

Оцінка змін продуктивності і обмежень у форсуванні ходу при збільшенні об'єму доменних печей

Вибір корисного об'єму нових або реконструйованих доменних печей є актуальною задачею як для виробників, так і для проєктувальників, тому оцінка технологічних можливостей печей різного об'єму завжди викликала інтерес як з практичної, так і з теоретичної точок зору. Метою представленої роботи є вибір найбільш представницьких показників, за допомогою яких можлива порівняльна оцінка роботи печей різного об'єму, оцінка роботи печей в умовах планової і ринкової економік, а також спроба визначити та класифікувати фактори обмеження форсованої роботи печей збільшеного об'єму.

Показано, що застосування показників, які розраховуються на одиницю площі горна, не є доцільним, оскільки площа горна не є основним розміром печі. Основним розміром є повний об'єм печі, який визначає конструкцію агрегату і обсяг капітальних витрат на його будівництво. Показники питомої продуктивності, що розраховуються на одиницю об'єму печі, аналітично залежать від висоти печі і адекватно відображають результативність роботи печей різного об'єму.

Показано беззаперечну перевагу компактних доменних печей з корисним об'ємом < 1500 м³ в порівнянні з печами більших об'ємів, що свідчить про недосконалість спрощеного підходу до оцінки продуктивності печей, заснованому на поняттях балансової і газодинамічної складових, оскільки при визначенні цих складових важко врахувати всі фактори впливу.

Встановлено і класифіковано фактори обмеження інтенсифікації процесу в доменних печах середнього і великого об'ємів. Головними зовнішніми факторами є якісні характеристики коксу, залізородних матеріалів і дуття, більш конкретно, гаряча міцність коксу, багатство сировини залізом і спроможність повітродувних машин забезпечувати дуття потрібних ступенів стиснення. До головних конструкційних факторів подолання суттєвих обмежень в експлуатації печей з корисним об'ємом > 1500 м³ є раціональні профіль, співвідношення площ вихідного перетину повітряних фурм і перетину горна, а також використання безконусних завантажувальних пристроїв.

Ключові слова: доменна піч, об'єм, продуктивність, показники порівняння, фактори обмежень, інтенсифікація процесу.

Вступ. Складовою аналізу результативності роботи доменних печей (ДП) є оцінка їх продуктивності за допомогою показників, віднесених до геометричних розмірів печі. При порівнянні результативності роботи ДП різного об'єму принципово важливим є вибір критерію оцінки продуктивності. В дальньому зарубіжжі набув поширення показник питомої продуктивності $\Pi_{\text{ро}}$, який являв собою відношення добової продуктивності печі $\Pi_{\text{д}}$ до її робочого об'єму — об'єму робочого простору від колошника до рівня повітряних фурм $V_{\text{ро}}$: $\Pi_{\text{ро}} = \Pi_{\text{д}} / V_{\text{ро}}$, т/м³·доб [1]. Суттєвим недоліком цього показника радянські фахівці, зокрема П.Г. Рубін (1932 р.) небезпідставно вважали неврахування об'єму горна печі — важливої

частини профілю, в якій відбуваються завершальні стадії доменного процесу. Тому на теренах колишнього СРСР повсюдне застосування отримав показник, названий КВКО — коефіцієнт використання корисного об'єму $\text{КВКО} = V_{\text{к}} / \Pi_{\text{д}}$, м³·доб/т, де $V_{\text{к}}$ — корисний об'єм печі від вісі чавунних льоток до колошника включно з об'ємом до кромки розподільника шихти в крайньому опущеному стані.

Надалі поряд з КВКО використання отримав обернений йому показник $\Pi_{\text{ко}} = 1 / \text{КВКО} = \Pi_{\text{д}} / V_{\text{к}}$ [2, с. 180], названий питомою продуктивністю печі. З появою робіт [3, 4] з'явилася гадка про «неадекватність» оцінки питомої продуктивності та інтенсивності плавки, що розраховується на одиницю об'єму печі, замість цьо-

го пропонувалося розраховувати показники продуктивності печі на одиницю площі перетину горна.

Дійсно, такі показники питомої продуктивності та інтенсивності плавки мають поширення, однак їх суттєвим недоліком якраз є те, що площа горна не є основним розміром ДП, оскільки при однаковій його площі можуть суттєво розрізняватись як так званий робочий надфурменний об'єм V_{PO} , так і загальноприйнятий корисний V_K . Для прикладу можна навести розміри ДП № 1 заводу Кашима (Японія [5]) і ДП № 3 заводу Вольта Редонда (Бразилія [6]), які мали однакові діаметр (12,4 м) і площу горна (121 м²), однак різні об'єми:

	$V_{PO}, \text{м}^3$	$V_K, \text{м}^3$
ДП № 1 Кашима	2608	3159
ДП № 3 Вольта Редонда	2935	3390

Основним розміром печі є повний об'єм її робочого простору від нижньої кромки розподільника шихти в нижньому положенні до лежачі [7], який визначає вартість огороження печі — кожух, систему охолодження, футерівку, розміри і вартість несучих металоконструкцій, що в цілому становить п'яту частину капітальних витрат на будівництво і обладнання всього доменного комплексу [8]. Опираючись на площу горна як основний розмір ДП при визначенні продуктивності, як пропонується в [3, 4], створює ілюзію досконалості профілів всіх радянських печей в процесі збільшення їх розмірів.

Постановка проблеми. Відповідно до концепції [3, 4] підвищення розрахункової продуктивності на одиницю площі перетину печі зі збільшенням об'єму обумовлено збільшенням балансової складової продуктивності на них через зменшення питомих витрат тепла зі зростанням об'єму печей, отже, і зі зменшенням витрати палива.

Однак сподівання на зниження витрати коксу за рахунок зростання об'єму ДП не завжди може бути реалізоване. Виходячи з теоретичних уявлень [3], зниження питомих теплових витрат зі збільшенням об'єму печі повинно бути очікуваним явищем. На практиці теплові втрати печей різного об'єму залежно від стану огороження і режиму ведення процесу мають суттєві відхилення від теоретичних припущень. Достатньо навести приклади теплових витрат на ДП № 2 Західно-Сибірського меткомбінату (ЗСМК) об'ємом 2000 м³, проведених 01.2008 і ДП № 9 АрселорМіттал Кривий Ріг (АМКР) об'ємом 5000 м³, проведених 08.2007 [9, с. 50]. Обидві печі працювали з центральним газорозподілом, однак на суттєво меншій ДП № 2 ЗСМК в січні витрата коксу на тепловтрати становила 12 кг/т чавуну, тоді як на ДП № 9 в серпні була 22 кг/т чавуну.

Не витримує критики твердження авторів [4] про те, що питома продуктивність печі на 1 м² площі перетину печі не залежить від її геометричних розмірів — невже площа перетину не є геометричним розміром? Зведення газодинамічної складової питомої продуктивності до газопротисувної здатності стовпа шихти в печі і площі її перетину спрощене, оскільки ігно-

руються важливі елементи газодинаміки фурменної зони. До питання про порівняння роботи ДП різного об'єму неодноразово повертались в роботах [10-14]. Крайні показники роботи доменних печей обмеженого об'єму пояснювали більшою відносною часткою площі горна, що брала участь в горінні коксу [10], меншими розмірами в перетині і більш інтенсивним протіканням відновлювальних процесів в шахті [11], співпадінням проєкції рудної лінзи з фурменними вогнищами [12], кращим використанням енергії пічних газів через відсутність необхідного надмірного розвитку центрального потоку газів [13], зниженням протяжності окислювальних зон по відношенню до радіуса ДП [14]. Відсутність однакових поглядів на факт погіршення показників плавки зі зростанням об'єму печей свідчить про необхідність додаткового вивчення питання.

Формулювання мети роботи. Мета дослідження полягала в наступному:

- у виборі найбільш представницьких показників для порівняльної оцінки роботи печей різного об'єму;
- в оцінці продуктивності та ефективності роботи печей в умовах планової і ринкової економік;
- у спробі визначити та класифікувати фактори обмеження форсованої роботи печей збільшеного об'єму.

Виклад основного матеріалу. Зважаючи на повсюдне використання в подальшому аналізі в якості представницького розміру ДП використовували корисний об'єм, який на об'єм зумпфу менше повного. В якості комплексного параметра, який одночасно характеризує результативність та ефективність плавки, розраховували коефіцієнт рівня технології КРТ, що дорівнює співвідношенню питомої продуктивності Π_{KO} (т/м³·доб) і витрати коксу K (т/т чавуну) [15]. КРТ враховує зміни як в продуктивності, так і витраті коксу і в достатній мірі відображає стан технології підготовки і пропалвлення шихти.

Для оцінки якості дуття використали абсолютний $\varepsilon = P_d / P_{атм}$ і питомий ступінь стиснення $\varepsilon' = \varepsilon \cdot Q_{д.од} / Q_{д.ф.}$ — одинична і фактична витрати дуття відповідно, м³/с [16].

З використанням даних довідника [2] розраховували середній корисний об'єм ДП, добову виплавку чавуну, що приходилась на одну піч, і коефіцієнт рівня технології для десяти доменних цехів колишнього Мінчормету України. Слід зазначити, що в довіднику для деяких цехів не враховані всі працюючі печі, що могло вплинути на результат порівняння.

Оцінка рейтингу вітчизняних доменних цехів показала (рис. 1), що за винятком ДП № 9 КрСт об'ємом 5000 м³, цехи з максимальним середнім об'ємом печей (КомМК, КрСт1, ЖМК) хоча і мали найбільшу продуктивність одного агрегату, не були лідерами в технології виплавки чавуну перш за все через об'єктивні обмеження, обумовлені розмірами ДП. Тому невідповідно верхні рядки рейтингу за коефіцієнтом рівня технології зайняли цехи з найменшим середнім об'ємом печей ЗСт, ДнМЗ і ЄМЗ.

Винятковість високих показників ДП № 9 КрСт пояснюється різкою відмінністю залізрудної сировини

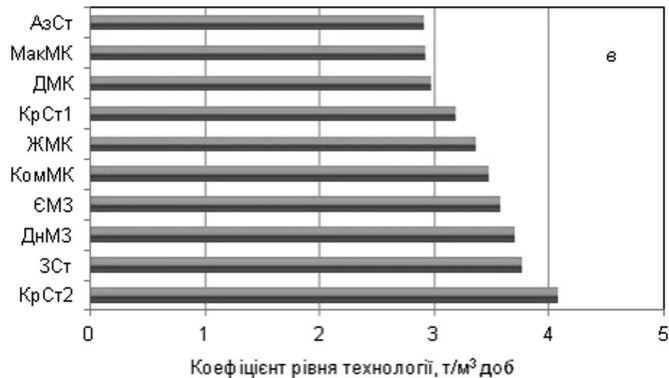
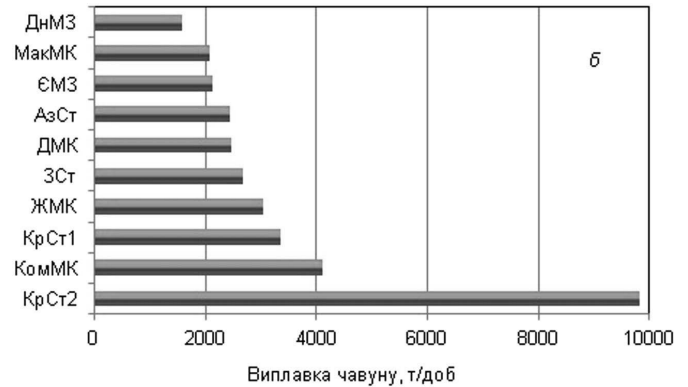
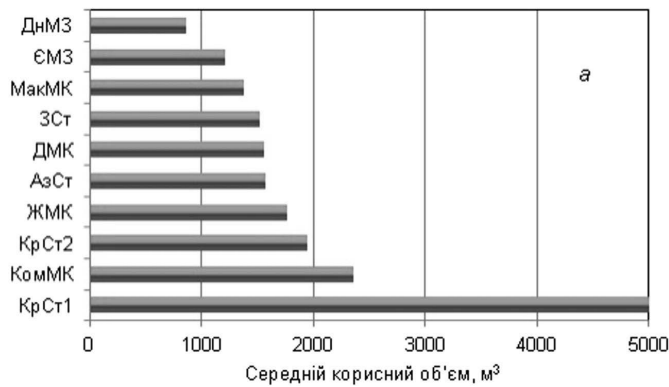


Рис. 1. Оцінка рейтингу доменних цехів України за середніми за 1983 р. [2]: корисним об'ємом печей (а), добовою виправкою чавуну на одну піч (б) і коефіцієнтом рівня технології (в): скорочені колишні назви металургійних підприємств: КомМК, ЖМК, ДМК, МакМК — Комунарський, Ждановський, Дніпровський і Макіївський металургійні комбінати; КрСт, АзСт, ЗСт — Криворіжсталь, Азовсталь, Запоріжсталь відповідно, ЄМЗ, ДнМЗ — Єнакієвський і Дніпровський металургійні заводи

від поширеної на інших печах Криворіжсталі та галузі взагалі. Мова йде про агломерат Новокриворізького гірничо-збагачувального комбінату-2 (НКГЗК-2), який за міцністю і гранулометричним складом відповідав кращим світовим зразкам. На користь високої якості агломерату НКГЗК-2 свідчить факт різкого покращення роботи ДП першого цеху Криворіжсталі в періоді проведення капітальних ремонтів ДП № 9 і вивільненні якісної сировини. Навіть відсів агломерату НКГЗК-2 вводили в шихту печей Дніпропетровського металургійного заводу.

Для співставлення показників роботи ДП № 6 середнього об'єму і ДП № 9 великого об'єму комбінату Криворіжсталь в умовах ринкової економіки використали інформацію з публікації [17]. В якості періодів порівняння були вибрані кращі річні періоди протягом 2000-2003 рр. для ДП № 6 і протягом 1999-2003 рр. для ДП № 9 (табл. 1).

Якщо порівняти дані, наведені на рис. 1 з даними табл. 1, то видно, що нестабільністю ринкових умов накладено від'ємний відбиток на роботу обох печей. Однак втрати потужної печі ДП № 9 суттєво більші, незважаючи на більш якісну шихту (агломерат НКГЗК-2), вищу температуру дуття і витрату природного газу, підвищений тиск в робочому просторі печі. Порівняння свідчить про ще один недолік потужних печей, який полягає в більшій чутливості до роботи

на знижених або суттєво змінних в часі параметрах, коли нівелюються всі заходи з покращення сировинних та експлуатаційних умов плавки.

Подібна ситуація спостерігалась тривалий час і на ДП Череповецького комбінату (рф) як в умовах планової [2], так і в умовах ринкової [18] економік (табл. 2).

Дані табл. 2 свідчать про суттєву технологічну перевагу компактної ДП № 1 в порівнянні з більшими за неї печами, незважаючи на дещо нижчі для неї сировинні та експлуатаційні умови. При частці об'єму ДП № 1 від загального об'єму печей цеху 10,5 % частка виробництва чавуну складала 14,9 %, тоді як для ДП 5500 м³ ці частки складали 57,7 і 50,4 % відповідно.

Звертає на себе увагу корельованість абсолютних величин збільшення висоти шахт зі зменшенням продуктивності печей і коефіцієнта рівня технології, тоді як подібних співпадінь не спостерігається для зміни корисного об'єму або діаметра горна. Це ще раз свідчить про значення вибору раціональної висоти робочого простору печей.

Таким чином, ще раз доведено, що ДП середнього об'єму з $V_K > 1500 \text{ м}^3$ і особливо великого з $V_K \geq 5000 \text{ м}^3$ суттєво поступаються компактним (за міжнародною класифікацією CBF [14]) печам з $V_K < 1500 \text{ м}^3$ як за продуктивністю, так і за витратою палива. Тому важливо встановити фактори, що значною мірою визначають зниження головних показників доменного процесу при зростанні корисного і повного об'єму печей.

Важливим є розгляд газодинамічних складових, що залежать безпосередньо від конструкції ДП і доменних компресорів. Першим фактором, на який звернули увагу ще на початку 60-х років ХХ ст. [19] було співвідношення площ горна S_r і сумарного перетину повітряних фурм $\Sigma S_{\text{пф}}$ — $S_r / \Sigma S_{\text{пф}}$, яке на думку дослідників (Лукашов Г.Г. та ін.) повинно бути однаковим для печей різного об'єму і відрізнятися залежно від виду і енерговитратності чавуну. В дійсності зі збільшенням об'єму ДП незважаючи на збільшення кількості повітряних фурм і сумарної площі їх перетину, відносна до площі горна площа вихідного перетину фурм знижувалася (рис. 2).

Таке зниження примушувало збільшувати кількість повітряних фурм в періоді капітальних ремонтів і використовувати більш потужні повітродувні засоби для забезпечення форсованої роботи ДП збільшеного об'єму. Однак на заваді подальшого зростання потужності дуттьового струменя і швидкості дуття стали

Показники роботи доменних печей металургійного комбінату «Криворіжсталь» у 2001 і 2003 рр. за даними [17]

Показники	Номер печі	
	6	9
Періоди роботи	2003	2001
Тривалість періодів, діб	359	358
Корисний об'єм:		
м ³	2000	5000
%	100,0	250,0
Висота шахти:		
м	18,2	20,7
%	100,0	113,7
Діаметр горна:		
м	9,75	14,7
%	100,0	150,8
Завантажувальний пристрій	конусний	лотковий РW
Вміст заліза в шихті, %	52,61	52,80
Витрата підготовленої сировини, %:		
агломерату КрСт і НКГЗК-1	80,5	-
агломерату НКГЗК-2	13,0	67,8
обкотишів	6,0	26,9
Рудне навантаження, т/т	3,91	3,53
Питома продуктивність:		
т/м ³ ·доб	1,554	1,456
%	100,0	93,7
Питома витрата коксу:		
кг/т	458	488
%	100,0	106,5
Дуття:		
абсолютний ступінь стиснення	3,47	4,17
питомий ступінь стиснення 1 м ³ /с дуття $\varepsilon' \cdot 10^2$	7,14	3,54
температура, °С	1021	1089
вміст кисню, %	26,7	26,2
витрата природного газу, % до витрати дуття	6,66	7,86
Надмірний тиск колошникового газу, кПа	129	157
Виніс пилу (вловленого), кг/т	19	2
Коефіцієнт рівня технології:		
т/м ³ ·доб	3,393	2,984
%	100,0	87,9

Показники роботи доменних печей ВАТ «Северсталь» 2003 р. за даними [18]

Показники	Номер печі		
	1	3	5
Корисний об'єм:			
м ³	1007	2000	5500
%	100,0	198,6	546,2
Висота шахти:			
м	15	18,2	20,4
%	100,0	121,3	136,0
Діаметр горна:			
м	7,2	9,75	15,1
%	100,0	135,4	209,7
Завантажувальний пристрій	конусний	конусний	лотковий РW
Вміст заліза в шихті, %	58,5	59,2	60,1
Питома продуктивність:			
т/м ³ ·доб	3,144	2,346	1,928
%	100,0	74,6	61,3
Питома витрата коксу:			
кг/т	400,8	414,9	420,3
%	100,0	103,5	104,9
Рудне навантаження, т/т	4,075	3,868	3,787
Дуття:			
температура, °С	1145	1153	1185
вміст кисню, %	30,3	29,6	23,55
витрата природного газу, м ³ /хв	290	397	692
Надмірний тиск колошникового газу	1,42	1,79	1,86
Частка об'єму печі від сумарного об'єму всіх печей цеху, %	10,5	21,0	57,7
Частка виробництва від сумарного виробництва всіх печей цеху, %	14,9	21,6	50,4
Дуття:			
т/м ³ ·доб	7,84	5,65	4,59
%	100,0	72,1	58,5

сировинні чинники — якість коксу і залізорудної сировини.

Залежність швидкості дуття від сировинних умов раніше розглядалась для двох змінних — якості коксу і швидкості витоку [20]. Підвищення швидкості витоку струменя дуття супроводжується посиленням процесів сегрегації коксу у фурменому вогнищі [21], накопиченням дрібняку коксу у граничному шарі вогнища, викликаним сегрегацією і погіршенням газифікації палива. В результаті протікання цих процесів висхідна

гілка фурменого вогнища відхиляється від центра до периферії, змінюються умови утворення рідкої фази, внаслідок чого виникав так званий газодинамічний поріг між вогнищем і вісьовою зоною — зона зниженої газопроникності, що ускладнювала нормальну експлуатацію печі.

Перепорою для динамічного проходження газу крізь оболонку фурменого вогнища є третій фактор, а саме кількість утворюваного шлаку, обумовлена багатством доменної шихти залізом. Дані, наведені

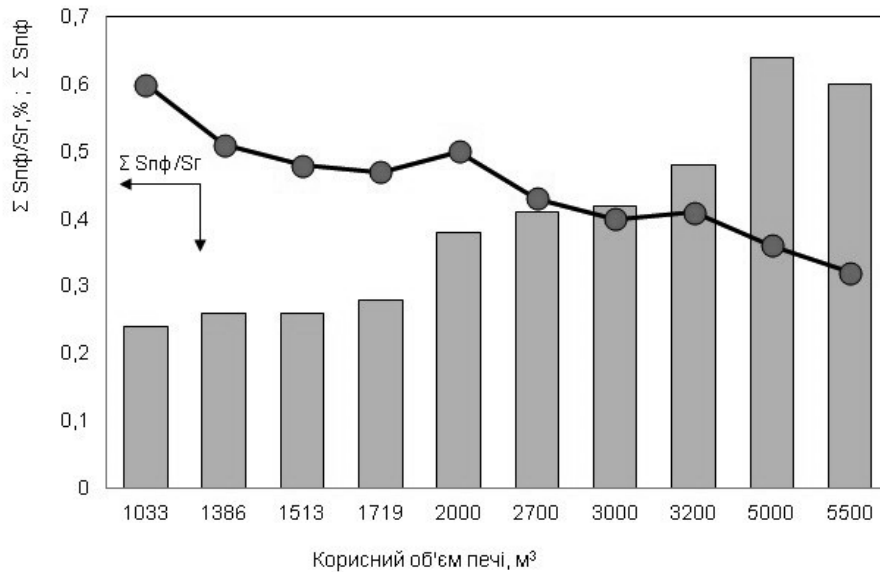


Рис. 2. Зміна відносної $S_f/\Sigma S_{пф}$ і абсолютної $\Sigma S_{пф}$ площ вихідного перетину повітряних фурм діаметром 140 мм на типових доменних печах [20]

Таблиця 3
Вихід шлаку та швидкість дуттьового струменя на доменних печах колишнього СРСР у 1983 р. [2]

Підприємство	Вихід шлаку, кг/т чавуну	Швидкість дуття, м/с
АзСт	579	157
ЗСт	558	196
ЖМК	518	204
КарМК	690	152
НТМК	440	164
ММК	357	213

в табл. 3, ілюструють вплив виходу шлаку на швидкість дуття на фурмах як на підприємствах колишнього Мінчормету УРСР (АзСт — ЖМК), так і на підприємствах інших регіонів (КарМК — ММК). Тому не випадково для забезпечення форсованої роботи печей збільшеного об'єму намагалися забезпечити останні більш якісною залізородною сировиною.

Таким чином, умовою форсованої роботи потужних печей за рахунок прийняття дуття відповідних обсягів є використання залізородних матеріалів з високим вмістом заліза.

Наступним чинником впливу на газодинамічні процеси в ДП різного об'єму є якість дуття, яку продукують доменні компресори різної потужності (табл. 4).

Розгляд даних табл. 4 свідчить про те, що зі збільшенням об'єму ДП і зростанням продуктивності і абсолютного тиску дуття питомий ступінь стиснення дуття знижувався. Якщо цей ступінь, розрахований за максимальними для ПДМ параметрами для ДП об'ємом 930-1180 м³ знаходився в межах 8,33-10,81, то для печей об'ємом 2700-3200 м³ — в межах 4,52-6,38, що в 1,7-1,8 рази нижче.

Якщо в діапазоні зростання корисного об'єму печей з 930 до 3200 м³ продуктивність ПДМ зростає з 2200 до 6900 нм³/хв або у три рази, то абсолютний ступінь стиснення — з 4 до 5,3, тобто лише у 1,3 рази, що і зумовило зниження питомого ступеня стиснення, від якого залежить можливість форсування ходу доменного процесу дуттям. Така особливість розвитку доменних компресорів притаманна всім металургійним регіонам світу. Наприклад, питомий ступінь стиснення дуття ДП № 2 заводу Накаяма об'ємом 757 м³ був в середньому 11,25, ДП № 3 Фукуяма об'ємом 3223 м³ — 4,97, а ДП № 2 Оіта об'ємом 5245 м³ — 3,86 (Японія [16]).

Виходом зі становища, що склалося, може бути удосконалення доменних компресорів не в напрямі збільшення продуктивності, а в напрямі збільшення абсолютного і питомого ступенів стиснення. Оскільки таке удосконалення потребує збільшення потужності приводу компресорів і витрат енергії на компримування дуття, то поряд з цим слід передбачити обов'язкове використання на ДП газових утилізаційних турбін, що дозволить повернути в мережу до 35 % енергії, яку витрачено на стиснення дуття.

Прикладом переходу на компресори нового покоління є придбання комбінатом АМКР для ДП № 9 ПДМ з електроприводом. ПДМ SIEMENS STC-GV (160-3) має продуктивність 4800 нм³/хв і електродвигун потужністю 26,5 МВт. Такі компресори використовуються на потужних печах в режимі спареної роботи.

Поєднання позитивних параметрів профілю (обмежені висота і перетин) з підвищеною якістю стисненого дуття обумовило беззаперечну перевагу компактних ДП перед агрегатами більшого об'єму. Помірна висота шахти і протитокової області в цілому дозволяють форсувати процес без суттєвого посилення радіальної нерівномірності газорозподілу. Обмежені поперечні розміри забезпечують можливість транспорту

Таблиця 4

Деякі параметри радянських повітрорудних машин (ПДМ), рекомендованих [16] для доменних печей різного об'єму

Корисний об'єм печей, м ³	Корисний об'єм печей, м ³	Витрата дуття		Тиск дуття, кПа	Ступені стиснення дуття	
		нм ³ /хв	нм ³ /с		абсолютний ε	питомий $\varepsilon' \cdot 10^2$
930-1180	K-2750-31-1	2200	37	400	4,0	10,81
	K-3250-41-1	2900	48	400	4,0	8,33
1300-1400	K-3250-41-1	2900	48	400	4,0	8,33
	K-4250-41-1	3700	62	400	4,0	6,45
1500-1800	K-4250-41-1	3680	61	407	4,07	6,67
	K-4250-41-1	3600	59	412	4,12	6,98
	K-4250-41-1	3200	53	510	5,10	9,62
2000-2300	K-4250-41-1	3200	53	510	5,10	9,62
	K-5500-41-1	3480	58	392	3,92	6,76
	K-5500-41-1	4500	75	510	5,10	6,80
2700-3200	K-5500-41-1	5000	83	440	4,40	5,30
	K-5500-41-1	4700	78	490	4,90	6,28
	K-5500-41-1	5000	83	530	5,30	6,38
	K-7000-41-1	6900	115	520	5,20	4,52

газів і тепла до центру печі без створення спеціальної вісьової віддушини, а також сприяють формуванню мінімальної за об'ємом надфурменної вісьової зони малорухомих матеріалів.

Тому в процесі реконструкції доменних цехів доцільно зберегти, принаймні, одну піч невеликого об'єму, модернізуючи як власне піч, так і пічний комплекс. Використання сучасних ДП невеликої потужності не пов'язане з тривалим «омертвінням» капітальних вкладень, дозволяє забезпечити гнучкість виробництва і підвищити його ефективність як при скороченні виробничої програми, так і при застосуванні низькоякісних шихтових матеріалів.

Тим не менш, ДП середнього і великого об'єму мають значне поширення і являються незамінними на підприємствах з потужними конвертерними цехами і там, де бракує площ для розміщення додаткових агрегатів. Тому і надалі увага буде приділятися удосконаленню цих печей і умов їх експлуатації, оскільки останні визначають обсяги виробництва.

Дослідження попередників і результати представленої роботи дозволяють класифікувати фактори обмежень у використанні ДП збільшеного об'єму. Залежно від цих факторів їх можна поділити на три умовні групи — зовнішні, конструкційні і суто внутрішні, обумовлені змінами структури стовпа шихти під впливом збільшення об'єму ДП.

До першої групи зовнішніх факторів слід віднести якості коксу, залізородних матеріалів і спроможність повітрорудних машин продукувати дуття необхідних ступенів стиснення. Важливість дотримання високої гарячої міцності коксу обумовлена погіршенням умов використання коксу при збільшенні об'єму ДП

внаслідок дії принаймні трьох факторів: сегрегації у фурменній зоні [21], посиленої газифікації в коксовому центральному каналі і більш тривалого перебування в коксовій насадці збільшеного об'єму. Кокс в центральному каналі або у «віддушині» при високих температурах потерпає від впливу газифікованого кисню шихти, що перейшов з периферійної і проміжної частин перетину, де відбулося відновлення оксидів заліза [22].

Друга група конструкційних факторів подолання суттєвих обмежень в експлуатації печей з корисним об'ємом > 1500 м³ повинна бути представлена раціональними профілем, співвідношенням площ вихідного перетину повітряних фурм і перетину горна, а

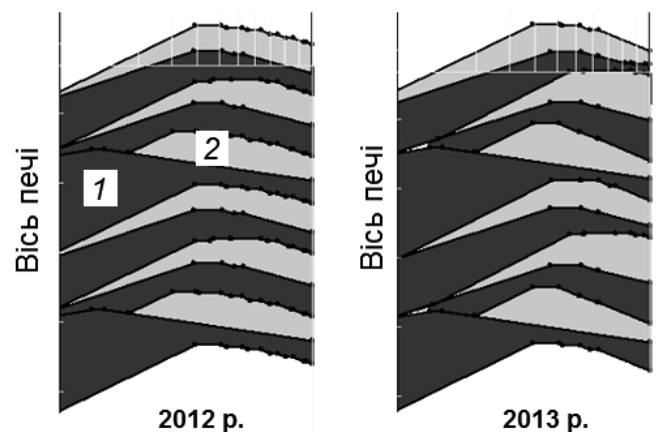


Рис. 3. Розрахункова структура верхньої частини стовпа шихтових матеріалів для програм завантаження, що використовувались на ДП № 3 ЄМЗ об'ємом 1719 м³ у 2012 і 2013 рр. [23]: 1 — кокс; 2 — залізородні матеріали

також використанням безконусних завантажувальних пристроїв.

Третя, «внутрішня» група факторів обмежень стосується змін структури стовпа шихти за рахунок утворення центрального коксового каналу (рис. 3), що не характерне для компактних ДП і збільшення висоти вісьової зони малорухомого коксу [24]. Сюди слід додати також менші нестаціонарності сходження і розпушення стовпа шихти в порівнянні з компактними печами [25].

Таким чином, подальше удосконалення доменного процесу в печах середнього і великого об'єму пов'язане з вжиттям заходів для обмеження негативного впливу факторів зовнішньої і внутрішньої дії, а також факторів, пов'язаних з конструктивним оформленням ДП.

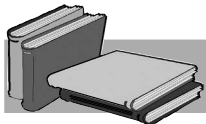
Висновки

Показано, що застосування показників, які розраховуються на одиницю площі горна, не є доцільним, оскільки площа горна не є основним розміром печі.

Основним розміром є повний об'єм печі, який визначає конструкцію агрегату і обсяг капітальних витрат на його будівництво. Показники питомої продуктивності, що розраховуються на одиницю об'єму печі, аналітично залежать від висоти печі і адекватно відображають результативність роботи печей різного об'єму.

Показано, що поєднання позитивних параметрів профілю (обмежені висота і перетин) з підвищеною якістю стисненого дуття обумовило беззаперечну перевагу компактних доменних печей перед агрегатами більшого об'єму.

Встановлено і класифіковано фактори обмежень у використанні доменних печей збільшеного об'єму. Залежно від дії цих факторів поділено їх на три групи — зовнішні, конструкційні і суто внутрішні, обумовлені змінами структури стовпа шихти під впливом збільшення об'єму печей. Показано, що подальше удосконалення доменного процесу в печах середнього і великого об'єму пов'язане з вжиттям заходів для обмеження негативної дії, а також факторів, пов'язаних з конструкцією печей.

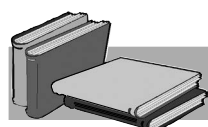


ЛІТЕРАТУРА

1. Люнген Х.Б., Петерс М., Шмеле П. Производство чугуна. *Черные металлы*. 2010. № 8-9. С. 52-59.
2. Волков Ю.П., Шпарбер Л.Я., Гусаров А.К. Технолог-доменщик. Справочное и методическое руководство. Москва: Металлургия, 1986. 263 с.
3. Курунов И.Ф. Оценка производительности и интенсивности хода доменных печей различного объема. *Изв. Вузов. Черная металлургия*. 1991. № 5. С. 12-14.
4. Курунов И.Ф., Филатов С.В. Оценка эффективности работы доменных печей и перспективы технологии доменной плавки. *Металлургия*. 2014. № 5. С. 44-47.
5. Можаренко Н.М., Вышинская Е.Д., Горупаха В.В. Тенденции изменения проектных профилей доменных печей в современных топливно-сырьевых условиях. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. Вып. 29. С. 52-63.
6. Реферативный журнал «Металлургия». 1977. Реф. 7В206. Доменная печь № 3 фирмы CSN «Sider Latinoamer». 1976. № 200. С. 72-81.
7. Кузнецов М.С., Крячко Г.Ю., Сігарьов Є.М. Зміни у проектуванні і роботі накопичувальної частини доменних печей в процесі удосконалення технології плавки. *Теорія і практика металургії*. 2022. № 1. С. 5-14. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2022.01>
8. Ковальски В., Люнген Х.Б., Штриккер К.П. Стойкость доменных печей: современный уровень и мероприятия по продлению кампании. *Черные металлы*. 1999. № 9. С. 26-35.
9. Сохацкий А.А. Совершенствование тепло-газодинамической работы в «сухой» зоне доменной печи с учетом внешних тепловых потерь. *Дис. на соискание канд. техн. наук*. Днепропетровск, 2011. 193 с.
10. Кюн К. Зависимость между профилем доменных печей и показателями их работы. *Черные металлы*. 1963. № 12. С. 34-36.
11. Бялый Л.А., Кайлов В.Д., Костров В.А. и др. Исследование процессов восстановления в доменной печи объемом 2700 м³. *Сталь*. 1973. № 2. С. 1068-1074.
12. Гиммельфарб А.А., Воловик Г.А., Левченко В.Е. Рациональный профиль доменной печи и перспективы его развития. *Изв. Вузов. Черная металлургия*. 1987. № 7. С. 32-41.
13. Андронов В.Н., Саад Халид. Оптимизация технологии доменной плавки на комбинированном дутье. *Черные металлы*. 2001. № 7-8. С. 25-30.
14. Юсфин Ю.С., Черноусов П.И., Голубев О.В. Печи малого объема — будущее доменного производства? *Изв. Вузов. Черная металлургия*. 2005. № 10. С. 20-25.
15. Крячко Г.Ю. О тенденциях изменения параметров воздушных фурм. *Сталь*. 2001. № 7. С. 11-15.
16. Крячко Г.Ю. Оценка качества дутья и технической работы газа в доменном процессе. *Черные металлы*. 2002. № 10. С. 11-16.

17. Шеремет В.А. Развитие доменного производства Криворожского государственного горно-металлургического комбината «Криворожсталь». *Сб. тр. Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь»*. Кривой Рог, 2004. С. 5-12.
18. Шатлов В.А. Состояние производства чугуна и технологии доменной плавки в России. *Сб. тр. Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию КГГМК «Криворожсталь»*. Кривой Рог, 2004. С. 22-26.
19. Тарасов В.П. Газодинамика доменного процесса. Москва: Металлургия, 1982. 222 с.
20. Крячко Г.Ю. Установление предельно возможного расхода дутья в доменной плавке. *Черные металлы*. 2004. № 3. С. 11-14.
21. Манчинский В.Г. Моделирование процессов сегрегации кокса в фурменной зоне доменной печи. *Сталь*. 1974. № 3. С. 201-203.
22. Бугаев К.М. Экспериментально-аналитическое исследование тепло- и массообмена в доменной печи. В кн. «Познание процессов доменной плавки». Дніпропетровськ: Пороги, 2006. С. 190-206.
23. Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И. и др. Освоение энергосберегающей технологии загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в конъюнктурных топливно-сырьевых и технологических условиях. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. Вып. 28. С. 57-80.
24. Дружков В.Г., Ведешкин М.В., Подборных О.Н. Очертания осевой зоны малоподвижных материалов и траектории движения составляющих шихты в моделях доменных печей. *Сталь*. 1988. № 12. С. 11-15.
25. Овчинников Ю.П., Мойкин В.И., Спирин П.А., Боковиков Б.П. Нестационарные процессы и повышение эффективности доменной плавки. Челябинск: Металлургия. Челябинское отд., 1989. 120 с.

Надійшла 27.03.2023



REFERENCES

1. Lungen, H.B., Peters, M., Shmele, P. (2010). Iron production. *Black metals*, no. 8-9, pp. 52-59 [in Russian].
2. Volkov, Yu.P., Shparber, L.Ya., Gusarov, A.K. (1986). Domain technologist. Reference and methodical guide. Moscow: Metallurgiya, 263 p. [in Russian].
3. Kurunov, I.F. (1991). Evaluation of productivity and intensity of operation of blast furnaces of various sizes. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, no. 5, pp. 12-14 [in Russian].
4. Kurunov, I.F., Filatov, S.V. (2014). Evaluation of the efficiency of blast furnaces and prospects for blast furnace technology. *Metallurgist*, no. 5, pp. 44-47 [in Russian].
5. Mozharensko, N.M., Vishinskaya, E.D., Gorupaha, V.V. (2014). Tendencies of change the project profiles of blast furnaces in modern fuel-raw material conditions. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, iss. 29, pp. 52-63 [in Russian].
6. Reference journal "Metallurgy". 1977. Ref. 7B206. Blast furnace No. 3 by CSN "Sider Latinoamer". 1976, no. 200, pp. 72-81 [in Russian].
7. Kuznetsov, M.S., Kryachko, G.Yu., Sigarev, Ye.M. (2022). Changes in the design and operation of the accumulatory part of domain furnaces in the process improving fuel technology. *Theory and practice of metallurgy*, no. 1, pp. 5-14, doi: <https://doi.org/10.34185/tpm.1.2022.01> [in Ukrainian].
8. Koval'ski, V., Lungen, H.B., Shtrikker, K.P. (1999). Blast Furnace Sustainability: State of the Art and Campaign Extension Measures. *Black metals*, no. 9, pp. 26-35 [in Russian].
9. Sohatski, A.A. (2011). Improvement of heat and gas dynamic operation in the "dry" zone of a blast furnace, taking into account external heat losses. Candidate's thesis. Dnepropetrovsk, 193 p. [in Russian].
10. Kyun, K. (1963). The relationship between the profile of blast furnaces and their performance. *Black metals*, no. 12, pp. 34-36 [in Russian].
11. Byalyi, L.A., Kailov, V.D., Kostrov, V.A. et al. (1973). Study of reduction processes in a blast furnace with a volume of 2700 m³. *Steel*, no. 2, pp. 1068-1074 [in Russian].
12. Gimmel'farb, A.A., Volovik, G.A., Levchenko, V.E. (1987). Rational profile of a blast furnace and prospects for its development. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, no. 7, pp. 32-41 [in Russian].
13. Andronov, V.N., Saad Halid (2001). Optimization of technology for blast-furnace smelting on combined blast. *Black metals*, no. 7-8, pp. 25-30 [in Russian].
14. Yusfin, Yu.S., Chernousov, P.I., Golubev, O.V. (2005). Small volume furnaces — the future of blast furnace production? *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, no. 10, pp. 20-25 [in Russian].
15. Kryachko, G.Yu. (2001). On trends in the parameters of air lances. *Steel*, no. 7, pp. 11-15 [in Russian].
16. Kryachko, G.Yu. (2002). Evaluation of the quality of the blast and the technical work of the gas in the blast furnace process. *Black metals*, no. 10, pp. 11-16 [in Russian].
17. Sheremet, V.A. (2004). Development of blast-furnace production at the Krivorozhstal State Mining and Metallurgical Plant. *Sb. Tr. Mezhdunarodnoi nauchno-techicheskoi konferentsii*. Krivoi Rog, pp. 5-12 [in Russian].

18. Shatlov, V.A. (2004). Status of pig iron production and blast-furnace smelting technology in Russia. *Sb. Tr. Mezhdunarodnoi nauchno-techicheskoi konferentsii*. Krivoi Rog, pp. 22-26 [in Russian].
19. Tarasov, V.P. (1982). Gas dynamics of the blast-furnace process. Moscow: Metallurgiya, 222 p. [in Russian].
20. Kryachko, G.Yu. (2004). Establishment of the maximum possible consumption of blast in blast-furnace melting. *Black metals*, no. 3, pp. 11-14 [in Russian].
21. Manchinskii, V.G. (1974). Simulation of coke segregation processes in the tuyere zone of a blast furnace. *Steel*, no. 3, pp. 201-203 [in Russian].
22. Bugaev, K.M. (2006). Experimental-analytical study of heat and mass transfer in a blast furnace. In the book "Knowledge of blast furnace processes". Dnipropetrovsk: Porogi, pp. 190-206 [in Russian].
23. Bol'shakov, V.I., Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I. et al. (2014). Mastering energy-saving technology for loading a blast furnace equipped with a BZU in market-driven fuel and raw material and technological conditions. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, iss. 28, pp. 57-80 [in Russian].
24. Druzhkov, V.G., Vedeshkin, M.V., Podbornih, O.N. (1998). The outlines of the axial zone of slow-moving materials and the trajectory of the charge components in models of blast furnaces. *Steel*, no. 12, pp. 11-15 [in Russian].
25. Ovchinnikov, Yu.P., Moikin, V.I., Spirin, P.A., Bokovikov, B.P. (1989). Non-stationary processes and increasing the efficiency of blast-furnace smelting. Chelyabinsk: Metallurgiya, 120 p. [in Russian].

Received 27.03.2023

Summary

G.Yu. Kryachko, PhD (Engin.), Associate Professor, Associate Professor of Department, e-mail: krachkogennadij@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8773-508X>

Ye.M. Sigarev, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of Department, e-mail: en_sigarev@ua.fm, <https://orcid.org/0000-0002-8229-7877>

Dniprovsky State Technical University (Kamyanske, Ukraine)

Assessment of changes in productivity and limitations in forcing movement when increasing the volume of blast furnaces

The selection of the useful volume of new or reconstructed blast furnaces is an urgent task for both manufacturers and designers; therefore, the assessment of the technological capabilities of furnaces of different volumes has always been of interest from both a practical and a theoretical point of view. The purpose of the presented work is the selection of the most representative indicators, with the help of which a comparative assessment of the operation of furnaces of different volumes is possible, the evaluation of the operation of furnaces in the conditions of planned and market economies, as well as an attempt to determine and classify the factors limiting the forced operation of furnaces of increased volume.

It is shown that the use of indicators calculated per unit area furnace is not appropriate, since area furnace is not the main size furnace. The main size is full volume furnace, which determines design unit and amount of capital costs for its construction. Specific productivity indicators calculated per unit volume furnace similarly depend on the height furnace and adequately reflect performance of furnaces of different volumes.

The indisputable advantage of compact blast furnaces with a useful volume < 1500 m³ in comparison with furnaces of larger volumes is shown, which indicates imperfection of a simplified approach to evaluating performance of furnaces based on the concepts of balance and gas dynamic components, since it is difficult to take into account all the components when determining these components influencing factors.

Factors limiting process intensification in blast furnaces of medium and large volumes have been established and classified. The main external factors are the quality characteristics of coke, iron ore materials and blowing, more specifically, hot strength of coke, richness of raw materials in iron and the ability of air blowers to provide blowing with required degree of compression. The main structural solutions to overcome significant limitations in operation of furnaces with a useful volume > 1500 m³ are a rational profile, ratio of output cross-section of air nozzles and cross-section furnace, as well as the use of coneless loading devices.

Keywords

Blast furnace, volume, performance, benchmarks, limiting factors, process intensification.