

УДК 669.162

Г. Ю. Крячко<sup>1</sup>, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8773-508X  
Є. М. Сігарьов<sup>1</sup>, д.т.н., проф., ORCID 0000-0002-8229-7877  
А. А. Похвалітій<sup>1</sup>, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-9652-767X

<sup>1</sup>Дніпровський державний технічний університет

## ОСОБЛИВОСТІ ВИБОРУ ПАРАМЕТРІВ ЗАПЛЕЧИКІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

**Анотація.** Метою роботи є встановлення особливостей вибору параметрів заплечиків при проєктуванні нових і реконструкції діючих доменних печей. Розглянута зміна підходів до вибору параметрів заплечиків – кута нахилу стін  $\beta$  і їх висоти  $h_z$ . Показано, що на початку досліджуваного періоду раціональним діапазоном кута  $\beta$  вважався інтервал між  $79^\circ$  і  $82^\circ$  з різницею у три градуси. Наразі цей діапазон розширився здебільшого у бік менших значень і становить  $71-83^\circ$  з різницею у  $12^\circ$ , що більше у чотири рази, ніж в 50-х роках ХХ ст. Показано, що кут  $\beta$  слід узгоджувати, перш за все, за витратою дуття на кожну повітряну фурму, а згодом за складом доменного дуття. Це врахування повинно бути обов'язковим, оскільки одна фурма потужних печей об'ємом  $5000-5500 \text{ м}^3$  при однакових відносних витратах дуття на піч приймає його майже у два рази більше ніж фурма на печі об'ємом  $1033 \text{ м}^3$ . На основі аналізу стану стовпа шихти заморожених на ходу доменних печей встановлено, що висоту заплечиків слід визначати не від якості сировини, як було рекомендовано раніше, а від проєктної технології плавки і організації стовпа шихти. Внаслідок особливостей зміни роботи повітряних фурм і розвитку фурменних вогнищ зі збільшенням об'єму доменних печей існує обов'язкова необхідність відносного розширення розпару за рахунок поступового збільшення різниці діаметрів розпару і горна  $D-d_f$  з прийняттям заходів зі забезпечення відповідних розподілу матеріалів і формоутворення структури стовпа шихти. Для загальної оцінки параметрів заплечиків запропоновано показник – індекс заплечиків, який дорівнює співвідношенню кута нахилу стін до висоти заплечиків.

**Ключові слова:** доменна піч, заплечики, вибір, кут нахилу стін, висота, фурменне вогнище, структура стовпа шихти, розпар, розширення.

**Посилання для цитування:** Крячко Г. Ю., Сігарьов Є. М., Похвалітій А. А. Особливості вибору параметрів заплечиків доменних печей. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 105-120. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-105-120>

**Стан питання.** Заплечики – елемент профілю доменної печі, розташований між розпаром вгорі і горном внизу, багато в чому визначає експлуатаційні характеристики агрегату. Протягом ХХ століття і в сучасних умовах параметрам заплечиків – висоті і куту нахилу його стін приділялось багато уваги, починаючи з відомої в

дальньому зарубіжжі роботи М. О. Павлова [1] з продовженням дослідження теми на злам століть [2, 3] і в сучасних умовах [4, 5].

Спираючись на досвід експлуатації доменних печей обмеженого об'єму  $V_{\text{кор}} \leq 1300 \text{ м}^3$  в першій половині ХХ ст. М. О. Павлов рекомендував кути нахилу стін заплечиків  $\beta$  в межах  $82-80^\circ$ . Надалі небезпідставно вважалося [6], що вказаною рекомендацією, обґрунтованою досвідом роботи печей на сирих рудах і вапняку, було накладено відбиток на вибір раціонального кута заплечиків всієї лінійки типових профілів радянських проєктів, де  $\beta$  коливався в межах  $81-79^\circ$ . Незважаючи на це, ще на початку 2000-х років вказаний діапазон вважався раціональним, при цьому відмічалось [3], що кут нахилу стін заплечиків визначається їх висотою і різницею діаметрів розпару і горна. Є. Ф. Вегманом зі співавторами повідомлялося (2004 р.) про те, що зі збільшенням діаметру горна кут заплечиків не зменшують для попередження утворення застійних зон на периферії і кращого сходження шихти в центральній зоні, що набуває особливого значення на печах з більшими поперечними розмірами профілю.

В 70-ті роки ХХ ст. майже всі потужні доменні печі світу будувалися під впливом радянських ліцензій на профілі агрегатів об'ємом 1719, 2000 і 2700  $\text{м}^3$ , де кут  $\beta$  становив  $\sim 79^\circ$ . Винятком була лише ДП №1 Швельгерн з кутом заплечиків  $78^\circ$  [6]. Надалі, у 80-х роках, в Японії помічена тенденція до зменшення  $\beta$  до  $76^\circ$  [7], обумовлена спостереженням про те, що переважна більшість печей під кінець кампанії мала кут нахилу заплечиків  $74-76^\circ$ .

Проєкти печей ХХІ ст. передбачали збереження відносно великих кутів нахилу стін заплечиків: Японії  $75-80^\circ$ , Китаю  $77-81^\circ$ , Південної Кореї  $77^\circ$  [4]. В Україні на новобудовах Єнакієво і Запоріжжя кут  $\beta$  становив  $76-77^\circ$  [6]. Найменші значення  $\beta$  відносяться наразі до печей ФРН і Бразилії  $71-75^\circ$  [4, 6].

Можливо винятком є інформація В. М. Логінова зі співавторами (2007 р.) про збереження кута заплечиків у  $83^\circ 27' 23''$  на ДП №4 ПрАТ «Северсталь» об'ємом 2700  $\text{м}^3$ , прийнятого при першому капремонті ще у 1984 році. Тим не менше, і цей факт слід враховувати при оцінці діапазону змін цього кута в процесі удосконалення пічного профілю.

В одній із останніх робіт [4] китайські доменщики пропонують зменшувати кут заплечиків вітчизняних печей до  $73-75^\circ$ , за якого, на їх думку, стабілізується утворення гарнісажу і зменшиться знос заплечикових холодильників. Більше того, вони рекомендують зменшувати «еквівалентний» (від торця фурм до розпару) кут нахилу шляхом збільшенням висову фурм. Слід зазначити, що з такою рекомендацією погодитись не можна, оскільки збільшуючи висов фурм неминуче втрачаємо значний об'єм горна і низу заплечиків в результаті

посиленого гарнісажного утворення.

Що стосується вибору висоти заплечиків  $h_3$ , то рекомендації, висловлені у різні часи, досить неоднозначні. Так, М. О. Павлов [1] гадав, що потрібно комбінувати кут нахилу стін заплечиків з їх висотою так, щоби те та інше не виходило зі встановлених практикою меж. Більш конкретно той же автор вважав доцільним вибирати величину  $h_3$  відповідно до сировинних умов роботи печі – для проплавки важковідновлюваної руди треба збільшувати висоту заплечиків, при використанні легкоплавкої руди навпаки.

Якщо М. О. Павлов, посилаючись на досвід США, вважав нормальною і підходящою для всіх випадків практику висоту заплечиків у 3 м, то пізніше Г. Г. Орешкін [8], спираючись на радянський досвід вивчення робочих профілей печей, запропонував збільшити  $h_3$  до 6 м і зберегти постійною для лінійки агрегатів об'ємом від 800 до 2400 м<sup>3</sup>. При цьому кут заплечиків при збільшенні об'єму печей відповідно [8] повинен був зменшуватися від 80 до 74°.

Висота заплечиків може бути визначена трьома методами – геометричним за вибраними діаметрами розпару, горна і кутом нахилу стін заплечиків, статистичним на основі досвіду попереднього проєктування і знаходження зв'язків між змінним, наприклад корисним об'ємом і висотою заплечиків і, нарешті, технологічним з прив'язкою до механіки руху шихти та газів.

Радянські Діпромези висоту заплечиків майже всіх типових печей (крім об'ємом 3200 м<sup>3</sup>) визначали за відомим виразом:

$$h_3 = 0,5 \cdot (D - d_r) \cdot \operatorname{tg}(\beta),$$

де  $D$  і  $d_r$  - діаметри розпару і горна відповідно, м.

Такий «геометричний» підхід до визначення призвів до того, що профілі печей об'ємом 1033, 1719 і 2000 м<sup>3</sup> мали однакову висоту заплечиків при різних діаметрах горна 7,2; 9,1 і 9,75 м відповідно.

Інший погляд на питання, правда без аргументації, приведений в роботі [9], де стверджується, що діаметр горна визначає кут нахилу і висоту заплечиків і навпаки.

У згаданій вище роботі [9] розміщено дані про вибір параметрів заплечиків на заводі Фукуяма (табл. 1). Японські інженери уважно прислухались до рекомендацій М. О. Павлова [1] спочатку і вибрали кути заплечиків для печей власних проєктів в межах 81-82° (ДП №1 дві кампанії, ДП №2 перша кампанія). Практика показала хибність рішення прийнятих завищених кутів і від них відмовились вже в другу кампанію ДП №2 і наступних проєктах для більш потужних печей №3-5. Не можна не відмітити, що кути в радянських проєктах (крім печі 1513 м<sup>3</sup>) були більш прогресивними оскільки, на наш погляд, у визначеній мірі враховували зміну сировинних і експлуатаційних умов плавки.

Таблиця 1 – Вибір параметрів заплечників на заводі Фукуяма (Японія) за даними [9].

Показники	Ліцензій- ний профіль СРСР	ДП №1		Ліцензій- ний профіль СРСР	ДП №2		ДП №3	ДП №4	ДП №5
		Перша компанія	Друга компанія		Перша компанія	Друга компанія			
Корисний об'єм, м <sup>3</sup>	2000	2004	2323	2700	2626	2828	3016	4197	4617
Діаметр, м: горна $d_r$ розпару $D$	9,75	9,8	10,5	11,0	11,2	11,5	11,8	13,8	14,4
	10,5	10,8	11,6	12,3	12,0	12,7	13,0	15,2	15,0
$D-d_r$	0,75	1,0	1,1	1,3	0,8	1,2	1,2	1,4	1,5
$D/d_r$	1,08	1,10	1,10	1,12	1,07	1,10	1,10	1,10	1,10
Заплечники: кут нахилу $\beta$ , град висота $h_3$	79°09/ 3,0	81°51/ 3,5	81°30/ 3,7	79°10/ 3,4	82°27/ 3,5	80°47/ 2,7	80°16/ 3,5	80°04/ 4,0	80°06/ 4,3

На Фукуямі також провели порівняння роботи печей з високими заплечиками (3,7 м для ДП №1 другої кампанії) і суттєво заниженими (2,7 м ДП №2 друга кампанія). Надалі від занижених заплечиків відмовились і їх висота з підвищенням об'єму печей почала зростати (ДП №3 – ДП №5).

Таким чином в середині ХХ ст. раціональним проєктним діапазоном кутів нахилу стін заплечиків вважався інтервал між  $79^\circ$  і  $82^\circ$  з різницею у три градуси. Наразі цей діапазон розширився у бік менших значень і становить  $71-83^\circ$  з різницею в 12 градусів, що більше в чотири рази.

Залишається нез'ясованим, який фактор є визначальним при виборі різниці  $D-d_r$  або кута нахилу заплечиків, пов'язаного з цією різницею при проєктуванні печей різного об'єму. Відсутня відповідь на питання, чому фахівці навіть однієї країни, зокрема Японії, що працює на імпорتنій сировині високої якості, притримуються різних поглядів на вибір параметрів заплечиків? Як видно із табл. 1, проєктувальники орієнтувалися на дотримання співвідношення  $D/d_r$  в розмірі 1,10 поступово збільшуючи різницю  $D-d_r$  зі зростанням об'єму печей, яка і повинна бути визначальною при виборі параметрів заплечиків. Радянські печі об'ємом 3000 і 5000 м<sup>3</sup> мали однакове співвідношення  $D/d_r = 1,10$ , однак мали відмінні різниці  $D-d_r - 1,2$  і  $1,4$  м відповідно.

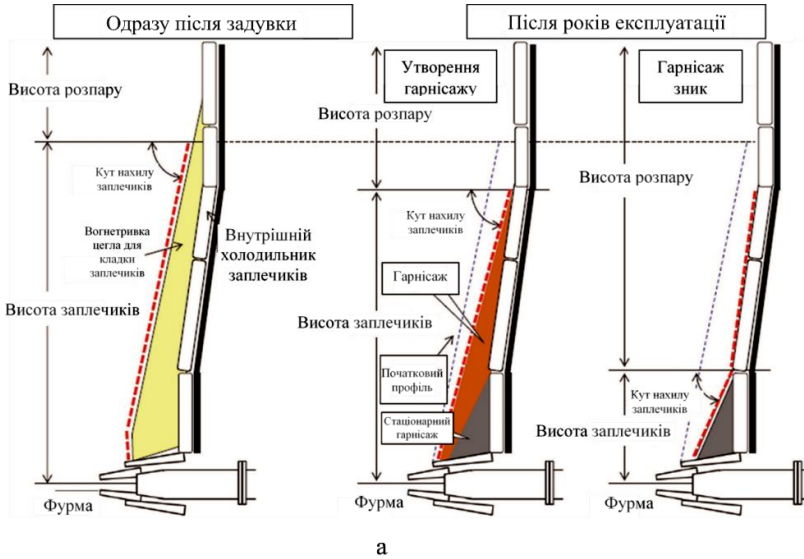
Не можна не згадати про суттєве протиріччя стосовно зміни висоти стін заплечиків в процесі експлуатації печей. Зокрема японські дослідники повідомляли [10] про суттєве зменшення не тільки висоти, але й кута нахилу стін заплечиків (рис. 1, а).

Негативним зрушенням зміни профілю печей в процесі зниження  $h_3$  дослідники вважали зростання висоти розпару навіть за рахунок, на їх погляд, конічних заплечиків (рис. 1, а, схема праворуч). Навпроти практика роботи колишніх радянських печей свідчила про зворотній вплив часу роботи печей після задувки на висоту заплечиків – їх висота на момент видувки сягала низу шахти (рис. 1, б), хоча зменшення кута нахилу стін заплечиків було теж помітним. Про зростання  $h_3$  з часом зокрема йшлося у згаданій вище монографії [8].

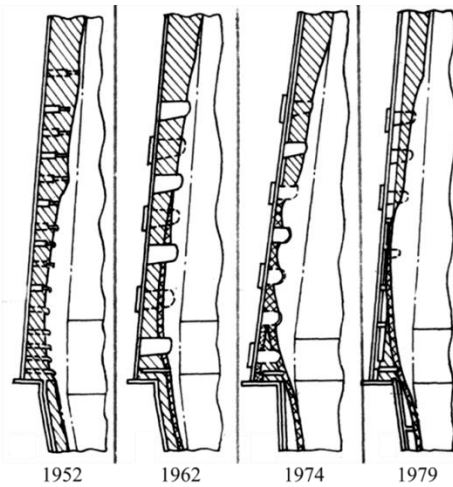
**Метою роботи** є встановлення особливостей вибору параметрів заплечиків при проєктуванні нових і реконструкції діючих доменних печей.

**Основні результати дослідження.** Передумовою для вирішення питання про вибір раціонального кута нахилу стін заплечиків з точки зору збереження футерівки і холодильників останніх від руйнування є врахування потужності фурменного вогнища за витратою дуття і, відповідно, за спаленим коксом з добавками. В табл. 2 приведені розрахункові дані витрати дуття на одну повітряну фурму при помірному форсуванні процесу, а саме 1,6 м<sup>3</sup>/хв на 1 м<sup>3</sup> корисного

об'єму печей у співставленні з кутами заплечиків типових проєктів.



а



б

Рисунок 1 – Зміна профілю заплечиків в процесі експлуатації доменних печей в Японії [10] (а) і в СРСР за М.М. Бабарікіним (б): цифрами під видувними профілями доменної печі об'ємом 1180 м<sup>3</sup> показані роки видувки на ремонти.

Таблиця 2 – Витрата дуття на одну повітряну фурму при питомій витраті 1,6 м<sup>3</sup>/хв на 1 м<sup>3</sup> об'єму типової печі з реконструктивним збільшенням кількості фурм в порівнянні з проектними кутами заплечиків.

Об'єм	Кількість фурм	Витрата дуття, м <sup>3</sup> /хв		$\beta$ , град
		на піч	на фурму	
1033	16	1653	103	80 <sup>0</sup> 32'15//
1386	18	2218	123	80 <sup>0</sup> 14'51//
1513	20	2421	121	81 <sup>0</sup> 07'10//
1719	20	2750	138	79 <sup>0</sup> 35'40//
2000	22	3200	145	79 <sup>0</sup> 09'00//
2300	22	3680	167	79 <sup>0</sup> 22'49//
2700	24	4320	180	79 <sup>0</sup> 10'38//
3000	28	4800	171	79 <sup>0</sup> 22'49//
3200	30	5120	171	80 <sup>0</sup> 49'
5000	42	8000	190	79 <sup>0</sup> 13'17//
5500	40	8800	220	79 <sup>0</sup> 17'13//

Із табл. 2 видно, що поступове нарощування об'єму печей при однаковій відносній витраті дуття супроводжувалось суттєвим зростанням витрати дуття крізь одну фурму. Так, в наведеному прикладі кожна фурма потужних печей об'ємом 5000-5500 м<sup>3</sup> приймала дуття в 1,8-2,1 рази більше, ніж фурма на печі об'ємом 1033 м<sup>3</sup>. Відповідно зростання витрати дуття підвищувався вихід гарячих фурменних газів і їх вплив на огороження печі. Якщо ж зважити на той факт, що первинні проекти типових радянських печей відрізнялися заниженою кількістю повітряних фурм (наприклад печі об'ємом 2000, 2300 і 2700 м<sup>3</sup> мали по 20 фурм) то кожне збільшення об'єму печей супроводжувалось створенням проблем зі збереженням огороження заплечиків, стійкості гарнісажу і самих повітряних фурм. Як видно з наведених в таблиці кутів заплечиків, реакція проектувальників на негативні явища була відсутньою.

Крім зростаючої витрати дуття на одну фурму зі збільшенням об'єму печей ознаки суттєво зруйнованих заплечиків другого ряду спостерігались навіть на печах однакового об'єму (див. рис. 1, б, видувні профілі 1974 і 1979 рр.). Руйнування заплечиків в ці роки і надалі було обумовлене активним впровадженням комбінованого дуття так званих високих параметрів, в якому концентрація кисню досягала 30-35%. Намагання подовжити термін служби заплечиків призвело до впровадження плитових холодильників з двома рядами охолоджуючих змійовиків [11], але відсутність дієвого контролю за процесом утворення гарнісажу на таких холодильниках іноді призводила до небажаних результатів.

Тільки після повсюдного впровадження пиловугільної технології і

різкого погіршення стану огороження доменних печей було звернуто увагу на вибір раціонального кута заплечиків [6].

Таким чином при виборі кута нахилу заплечиків слід, перш за все, враховувати потужність фурменного вогнища за витратою дугтя, а також параметри дугтя, які визначають температурний і газодинамічний режими біля огороження заплечиків.

Для виявлення причин існування різного стану заплечиків в процесі кампанії печей розглянули структуру охолоджених на ходу промислових доменних печей, що мали відмінності у формуванні пластичної зони (ПЗ). У відповідності зі загальноприйнятими поглядами на формування ПЗ перетини «заморожених» печей розміщені на рис. 2 в порядку від небажаної «ваграночної» V-подібної до оберненої Λ-подібної, що уособлює осьовий хід печі і збереження її огороження від дії високих температур. Додаткова інформація про результативність та ефективність роботи відібраних печей надана в табл. 3.

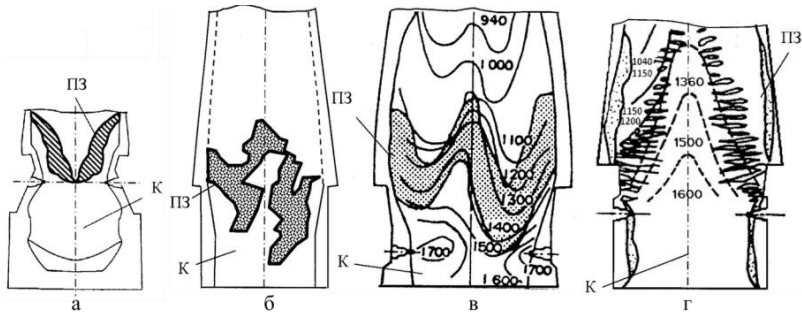


Рисунок 2 – Вплив форми пластичної зони на розміщення її периферійного кореня відносно профілю заморожених на ходу доменних печей за даними досліджень [12-14]: а – Єнакієвський металургійний завод, ДП №1 (СРСР); б – завод в Хукінгені, ДП №5 (Німеччина); в – завод в Кукіока, ДП №4 (Японія); г – завод в Хірохата, ДП № 1 (Японія); ПЗ – пластична зона; К – кокс; цифри біля кривих – температура, °С.

Вивчення структури стовпа шихти ДП №1 Єнакієвського заводу проводили з однієї сторони в радіальному напрямку від стін до центру печі, тому на рисунку припустили осесиметричність ПЗ (рис. 2, а). Шихтові та експлуатаційні умови роботи цієї печі були далекі від сучасних (витрата коксу 920 кг/т чавуну, питома продуктивність лише 18,1 т/м<sup>2</sup>доб, див. табл. 3). Різкий периферійний хід печі зі забитим центром обумовив форму пластичної зони в перетині у вигляді букви V і підняття її периферійного кореня до низу шахти.



Таблиця 3 – Показники роботи до зупинки заморожених доменних печей за даними робіт [12-14].

Показники	Країна, завод, номер печі			
	СРСР, Єнакієвський, №1	ФРН, Хукінген, №5	Японія, Кукіока, №4	Японія, Хірохата, №1
Діаметр горна, м	4,8	7,0	7,9	7,8
Корисний об'єм, м <sup>3</sup>	426	н.д.	1280	1407
Питома продуктивність, т/м <sup>2</sup> ·доб	18,1	47,6	43,3	53,2
Витрата палива, кг/т чавуну	920	516	477	542
Рудне навантаження, т/т	2,43	3,47	3,93	3,12
Коефіцієнт рівня технології*, т/м <sup>2</sup> ·год	0,82	3,84	3,78	4,09

\* Коефіцієнт рівня технології дорівнює відношенню питомих продуктивності (т/м<sup>2</sup>·год) і витрати палива (т/т чавуну).

Експлуатація ДП №5 заводу в Хукінгені і №4 заводу Кукіока з ПЗ в перетині у вигляді букви W (рис. 2, б, в) сприяла зменшенню інтенсивності периферійного газопотоку, посиленню осьового і зниженню периферійного кореня ПЗ до розпару. На обох печах спостерігалось суттєва несиметричність ПЗ відносно осі печей. Тим не менш показники роботи розглянутих печей, незважаючи на зношеність агрегатів і обладнання перед зупинкою на ремонті, були цілком прийнятними. Так, на ДП №4 Кукіока була реалізована технологія форсування процесу підвищення рудного навантаження (3,93) при зниженні інтенсивності горіння палива (0,773 т/м<sup>3</sup>·доб) і, відповідно, продуктивності печі.

В іншому випадку (рис. 2, г) на ДП №1 Хірохата для забезпечення високої газопроницності стовпа шихти була утворена Λ-подібна ПЗ за рахунок утворення потужного осьового газового потоку і збільшення поверхні коксових вікон в зоні для пропуску підвищеної кількості горнових газів. В результаті процес форсували дуттям (інтенсивність горіння палива зросла до 1,004 т/м<sup>3</sup>·доб) при суттєво меншому рудному навантаженні (3,12). Продуктивність печі зросла до 53,2 т/м<sup>2</sup>·доб і, головне, різко змінилися умови роботи огороження печі – послаблення периферійного газопотоку змістило периферійний корінь ПЗ в заплечики.

Таким чином показано, що на стан заплечиків, перш за все, на їх зростання вгору або зниження, впливає прийнята технологіями організація структури стовпа шихти. При формоутворенні ПЗ типів V і W висота заплечиків зростає за рахунок розпалу футерівки розпару [8],

що і спостерігалось на радянських печах (див. рис. 1, б).

При опусканні периферійного кореня ПЗ типу  $\Lambda$  униз заплечиків над цим коренем при помірних для надфурменної області температурах 1100-1170 °С зростає інтенсивність стирання шихтою футерівки, а згодом і гарнісажу, утвореного на її місці, внаслідок чого висота заплечиків знижується. Таке явище за схемою, показаною на рис. 1, а, і відбувається в японській практиці на печах з проектним кутом заплечиків 78-79°.

Обпирання периферійного кореня ПЗ на пологі стіни заплечиків зі зменшеним в результаті руйнування футерівки і гарнісажу кутом нахилу створює ускладнення обробки залізородних матеріалів в корені ПЗ і взагалі роботи печі з  $\Lambda$  - подібною формою цієї зони. Для відновлення проектних висоти і кута заплечиків автори [10] запропонували в просторі між стиком рядів плитових мідних холодильників і фурменних холодильників встановлення горизонтальних мідних пластинчастих і сигароподібних холодильників (рис. 3).

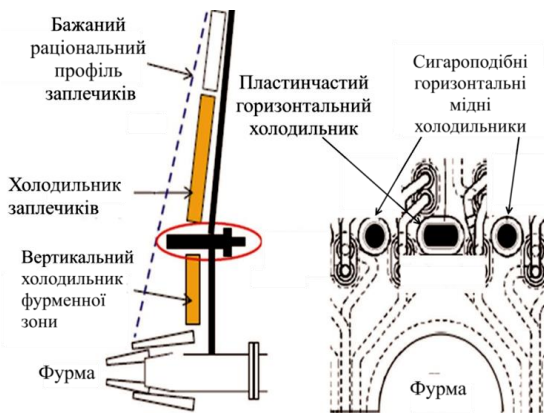


Рисунок 3 – Комбінація вертикальних і горизонтальних холодильників фурменної зони і заплечиків для відтворення потрібних куту нахилу і профілю заплечиків, запропонованих фірмою Nippon Steel Corporation [10].

Така комбінація вертикальних і горизонтальних холодильників заплечиків дозволила утворити гарнісажні кармани – верхній – між розпаром і горизонтальними холодильниками і нижній – між згаданими вище холодильниками і фурменними холодильниками. Повідомлялося про покращення роботи і продуктивності ДП №4 Kimitsu (третя кампанія) і ДП №2 Oita (третя кампанія) після впровадження комбінованої системи охолодження заплечиків.

Щодо особливості японської технології плавки з розміщенням периферійного кореня пластичної зони в нижній частині або в середині заплечиків (див. рис. 2, г), то слід підкреслити два позитивних явища, викликані цією особливістю. По перше, внаслідок суттєвого опору

периферійний корінь ПЗ відразу відхилює потік фурменних газів від стін до центру, що є неможливим у випадку, коли заплечики заповнені тільки коксом. По друге, внаслідок поглинання тепла на плавлення залізородних матеріалів периферійного когезійного кореня знижується температура газів, що виходять з коксових вікон кореня. В свою чергу це знижує ступінь руйнування заплечикових футерівки або гарнісажу.

Показовим прикладом (рис. 4) впливу форми і місця розташування ПЗ в робочому просторі на розподіл температур біля стін є ДП №1 заводу Амагасакі (Японія, [15]), заморожена зі застосуванням спеціальних залізородних обкотишів, за станом яких в процесі розбирання стовпа шихти існувала можливість визначити розподіл температур.

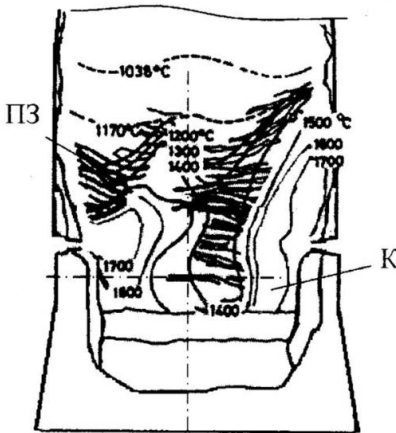


Рисунок 4 – Вплив форми і місця розміщення пластичної зони на розподіл температур в робочому просторі ДП №1 заводу Амагасакі [15]: позначення ті ж, що і на рис. 2.

Несиметричність ПЗ на досліджуваній печі обумовлена нерівномірністю розподілу дуття по фурмам та іншими факторами. На рис. 4 ліворуч периферійний корінь когезійної зони знаходився внизу заплечиків внаслідок чого над зоною в розпарі температура газу складала біля 1170 °С. Периферійний корінь ПЗ праворуч знаходився внизу шахти і температура біля зруйнованого огороження заплечиків складала 1600-1700 °С.

Умови служби огороження заплечиків доменних печей України суттєво відрізняються. Печі обладнані переважно конусними засипними пристроями, проплавляють залізородну сировину вітчизняних виробників з використанням коксу не завжди задовільної гарячої міцності. Тому форма ПЗ на цих печах зазвичай W-подібна, а периферійний її корінь знаходиться або внизу шахти [16], або, в кращому разі, в розпарі. Внаслідок цієї обставини заплечики заповнюються газопроникним коксом і потерпають від впливу високих

температур, «гасіння» яких припадає на нижні горизонти шахти. Виходом зі становища, що склалося є перегляд відношення до стану підготовки шихтових матеріалів і заміна на капітальних ремонтах печей конусних засипних пристроїв на безконусні.

На рис. 5 показані зміни параметрів заплечиків в процесі нарощування корисного об'єму типових радянських печей.

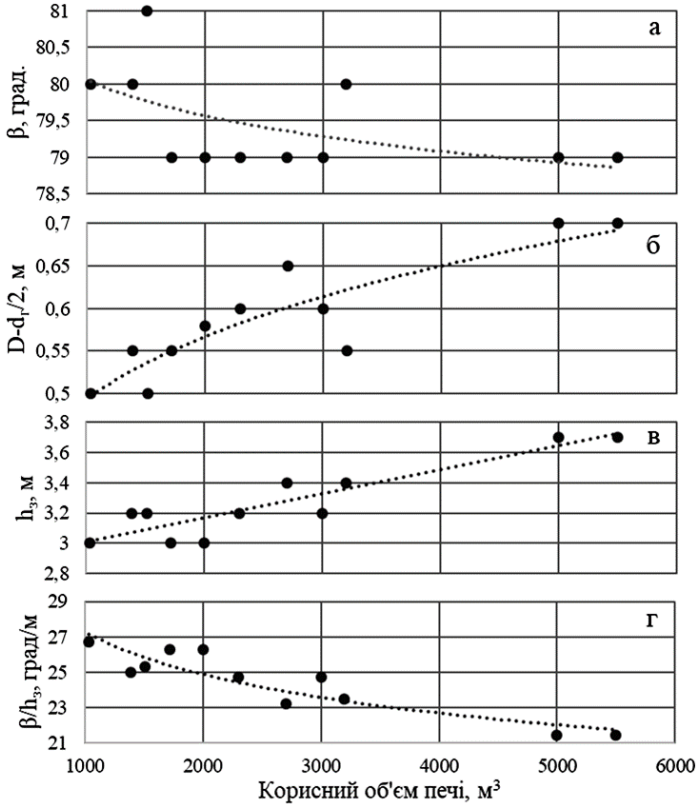


Рисунок 5 – Зміни кута нахилу стін заплечиків,  $\beta$  (а), напіввізниць діаметрів розпару і горна,  $D-d_i/2$  (б), висоти заплечиків,  $h_3$  (в) та індексу заплечиків,  $\beta/h_3$  (г) зі зростанням корисного об'єму типових радянських доменних печей.

До відомих параметрів додано запропонований нами показник – індекс заплечиків, який дорівнює співвідношенню кута нахилу стін  $\beta$  до висоти заплечиків  $h_3$ . Сутність індексу полягає в оцінці кількості градусів нахилу, що приходяться на 1 м висоти заплечиків.

Дані, наведені на рис. 5, б, свідчать про невизначеність з вибором

напіврізниці  $(D-d_r)/2$  в перших чотирьох проєктах від 1033 до 1719 м<sup>3</sup> включно, а також в проєкті 3200 м<sup>3</sup>. Звертає на себе увагу невизначеність у виборі висоти заплечиків в семи проєктах від 1033 до 2300 м<sup>3</sup> і 3200 м<sup>3</sup>, в яких  $h_3$  практично не залежить від об'єму печей (рис. 5, в). Помітне зменшення індексу  $\beta/h_3$  (рис. 5, з) до 21,4 град/м спостерігається для печей об'ємом 2700, 3200, 5000 і 5500 м<sup>3</sup> завдяки зрушенню у збільшенні висоти заплечиків до 3,4-3,7 м в порівнянні з меншими агрегатами. Не можна не відмітити деяку наступність в розвитку профілю – перша в світі доменна піч, яка в світовій металургії мала діаметр горна, що перевищував діаметр колошника (ДП №4 фірми Іллінойс об'ємом 662 м<sup>3</sup>, США, 1914 р.) мала індекс  $\beta/h_3$  21,4 град/м [5]. Тенденція до зменшення індексу зі зростанням корисного об'єму печей спостерігалось вже в 70-х – 80-х роках ХХ ст. (див. табл. 1, рис. 5, з). В сучасних умовах внаслідок суттєвого зменшення  $\beta$  і збільшення  $h_3$  на потужних печах індекс заплечиків досяг позначок 18-19 град/м.

### Висновки

За період, що минув з середини ХХ ст., розглянута зміна підходів до вибору параметрів заплечиків – кута нахилу стін  $\beta$  і їх висоти  $h_3$ . Показано, що на початку досліджуваного періоду раціональним діапазоном кута  $\beta$  вважався інтервал між 79 і 82° з різницею у три градуси. Наразі цей діапазон розширився здебільшого у бік менших значень і становить 71-83° з різницею у 12°, що більше у чотири рази, ніж в 50-х роках ХХ ст.

Показано, що кут  $\beta$  слід узгоджувати, перш за все, за витратою дуття на кожную повітряну фурму, а затим за складом доменного дуття. Це враховування повинно бути обов'язковим. Оскільки одна фурма зі зростанням об'єму печей повинна приймати дуття більше, ніж піч меншого об'єму.

На основі аналізу стану стовпа шихти заморожених на ходу доменних печей встановлено, що висоту заплечиків слід визначати не від якості сировини, як було рекомендовано раніше, а від проєктної технології плавки і організації стовпа шихти. Сировина при виборі  $h_3$  має вторинне значення, оскільки впливає на спосіб реалізації доменного процесу.

Показано, що при виборі параметрів заплечиків слід орієнтуватися не на співвідношення  $D/d_r$ , як було раніше, а на різницю цих діаметрів.

Внаслідок особливостей зміни роботи повітряних фурм і розвитку фурменних вогнищ, зі збільшенням об'єму доменних печей існує об'єктивна необхідність відносного розширення розпару за рахунок поступового збільшення різниці  $D-d_r$  з прийняттям заходів зі забезпечення відповідних розподілу матеріалів і формоутворення структури стовпа шихти.

Для загальної оцінки параметрів заплечиків запропоновано показник – індекс заплечиків, який дорівнює співвідношенню кута нахилу стін до висоти заплечиків. Відмічена тенденція до зменшення значень індексу для нових і реконструйованих доменних печей завдяки як зменшенню  $\beta$ , так і збільшенню  $h_3$ .

### Перелік посилань

1. Pavlov M. A. *Metallurgy of Pig Iron*. Vol. 3, Verlag Technic, Berlin, 1953, 95 p.
2. Effect of Blast Furnace. Profile on Inner Furnace States / T. Inada, K. Takata, K. Takatani, T. Yamamoto // *ISIJ International*. 2003. Vol. 43, No. 7, pp. 1003-1010.
3. Плискановский С. Т., Полтавец В. В. Оборудование и эксплуатация доменных печей : учебник. Днепропетровск : Пороги, 2004. 496 с.
4. Research on low-carbon smelting technology of blast furnace – optimized design of blast furnace / Z. Y. Guo, J. L. Zhang, K. X. Jiao, T. L. Gao, Y. B. Zong, I. Zhang // *Ironmaking & Steelmaking*. 2021. Vol. 48. No. 6. P. 685-692.
5. Крячко Г. Ю., Сігарьов Є. М. Конструкції металургійних агрегатів. Частина 1. Конструкції доменних печей : монографія / Кам'янське : ДДТУ, 2023. 275 с.
6. Можаренко Н. М., Вышинская Е. Д., Горупаха В. В. Тенденции изменения проектных профилей доменных печей в современных условиях // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. Вып. 29. С. 52-63.
7. Krol L. *Konstrukcja i urzadzenia wielkiego pieca*. Katowice, wydawnictwo «Slask», 1989. 481 p.
8. Орешкин Г. Г. *Вопросы рационализации работы доменных печей*. Харьков : Металлургиздат, 1960. 189 с.
9. Anil K. Biswas *Principles of Blast Furnace Ironmaking*. Brisbane. Australia Cootha publishing house, 1981. p. 528.
10. Latest Plant Engineering of Blast Furnace / A. Shiga, M. Suzuki, T. Manchu, S. Miyaoka, H. Iida // *Nippon Steel Technical Report*. No 123. March 2020. P. 141-147.
11. Влияние интенсивности охлаждения заплечиков на работу доменной печи / Н. Я. Койда, Г. Ю. Крячко, В. И. Тимошенко и др. // *Металлург*. 1980. №4. С. 16-19.
12. *Фазовые превращения материалов при доменной плавке* / Балон И. Д., Буклан И. З., Муравьев В. Н., Никулин Ю. Ф. М. : Металлургия, 1984. 152 с.
13. Гуденау Г.-В. Исследования на охлажденных доменных печах в Японии / Гуденау Г.-В., Сасабе М., Крайбих К. // *Черные металлы*. 1977. № 6-7. С. 13-17.
14. Грабе К. Поведение шихтовых материалов при размягчении в «замороженной» азотом доменной печи и его влияние на расход кокса / Грабе К., Де Хаас Г. // *Черные металлы*. 1986. № 5. С. 25-32.
15. Доклад о разборке содержимого доменной печи №1 завода Амагасаки / К. Нарита, Т. Сато, М. Маекава [и др.] // *Тецу то Хагане*. 1980. №13. С. 1975-1984.
16. Метод визначення положення і форми пластичної зони в доменній печі

з використанням показників розподілу температури газового потоку / І. Г. Муравйова, М. Г. Іванча, В. Р. Щербачов та ін. // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 95-105.

### References

1. Pavlov, M. A. (1953). *Metallurgy of Pig Iron*. Vol. 3, Verlag Technic
2. Inada, T., Takata, K., Takatani, K., & Yamamoto, T. (2003). Effect of Blast Furnace. Profile on Inner Furnace States. *ISIJ International*, 43 (7), 1003-1010
3. Pliskanovskii, S. T., Poltavets, V. V. (2004). *Oborudovanie i ekspluatatsiia domennykh pechei [Equipment and operation of blast furnaces]: uchebnik*. Porogi
4. Guo, Z. Y., Zhang, J. L., Jiao, K. X., Gao, T. L., Zong, Y. B., & Zhang, I. (2021). Research on low-carbon smelting technology of blast furnace – optimized design of blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*, 48 (6), 685-692
5. Kryachko, G. Yu., & Sigarev, E. N. (2023). *Constructions of metallurgical units. Part 1. Designs of blast furnaces*. DDTU
6. Mozhareno, N. M. Vyshinskaia, E. D., & Gorupakha, V. V. (2014). Trends in changes in the design profiles of blast furnaces in modern conditions. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 29, 52-63
7. Krol, L. (1989). *Konstrukcja i urzadzenia wielkiego pieca*. Katowice, wydawnictwo "Slask"
8. Oreshkin, G. G. (1960). *Voprosy ratsionalizatsii raboty domennykh pechei [Issues of rationalizing the operation of blast furnaces]*. Metallurgizdat
9. Anil, K. (1981). *Biswas Principles of Blast Furnace Ironmaking*. Brisbane. Australia Cootha publishing house
10. Shiga ,A., Suzuki, M., Manchu, T., Miyaoka, S., & Iida, H. (2020). Latest Plant Engineering of Blast Furnace. *Nippon Steel Technical Report*, March 2020, 123, 141-147
11. Koida, N. Ia., Kriachko, G. Yu., Timoshenko, V. I. et al. (1980). Vliianie intensivnosti okhlazhdeniia zaplechikov na rabotu domennoi pechi. [Influence of shoulder cooling intensity on blast furnace operation]. *Metallurg*, 4, 16-19
12. Balon, I. D., Buklan, I. Z., Muravev, V. N., & Nikulin, Iu. F. (1984). *Fazovye prevrashcheniia materialov pri domennoi plavke*. [Phase transformations of materials during blast-furnace melting]. Metallurgiiia [Metallurgy]
13. Gudenau, G.-V., Sasabe, M., & Kraibikh, K. (1977). Issledovaniia na okhlazhdennykh domennykh pechakh v Iaponii. [Research on chilled blast furnaces in Japan]. *Chernye metally [Ferrous metals]*, 6-7, 13-17
14. Grabe, K., De Khaas, G. (1986). Povedenie shikhtovykh materialov pri razmiagchenii v zamorozhennoi azotom domennoi pechi i ego vliianie na raskhod koksa. [Behavior of charge materials during softening in a blast furnace “frozen” with nitrogen and its effect on coke consumption]. *Chernye metally*. [Ferrous metals], 5, 25-32
15. Narita, K., Sato, T., Maekava, M. et al. (1980). Doklad o razborke sodержimogo domennoi pechi I zavoda Amagasaki. [Report on the dismantling of the contents of the blast furnace No. 1 of the Amagasaki plant]. *Tetsu to Khagane*, 13, 1975-1984
16. Muraviova, I. H., Ivancha, M. H., Shcherbachov, V. R. et al (2022). The method of determining the position and shape of the plastic zone in the blast furnace

using the parameters of the temperature distribution of the gas flow. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 36, 95-105

**H. Yu. Kryachko**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-8773-508X

**Ye. M. Siharov**<sup>1</sup>, D. Sc. (Tech.), Professor, ORCID 0000-0002-8229-7877

**A. A. Pokhvalityi**<sup>1</sup>, Ph. D. (Tech.), Associate Professor, ORCID 0000-0002-9652-767X

<sup>1</sup> *Dniprovsky State Technical University*

### **FEATURES CHOICE PARAMETERS SHOULDERS OF BLAST FURNACES**

**Abstract.** The purpose of the work is to establish the peculiarities of the selection of shoulder parameters in the design of new and reconstruction of existing blast furnaces. The change of approaches to the selection of the parameters of the shoulders is considered - the angle of inclination of the walls  $\beta$  and their height  $h_z$ . It is shown that at the beginning of the studied period, the interval between  $79^\circ$  and  $82^\circ$  with a difference of three degrees was considered the rational range of the angle  $\beta$ . Currently, this range has expanded mostly towards smaller values and is  $71^\circ$ - $83^\circ$  with a difference of  $12^\circ$ , which is four times more than in the 1950s. It is shown that the angle  $\beta$  should be adjusted, first of all, according to the flow rate of each air nozzle, and then according to the composition of the blast furnace. This consideration should be mandatory, since one tuyere of powerful furnaces with a volume of  $5000$ - $5500$  m<sup>3</sup> at the same relative blowing costs per furnace takes almost twice as much as a tuyere on a furnace with a volume of  $1033$  m<sup>3</sup>. Based on the analysis of the condition of the charge column of blast furnaces frozen in progress, it was established that the height of the shoulders should be determined not by the quality of raw materials, as was recommended earlier, but by the design technology of melting and the organization of the charge column. As a result of the changes in the operation of air nozzles and the development of nozzle hearths with an increase in the volume of blast furnaces, there is an objective need for a relative expansion of the gap due to a gradual increase in the difference  $D-d_g$  with the adoption of measures to ensure the appropriate distribution of materials and the formation of the structure of the charge column. For the general evaluation of the parameters of the shoulders, an indicator is proposed - the index of the shoulders, which is equal to the ratio of the angle of inclination of the walls to the height of the shoulders.

**Key words:** blast furnace, shoulders, choice, angle of inclination of walls, height, tuyere hearth, structure of charge column, spacer, expansion.

**For citation:** Kryachko H. Yu, Siharov Ye. M., & Pokhvalityi A. A. (2023). Features choice parameters shoulders of blast furnaces. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 105-120. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-105-120>

*Стаття надійшла до редакції збірника 04.09.2023 р.*

*Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 19.12.2023 р.)*

*"Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії". 2023. Випуск 37  
"Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy". 2023. Collection 37*