрати дуття тривалість другого напівперіоду треба збільшити, щоби розмір добавки не перевищував максимально допустиму при збільшенні числа разових добавок. Оскільки запропонована методика нарощування витрати дуття в задувальному періоді відноситься до високоінтенсивних, для уникнення небажаних явищ у сході шихти у другому напівперіоді, обов'язкове відповідне поступове збільшення тиску газу на колошнику. Так, наприклад, під час задувального періоду ДП №7 фірми Essar Steel Algoma's (Канада) об'ємом 2840 м^3 збільшення відносної витрати дуття з $0,39$ до $0,95 V_d/V_{кор} \cdot \text{хв}$ відбувалось зі швидкістю $0,02 \frac{V_d/V_{кор} \cdot \text{хв}}{\text{год}}$ і супроводжувалося нарощуванням тиску газу на колошнику зі швидкістю $1,2 \text{ кПа/год}$ [1]. Піч задували після розширеного ремонту другого розряду з ремонтом стін горна.

При універсальній відносній величині РД абсолютна її величина залежатиме від об'єму печі:

Об'єм печі, м^3	2000	3000	5000
Абсолютна величина разової добавки дуття при відносній $0,022 V_d/V_{кор} \cdot \text{хв}$, $\text{м}^3/\text{хв}$, без округл.	44	66	110

РД в абсолютному виразі для печей об'ємом $2000\text{--}5000 \text{ м}^3$ буде близькою до рекомендованої ($50 - 100 \text{ м}^3/\text{хв}$, [2]) але більш конкретною, враховуючою її вплив на газодинаміку доменного процесу.

Практика показала, що доменну піч можна задути при значно меншій інтенсивності нарощування дуття ніж це рекомендовано авторами [2-4]. Однак це пов'язано зі збільшенням тривалості задувального періоду, а надалі і роздувального. Так, при задуванні ДП №5 «ЧерМК» (рф) об'ємом 5500 м^3 (В. А. Улахович зі співавторами, 1988 р.) початкова відносна витрата дуття після відступу після запалювання коксу складала $0,27 V_d/V_{кор} \cdot \text{хв}$, а кінцева о 24 годині після пуску печі – $0,33 V_d/V_{кор} \cdot \text{хв}$. Тобто за 23 години задувального періоду швидкість нарощування витрати дуття складала $0,003 \frac{V_d/V_{кор} \cdot \text{хв}}{\text{год}}$.

Повільне задування призвело до гальмування процесу формування зональності стовпа шихти, про що свідчив пізній перший випуск чавуну через 38 годин після пуску, тоді як при нормальному задуванні перший чавун зазвичай випускають через 24-32 години [2].

Роздувальний період ДП №5 «ЧерМК» на ливарному чавуні склав 23 доби з витратою дуття в останні 12 діб лише $1,09 V_d/V_{кор} \cdot хв$.

Висновки

В роботі розглянуто існуючі розбіжності у встановленні меж задувального періоду доменних печей і визначенні кінцевої межі цього періоду, що заважає розробці дієвих рекомендацій стосовно пуску печей в експлуатацію.

Систематизовано дані про зміну газодуттєвого режиму задувальних періодів доменних печей різного об'єму у відмінних сировинно-експлуатаційних умовах. Показано, що для своєчасного утворення зональності доменного процесу перевагу збільшень в задувальному періоді слід надавати витраті дуття, а не його температурі, оскільки обидва параметри є конкурентами у впливі на перепад тисків в стовпі шихти при різному впливі на горіння коксу перед фурмами і вихід фурменних газів.

Показано, що при задуванні доменних печей після будівництва та капітальних ремонтів першого і другого розрядів з дотриманням відносної витрати дуття в межах задувального періоду $0,5- 1,0 V_d/V_{кор} \cdot хв$ попереднє тимчасове закриття певної кількості повітряних фурм є обґрунтованим технологічним заходом, який в умовах зниженої загальної на піч кількості дуття забезпечує необхідний рівень активізації фурменних вогнищ.

Запропоновано для підтримання інтенсивного нарощування витрати дуття до $1,0 V_d/V_{кор} \cdot хв$ в межах добового задувального періоду у другому його напівперіоді тривалістю 16-18 годин кількість разових добавок дуття слід збільшувати, а розмір разової добавки зменшувати до меж реального застосування з відповідною компенсацією підвищення тиску газу на колошнику з метою підтримання допустимого перепаду потоків газу в стовпі шихти і її рівного сходження.

Перелік посилань

1. Successful blow-in of Essar Steel Algoma's blast furnace 7 / L. Jones, D. Vanmarrum, J. Tuomi et. al. *Technical contribution to the 3th International Meeting on Ironmaking*. September 22-26, 2008, Sao Luis City – Maranhao State – Brazil. P. 1357-1368.
2. Научно-технические решения по обеспечению безопасной работы доменных печей в стационарных и переходных режимах / В. И. Большаков, Н. М. Можаренко, Л. Г. Тубольцев, Г. Н. Голубых. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Вып. 17. 2008. С. 283-300.
3. Технологическое обоснование рациональных приемов задувки доменных печей большого и среднего объемов / В. И. Большаков, Н. М.

Можаренко, Н. Г. Иванча и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Вып. 20. 2009. С. 3-10.

4. Основные положения задувок доменных печей после остановок различной продолжительности / А. М. Кузнецов, А. Г. Коваленко, А. В. Зубенко и др. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. Вып. 30. 2015. С. 90-109.

5. Замедленная раздувка доменной печи после ремонта второго разряда / Г. Ю. Крячко, П. А. Васюченко, Л. А. Сафина. *Зб. наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*. Дніпродзержинськ: ДДТУ. 2005. С. 17-22.

6. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. *Металлургия чугуна*. К. : Вища школа. Головне вид-во, 1988. 351 с.

References

1. Jones, L., Vanmarrum D., Tuomi J. et. al. (2008). Successful blow-in of Essar Steel Algoma's blast furnace 7. *Technical contribution to the 3th International Meeting on Ironmaking*. September 22-26, Sao Luis City – Maranhao State – Brazil, 1357-1368

2. Bolshakov, V. I., Mozhareno, N. M., Tuboltsev, L. G., Golubih, G. N. (2008). Scientific and technical solutions to ensure safe operation of blast furnaces in stationary and transient modes. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 17, 283-300

3. Bolshakov, V. I., Mozhareno, N. M., Ivancha, N. G. et. al. (2009). Technological justification for rational methods of blowing blast furnaces of large and medium volumes. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 20, 3-10

4. Kuznetsov, A. M., Kovalenko, A. G., Zubenko, A. V. et. al. (2015). Basic provisions for blowing blast furnaces after shutdowns of various durations. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 30, 90-109

5. Kryachko, G. Yu., Vasuchenko, P. A., & Safina, L. A. (2005). Slow blowing of a blast furnace after second stage repairs. *Collection of scientific works of the Dniprodzerzhinsk State Technical University (technical sciences)*, 17-22.

6. Efimenko, G. G., Gimmelfarb, A. A., & Levchenko, V. E. (1988). *Iron metallurgy*. Kyiv: Visha shkola

H. Yu. Kriachko¹, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-8773-508X
Ye. M. Sigarev¹, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-8229-7877

¹ Dniprovsky State Technical University

GAS BLOW MODE OF BLOWING PERIOD OF BLAST FURNACES

Abstract. The purpose of the work is to generalize the experience of varying the gas-blowing parameters in the blowing periods of blast furnaces and to develop recommendations for further improvement of the gas-dynamic blowing mode. The data on the change in the gas and dust regime of the blasting periods of blast

furnaces of different volumes under different raw material and operating conditions have been systematized. It was established that at a lower rate of growth of the blowing flow in the blowing period, a higher blowing temperature in it contributes to the complication of the gas dynamics of the blast furnace process, which is evidenced by the simultaneous increase in the blowing pressure, pressure drop, and gas pressure on the furnace, as a compensator of these complications. Offered within the limits of the daily blowing period with output to the final blowing consumption of up to $1.0 V_d/V_{cor}$ ·min in the second half-period of blowing, increase the number of one-time blowing additives with a decrease in their size to the limits of real use. It is justified to give preference to increasing the blowing flow before increasing its temperature in the blowing period, since both parameters have a competitive effect on the gas dynamics of the blast furnace process with significantly different effects on the structuring of the charge column. It has been proven that the common recommendation to blow the furnace on all nozzles of the working diameter does not correspond to the technology of conducting the blowing period, taking into account the low total initial cost of blowing to create active nozzle foci. Inclusion of the proposed recommendations in the practice of starting blast furnaces will make it possible to reach the planned parameters of the gas dynamic regime in a short period of the blowing period.

Key words: gas blowing parameters, blowing period, blast furnace, growth rate, blowing costs, recommendations, blowing technology.

For citation: Kryachko, H. Yu., & Sigarev, Ye. M. (2024). Gas blow mode of blowing period of blast furnaces. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 39-58. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-39-58>.

Стаття надійшла до редакції збірника 02.08.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)