

УДК 669.162

<https://doi.org/10.34185/tpm.1.2022.01>

Кузнецов М.С., Крячко Г.Ю., Сігарьов Є.М.

Зміни у проектуванні і роботі накопичувальної частини доменних печей в процесі удосконалення технології плавки

Kuznetsov M., Kryachko G., Sigarev E.

Changes in the design and operation of the accumulatory part of domain furnaces in the process improving fuel technology

Метою роботи є виявлення змін в проектуванні і роботі накопичувальної частини доменних печей, обумовлених удосконаленням технології плавки, а також зростанням потужності і питомої продуктивності агрегатів. Методика дослідження заснована на використанні нового підходу до оцінки технологічних можливостей горна і накопичувальної частини доменних печей при вивченні проектною і практичною інформації з профілювання печей за період часу, характерний динамічним розвитком конструкцій агрегатів і технології виплавки чавуну. Результати досліджень. Запропоновані характеристики технологічних можливостей горна і накопичувальної частини печі, а також критерії для оцінки цих характеристик – частки об'єму накопичувальної частини, що приходяться на одну повітряну фурму $V_{нч}/n_{ф}$, потужність однієї повітряної фурми і відношення до протиточної частини печі об'єм зумпфу $V_{зум}/V_{пр}$. Показано, що при проектуванні і експлуатації доменних печей бажано підтримувати критерії $V_{нч}/n_{ф}$ і $V_{нч}/n_{chl}$ на мінімально можливому рівні, а критерії потужності повітряної фурми і $V_{зум}/V_{пр}$ на максимальному. Встановлено тенденцію гальмування нарощування висоти горна зі збільшенням корисного об'єму печей. На сучасних печах на кожні додаткові 1000 м^3 корисного об'єму висота горна зростає в середньому на 9%. Показано, що випереджаюче зростання глибини зумпфу у порівнянні з іншими розмірами профілю обумовлено не тільки його конструкційною функцією, але й суто технологічними, а саме чавун зумпфу від'єднує коксову насадку від лежачі, що унеможливорює утворення течевого шару на осіданнях при розкладанні ходу печі, створює запас тепла, чим збільшує інерційність доменного процесу, а також приймає участь в циклі накопичення і випуску продуктів плавки. Оскільки зумпф є частиною робочого простору печі запропоновано змінити підхід до визначення повної і корисної висоти доменної печі. Більш конкретно повною висотою слід вважати відстань від лежачі до верхньої кромки опорного кільця (фланця) кожуху колошника, а корисною – до конуса або лотка засипного пристрою в нижньому робочому положенні.

Наукова новизна роботи полягає у обґрунтуванні нових принципів підходу до оцінки технологічних можливостей горна і накопичувальної частини доменних печей, а також обґрунтуванні необхідності вважати зумпф або мертвий шар шостим елементом профілю.

Практична зачімність роботи полягає в розробці рекомендацій щодо напрямку змін в конструкції горна і накопичувальної частини доменних печей при проектуванні нових і модернізації існуючих агрегатів, а також у новому підході до визначення корисної і повної висоти профілю печі.

Ключові слова: доменна піч, накопичувальна частина, горн, зумпф, зміна, критерії, технологічна можливість, елемент профілю, висота печі.

The purpose is the detection of changes in the design and operation of the storage part of blast furnaces, due to improvements in smelting technology, as well as increasing power and specific productivity of units.

The methodology based on the use of a new approach to assessing the technological capabilities of the furnace and storage part of blast furnaces in the study of design and practical information on the profiling of furnaces over a period of time characterized by dynamic development of units and cast iron smelting technology.

Findings The proposed characteristics of the technological capabilities of the furnace and the storage part of the furnace, as well as criteria for assessing these characteristics - the share of the storage part per air lance V_{nch}/n_f , the power of one air lance and the relative to the counter-current part of the furnace V_{nch}/V_{pr} . It is shown that in the design and operation of blast furnaces it is desirable to maintain the criteria V_{nch}/n_f and V_{nch}/n_{chl} at the lowest possible level, and the criteria of air lance power and V_{zum}/V_{pr} at the maximum. There is a tendency to slow down the height of the furnace with increasing the useful volume of the furnaces. In modern furnaces, for every additional 1000 m^3 of usable volume, the height of the furnace increased by an average of 9%. It is shown that the outstripping increase in the depth of the sump in comparison with other dimensions of the profile is due not only to its structural function, but also purely technological, namely the sump cast iron heat, which increases the inertia of the blast furnace process, and also participates in the cycle of accumulation and release of smelting products. Since the sump is part of the working space of the furnace, it is proposed to change the approach to determining the complete and useful height of the blast furnace. More specifically, the full height should be considered the distance from the ladder to the upper edge of the support ring (flange) of the grate cover, and useful - to the cone or tray of the backfill device in the lower working position.

The study's originality is to justify the new principles of the approach to assessing the technological capabilities of the furnace and storage part of blast furnaces, as well as to justify the need to consider the sump or dead layer as the sixth element of the profile.

The practical value is to develop recommendations on the direction of changes in the design of the furnace and storage part of blast furnaces in the design of new and modernization of existing units, as well as a new approach to determining the useful and complete height of the furnace profile.

Keywords: blast furnace, storage part, furnace, sump, change, criteria, technological capability, profile element, furnace height.

Вступ

Профіль – внутрішній обрис робочого простору доменної печі є вирішальним елементом при про-

ектуванні нових або реконструюванні існуючих агрегатів. Від параметрів профілю багато в чому залежить ефективність і результативність доменної

Кузнецов М.С. – ДДУ
Крячко Г.Ю. – к.т.н., ДДУ
Сігарьов Є.М. – д.т.н., ДДУ

Kuznetsov Maksim - DSTU
Kryachko Genadii – c.t.s., DSTU
Sigarev Evgen – d.t.s., DSTU

плавки, а також тривалість безаварійної експлуатації печі. Тому, в процесі удосконалення доменної технології відбуваються суттєві зміни у розмірах і співвідношеннях розмірів окремих елементів профілю.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

В 70-80-х роках ХХ століття у фахових виданнях колишнього СРСР була розгорнута широка дискусія з приводу розвитку профілю. Рівень публікацій був досить різним – від схвалення радянської системи проектування профілю [1] до принципової обґрунтованої критики завищення висоти протитоккової частини печей [2, 3], і невідповідності ємкості горна об'єму протитоккової частини робочого простору [2, 4].

З часу проведення дискусії минуло більш ніж три десятиліття. За цей час у світовій металургії значно зріс середній об'єм збудованих та реконструйованих доменних печей, повсюдно відбувся перехід з вдування газоподібних та рідких замінників коксу на пилувугільне паливо.

Тому і сьогодні дослідження змін у профілюванні печей нового покоління не втратило актуальності. Особливо це стосується накопичувальної частини профілю доменних печей, зони завершення формування і накопичення продуктів плавки. Ця частина – металоприймач представлена горном і зумпфом (мертвим шаром) – ємкістю, що розміщується між віссю чавунної льотки і лещаддю, більш конкретно між рівнем виходу каналу чавунної льотки в зумпфі і лещаддю [5].

Автори роботи [6] показали, що спливання коксової насадки на лещаді відбувається за умови, коли критична глибина зумпфу $h_{\text{зум}}^{\text{кр}}$ досягає позначки $0,2 d_r$, тобто якщо фактична глибина зумпфу $h_{\text{зум}}^{\text{ф}}$ задовольняє умові $h_{\text{зум}}^{\text{ф}} > h_{\text{зум}}^{\text{кр}}$, коксовий масив у металоприймачі знаходиться у плавучому стані, а якщо $h_{\text{зум}}^{\text{ф}} < h_{\text{зум}}^{\text{кр}}$, то масив коксу просідає на лещадь з негативними наслідками її руйнування. Після появи згаданої роботи [6] з метою захисту робочої поверхні лещаді стали суттєво зростати глибина і об'єм зумпфу особливо на підприємствах Європи [7]. Якщо максимальна глибина зумпфу станом на 1980 рік не перевищувала 2,45 м, то станом на 1995 рік ця глибина досягла величини у 3,6 м, що було значно більше ніж рекомендовано у дослідженні [6].

Виходячи з цих обставин модернізація існуючих доменних печей йшла в напрямку збільшення висоти горна і зумпфу [8, 9]. Так, наприклад, проектом УкрДіпромету для доменної печі №8 Криворіжсталі об'ємом 2700 м^3 було передбачено збільшення висоти горна і зумпфу до 4,0 і 2,0 м проти 2,4 і 1,5 м за попереднім профілем [9]. Однак не може викликати запитання те, що для печей меншого об'єму, зокрема ДП №3 Єнакієвського металургійного заводу об'ємом 1719 м^3 і печі Запоріжсталі об'ємом 1513 м^3 було прийнято майже однакову висоту горна – 4 м.

В недавньому учбовому виданні [10] відмічено, що спостерігається тенденція збільшення висоти горна і висоти мертвого шару (зумпфу) на лещаді. Поряд з цим стверджується, що зумпф має винятково конструкційне значення: «призначення зумпфу, завжди заповненого рідким чавуном, є збереження лещаді печі (днища металоприймача) від руйнуючої дії потоків чавуну, а також абразивного зносу коксом. Об'єм зумпфу не входить у корисний об'єм доменної печі». Слід зазначити, що це визначення відповідає усталеним поглядам в теорії та технології доменного процесу.

Класичне визначення кількості елементів профілю – п'ять: колошник, шахта, розпар, заплечики і горн [11]. Мертвий шар або зумпф на протязі довгого часу не сприймався як важливий елемент робочого простору, оскільки вважався таким, що не мав технологічного значення, хоча давно відома участь зумпфу у циклі накопичення і випуску продуктів плавки, на що звернув увагу автор [5].

На додаткову функцію зумпфу звертають увагу в дослідженні [12], де вказується на те, що поглиблення «мертвого» шару сприяє стабілізації теплого стану горна за рахунок значного збільшення запасу тепла в горні, покращує умови роботи повітряних фурм, сприяє стабілізації якості чавуну.

Нажаль в останніх дослідженнях [13, 14], спрямованих на вдосконалення профілю печей, увага до елементів накопичувальної частини не приділяється. Хоча ці елементи і горн, і зумпф мають виняткову важливість для реалізації доменного процесу.

Немає також однозначності в поглядах на вибір режиму випусків продуктів плавки з горна [15, 16]. Хоча в останній час спостерігається тенденція на збільшення тривалості випуску і зменшення коливань рівня продуктів плавки в горні [15] не слід забувати про раніше висловлене застереження [16] щодо послаблення інерційності доменного процесу внаслідок зменшення маси продуктів плавки в металоприймачі. Не зовсім ясно, які зміни відбуваються у коксовій насадці при зміні режиму випусків розплавів.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є виявлення змін в проектуванні і роботі накопичувальної частини доменних печей, обумовлених удосконаленням технології плавки, а також зростанням потужності і питомої продуктивності агрегатів.

Виклад основного матеріалу

Вихідним матеріалом для аналізу були вибрані дані про розміри типових радянських печей і печей країн світу з розвинутою металургією. За цими розмірами були визначені загальні корисні об'єми печей разом із об'ємом зумпфу, відношення корисного об'єму горна до об'єму протитоккової частини доменних печей $V_{\text{кг}}'/V_{\text{пр}}$, відношення об'єму накопичувальної частини печей до об'єму протитоккової частини $V_{\text{нч}}/V_{\text{пр}}$, відношення об'єму зумпфу до об'єму горна $V_{\text{зум}}/V_{\text{кг}}'$ і частку об'єму накопичуваль-

ної частини, що приходилася на одну повітряну фурму, або на одне фурмене вогнище $V_{\text{нч}}/n_{\text{ф}}$.

Для оцінки спроможності горна і накопичувальної частини печі забезпечувати ефективну роботу високотемпературної зони в цілому було запропоновано характеристики, що посередньо визначають їх технологічні можливості. Технологічну можливість горна оцінено двома критеріями – часткою об'єму накопичувальної частини печі, що приходить на одну повітряну фурму $V_{\text{нч}}/n_{\text{ф}}$ і потужністю повітряної фурми за дуттям в одиницю часу. Оскільки фурмене вогнище від однієї повітряної фурми обслуговує визначений сектор стовпа шихти по вертикалі, то перший критерій посередньо показує забезпечення одним фурменним вогнищем конкретного об'єму горна зі зумпфом. Другий критерій дає змогу оцінити потужність повітряної фурми і її вогнища, як джерела тепла для реалізації доменного процесу.

Технологічну можливість накопичувальної частини печі також оцінено двома показниками – часткою об'єму накопичувальної частини, що приходить на одну чавунну льотку $V_{\text{нч}}/n_{\text{чл}}$ і відносним до протитокової частини печі об'ємом зумпфу $V_{\text{зум}}/V_{\text{пр}}$. Оскільки швидкість видалення продуктів плавки і забезпечення достатніх рівнів проникності коксової насадки, а також умов роботи повітряних фурм залежить за інших однакових умов від числа чавунних льоток, перший показник посередньо оцінює стан коксової насадки, що знаходиться в об'ємі накопичувальної частини. Другий показник посередньо оцінює відповідність об'єму зумпфу і протитоковій частини печі, що має значення при визначенні раціональних величин інерційності доменного процесу і розміщення коксової насадки відносно поду лещаді.

При розрахунку форму горна і зумпфу прийняли циліндричною. Розрахунок корисного об'єму горна $V_{\text{к}}$ здійснено за умови, що умовна корисна висота горна менше повної на конструкційний розмір 0,5 м – відстань від верхньої кромки горна до рівня розміщення повітряних фурм і на технологічний розмір 0,5 м – максимально допустиму відстань від горизонту повітряних фурм до дзеркала шлаку перед початком випуску продуктів плавки.

Оскільки доменні печі України мають переважно типовий корисний об'єм, то являє практичний

інтерес розгляд первинних (до реконструкцій) розрахункових характеристик типових печей (табл. 1). Слід зауважити, що процес проектування типових радянських печей був розтягнутий у значному проміжку часу, тому усереднені дані мають ілюстративний, а не узагальнюючий характер. Дві перші печі об'ємом 1033 і 1386 м³ являють собою розвиток двох перших радянських проектів печей об'ємом 960 і 1300 м³, поява яких датована серединою 20-х і 30-х років XX ст. Проекти печей 1033, 1386, 1513, 1719 і 2000 м³ були виготовлені в 1952-1958 рр. Печі об'ємом 2300 і 2700 м³ з'явилися у 60-х роках того ж століття. Проекти печей об'ємом 3200 і 5000 м³ припадають на 70-і роки, а 5500 м³ – на 80-і роки.

Підтримання однакової висоти горна і його відносного корисного об'єму $V_{\text{к}}'/V_{\text{пр}}$ для першої групи печей з об'ємом від 1033 до 1719 м³ створювало підстави для обмеження технологічних можливостей горна зі зростанням об'єму печей. Так, ще у серпні 1963 року на всесоюзній нараді доменщиків з обміну досвідом роботи потужних доменних печей (а такими тоді правомірно вважалися агрегати об'ємом 1719 і 2000 м³) повідомлялось [17] про недостатню ємкість горна вказаних печей, що стримувало форсування ходу. Намагання зменшити заповнення горна збільшенням кількості випусків гальмувалося низькою якістю тогочасних льоточних футлярних і жолобних мас. У зв'язку з цим нарада рекомендувала будувати доменні печі об'ємом 2000 м³ і більше з двома чавунними льотками. В подальшому практика показала доцільність цієї рекомендації навіть для доменних печей об'ємом < 1000 м³.

Найбільший відносний об'єм зумпфу спостерігався для печі об'ємом 2700 м³ – 0,08 $V_{\text{пр}}$, найменший для печі 1386 м³ – 0,02 $V_{\text{пр}}$. Відносно корисного об'єму горна найбільше значення зумпфу спостерігається для печі об'ємом 3000 м³ – 0,06 $V_{\text{к}}'$, що відповідає сучасним параметрам, найменше 0,21 $V_{\text{к}}'$ для печі об'ємом 1386 м³. Однак необхідно зауважити, що значний об'єм зумпфу відносно корисного об'єму горна деяких радянських печей об'ємом 1719, 2700 і 3000 м³ слід вважати вдаваним через занижені глибину і об'єм горна.

Виникає питання, чому, незважаючи на занижені на більшості печей висоти горна і зумпфу, на радянських печах при сприятливих і експлуатаційних умовах досягалися досить високі техніко-

сприями з однієї сторони значна товщина вогнетривного масиву лещаді від 3 до 6 м в залежності від об'єму печі, з другої відсутність підлещадного охолодження на печах задувки 40-50-х років. Пе-

Таблиця 1 – Характеристика профілю типових радянських печей за даними [11]

без зумпфу	Корисний об'єм, м ³		Горн			Зумпф		$V_{нч}, \text{м}^3$	$V_{кз} / V_{пр}$	$V_{зум} / V_{пр}$	$V_{нч} / V_{пр}$	$V_{зум} / V_{кз}$	кількість фурм, $n_{ф}$	$V_{нч} / n_{ф}, \text{м}^3$
	зі зумпфом	проти токовий $V_{пр}$	діаметр, м	висота, м	$K_{бз}^{(1)}$ $V_{кз}, \text{м}^3$	висота, м	об'єм $V_{зум}, \text{м}^3$							
1033	1057	884	7,2	3,2	89	0,600	24	113	0,10	0,03	0,13	0,27	14-16	8,1-7,1
1386	1410	1195	8,2	3,2	116	0,450	24	140	0,10	0,02	0,12	0,21	16	8,8
1513	1568	1317	8,6	3,2	128	0,766	55	183	0,10	0,04	0,14	0,43	18	10,2
1719	1790	1495	9,1	3,2	143	1,099	71	214	0,10	0,05	0,14	0,50	18	11,9
2000	2082	1704	9,75	3,5	187	1,101	82	269	0,11	0,05	0,16	0,44	20	13,4
2300	2369	1958	10,5	3,8	242	1,650	69	311	0,12	0,04	0,16	0,28	20	15,6
2700	286	2116	11,0	3,9	275	1,699	161	436	0,13	0,08	0,21	0,59	20-24	21,8-18,2
3000	3184	2566	11,6	3,9	306	1,740	184	490	0,12	0,07	0,19	0,60	28	17,5
3200	3334	2763	12,0	3,9	328	1,185	134	462	0,12	0,05	0,17	0,41	28	16,5
5000	5189	4257	14,7	4,4	577	1,113	189	766	0,14	0,04	0,18	0,33	36-42	21,3-18,2
5500	5715	4501	15,1	5,7	841	1,200	215	1056	0,19	0,05	0,23	0,26	40	26,4
Середні значення для 11-ти печей:									0,12	0,05	0,17	0,39		
Середні значення для печей з діаметром горна 14,7-15,1 м:									0,16	0,045	0,20	0,32		

¹⁾ $K_{бз}$ – корисний об'єм без частки в зумпфі

Таблиця 2 – Характеристики профілю потужних печей Японії, Західної Європи і США, побудованих в 70-х роках XX ст. за даними [14]

Назва печі, рік пуску	Об'єм, м³		проти токовий V _{пр}	Горн		Зумпф			V _{нч} , м³	V _{кз} / V _{пр}	V _{зум} / V _{пр}	V _{нч} / V _{пр}	V _{зум} / V _{кз}	кільяс ть фурм, n _ф	V _{нч} / n _ф , м³
	корисний без зумпф у	зі зумпфо м		діаметр d _г , м	висота h _г , м	K _{бз} ⁽¹⁾ V _{кз} / м³	висота, м	об'єм V _{зум} , м³							
«Kashima», Japan, №2, 1973	4080	4304	3400	13,800	6,300	792	1,500	224	1016	0,23	0,07	0,30	0,28	38	26,7
«Oita», Japan №1, 1972	4158	4517	3265	14,000	5,200	646	1,987	359	1005	0,20	0,11	0,31	0,56	38	26,4
«Indiana Harbor», USA, №7, 1980	4175	4402	3424	13,715	4,995	590	1,540	227	817	0,17	0,07	0,24	0,38	40	20,4
«Fukuyama», Japan, №4, 1971	4197	4399	3519	13,800	5,750	710	1,350	202	912	0,20	0,06	0,26	0,28	40	22,8
«Sparrows Point», USA, L, н.д.	4220	4440	3453	13,565	5,715	681	1,525	220	901	0,20	0,06	0,26	0,32	38	23,7
Середнє для печей з d _г 13-14 м	4166	4412	3412	13,776	5,592	684	1,580	246	930	0,20	0,07	0,27	0,36		24,0
«Kashima», Japan, №4, 1977	4500	4896	3693	14,100	5,300	681	2,100	396	1077	0,18	0,11	0,29	0,58	40	26,9
«Redcar», UK, №1, 1977	4572	4887	3748	14,000	5,400	677	2,050	315	992	0,18	0,08	0,26	0,46	36	27,6
«Fukuyama», Japan, №5, 1973	4617	4848	3813	14,000	6,200	800	1,500	231	1031	0,21	0,06	0,27	0,29	42	24,5
«Kashima», Japan, №3, 1977	5050	5315	4096	15,000	5,100	724	1,500	265	989	0,18	0,06	0,24	0,37	40	24,7
«Oita», Japan №2, 1972	5070	5285	3982	14,800	4,165	544	2,085	215	759	0,14	0,05	0,19	0,40	40	19,0
Середнє для печей з d _г 14-15 м	4762	5046	3866	14,380	5,233	685	1,847	284	970	0,18	0,07	0,25	0,42		24,5

¹⁾ $K_{бз}$ – корисний об'єм без частки в зумпфі

економічні показники? Справа в тому, що недостатня висота горна для приймання продуктів плавки компенсувалася збільшенням числа випусків [15], а недостатня глибина зумпфу інтенсивним руйнуванням верхнього шару вогнетривів лещаді з

рехід у 60-х роках на підлещадне повітряне охолодження і комбіновану лещадь низив масштаби руйнування лещаді, але не усунув утворення «ями». Про глибину «ями» або фактичного об'єму зумпфу перед видувкою печей без повітряного

Таблиця 3 – Характеристики профілю сучасних доменних печей за даними [8, 9, 14, 22, 23]

Назва печі, (проектувальник)	Об'єм, м³			Горн		Зумпф		V _{нч} , м³	V _{кз} / V _{пр}	V _{зум} / V _{пр}	V _{нч} / V _{пр}	V _{зум} / V _{кз}	кількість фурм, n _ф	V _{нч} / n _ф , м³	
	без зумпфу	зі зумпфом	проти токовий V _{пр}	діаметр d _з , м	висота h _з , м	K _{бз} ⁽¹⁾ V _{кз} , м³	висота а, м								об'єм V _{зум} , м³
«КАМЕТ-СТАЛЬ», №1, (Укрдінпромет)	1513	1571	1242	8400	4000	175	1043	58	233	0,14	0,05	0,19	0,33	20	11,6
Презентація [8] (Укрдінпромет)	1513	1585	1288	7800-8600	4000	205	1500	72	277	0,16	0,06	0,22	0,35	20	13,8
«Hoogovens» №9, Голандія (Tissen Shtal)	2132	2298	1773	10050	4500	277	2220	166	443	0,16	0,09	0,25	0,60	28	15,8
«Hoogovens» №4, Голандія (Tissen Shtal)	2323	2475	1800	10400	4238	275	2012	152	427	0,15	0,08	0,24	0,55	30	14,2
«Северсталь» №4, рф (Ленінпромет)	2700	2833	2402	11000	4400	323	2170	133	456	0,13	0,06	0,19	0,41	28	16,3
«Tissen Shtal» №1, ФРН (Tissen Shtal)	4416	4687	3599	13100	4859	520	2205	271	791	0,14	0,08	0,22	0,52	40	19,8
«Shougang», Китай	5500	6103	4670	15500	5400	735	3200	603	1338	0,16	0,13	0,29	0,82	42	31,8
«Tissen Shtal» №2, ФРН (Tissen Shtal)	5513	6020	4429	14400	5100	667	2980	507	1174	0,15	0,11	0,26	0,76	42	28,0

¹⁾ $K_{бз}$ – корисний об'єм без частки в зумпфі ²⁾ – змінний по висоті

утворенням так званої «ями». Руйнуванню лещаді

охолодження лещаді свідчать дані [18], з яких ві-

домо, що об'єм виданого козлового чавуну по шести печам галузі об'ємом по 1386 м^3 склав 103 м^3 при типовому розмірі зумпфу 24 м^3 . Неважко бачити (рис. 1), що розміри «ям» - зумпфів в масивах лещаді не поступалися розмірам горну.

Загальною закономірністю, обумовленою специфікою геометрії профілю, є збільшення навантаження об'єму накопичувальної частини печі на одну повітряну фурму або на одне фурмене вогнище зі зростанням корисного об'єму печей. Неважко бачити на прикладі печей об'ємом 1033 і 5000 м^3 (див. табл. 1), що збільшення числа фурм на одній і тій же печі зменшує навантаження $V_{\text{нч}}$ на одну повітряну фурму; в свою чергу це покращує технологічні можливості горна.

Навіть на так званих за сучасною градацією компактних доменних печах починаючи з 70-х років XX ст. капітальні ремонти першого розряду поєднувались з конструктивними змінами характеристик накопичувальної частини. Так доменна піч №1 Череповецького металургійного заводу об'ємом 1033 м^3 була оснащена двома чавунними льотками замість однієї, 16 повітряними фурмами замість типових 14 [20]. На Дніпровському металу-

ргійному заводі (м. Кам'янське) на доменній печі №8 (удосконалений типовий проект об'ємом 1719 м^3), реконструйованій у 1974 році зі збільшенням об'єму з 988 до 1754 м^3 , діаметр горна збільшено на $0,1 \text{ м}$, а його висоту на $0,4 \text{ м}$. Кількість повітряних фурм збільшено з 18 до 20 і обладнано дві чавунні льотки.

На печі №6 Новолипецького металургійного заводу, що мала об'єм 3200 м^3 і була задута в 1978 році було встановлено 32 повітряні фурми замість 28 типових і збільшено висоту горна з типових $3,9 \text{ м}$ до $4,6 \text{ м}$ [21].

У світовій металургії 70-х років XX ст. відбувся суттєвий перелам в області проектування і будівництва доменних печей – зусилля фахівців були спрямовані на створення агрегатів великої потужності. Тому аналіз інформації про розміри печей вказаного періоду дають змогу оцінити стан первинної бази для подальшого розвитку їх конструкції. В табл. 2 потужні печі різних металургійних регіонів світу розміщені в порядку збільшення їх корисного об'єму і поділені на дві групи, відмінні за діаметром горна.

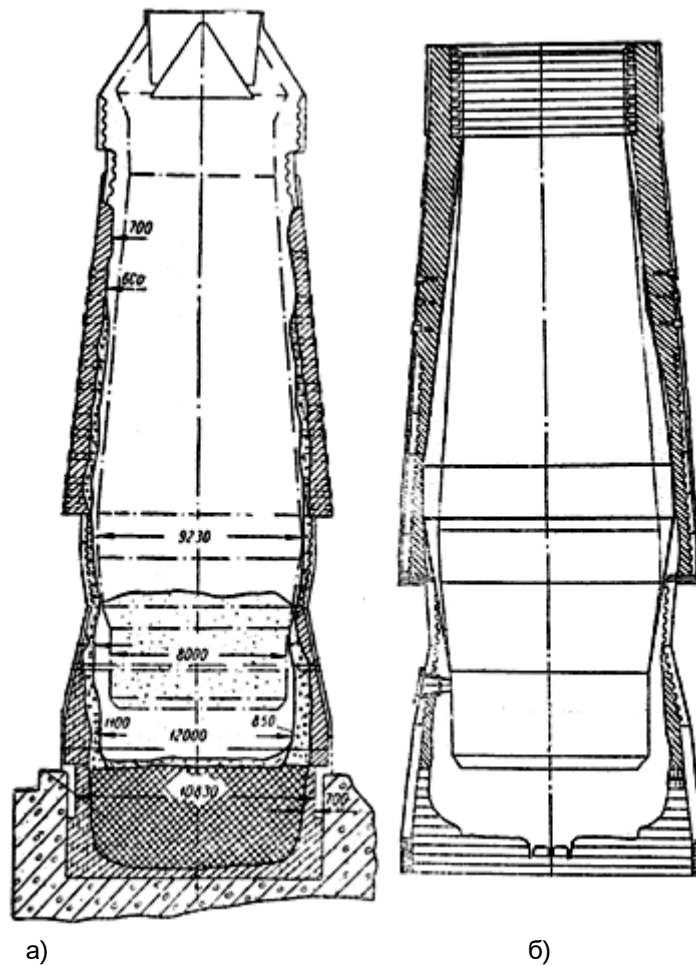


Рисунок 1 – Розміри «ям» - зумпфів в масивах лещаді: а) – ММК (РФ); б) – заводу ім. Ф.Дзержинського (Україна) за даними [19]

Розгляд розрахункової інформації, наведеної в таблиці, показав дещо неочікувані дані, а саме зменшення висоти горна більш потужної за об'ємом групи печей і однаковий в середньому корисний об'єм горна. Об'єм протитокової частини цієї групи зріс з 3412 до 3866 м³ або на 13,3%, а об'єм накопичувальної частини на 4,3% за рахунок зростання глибини зумпфу і його об'єму з 246 до 284 м³ або на 15,4%. Тобто, ще в розглянутому періоді спостерігалася тенденція на збільшення об'єму зумпфу відносно корисного об'єму на: $V_{\text{зум}}/V_{\text{пр}}$ для більш потужної групи печей, введені в дію переважно в 1976-1977 роках, він зріс з 0,36 до 0,42, або на 16,7%.

Технологічні можливості верхнього горна (фурменої зони) не погіршились внаслідок додаткового оснащення повітряними фурмами печей збільшеного об'єму, тому об'ємне навантаження на одну повітряну фурму майже не змінилося. Однак постає питання, чому в разі збільшення навантаження об'єму накопичувальної частини печі на одну повітряну фурму доменні печі великого об'єму мають достатній рівень теплового стану горна? Цей рівень досягається за рахунок компенсації від'ємного впливу зростання величини $V_{\text{нч}}/n_{\text{ф}}$ збільшенням потужності повітряних фурм за поданою кількістю дуття. Так при однаковій відносній витраті дуття 1,9 м³/м³ хв. на печі об'ємом 1386 м³ з 18 фурмами на одну фурму подається 146 м³/хв. дуття, тоді як на печі об'ємом 5000 м³ з 42 фурмами – 226 м³/хв.

В табл. 3 наведені характеристики групи печей, збудованих і працюючих у ХХІ столітті. Печі різних проектувальників розміщені в порядку збільшення корисного об'єму. Наведені дані свідчать про збереження тенденції 70-х років минулого століття стосовно обмеженого зростання висоти горна зі збільшенням об'єму печей. Збільшення об'єму печей з 1513 до 5513 м³ на 4000 м³ або у 3,6 рази призвело до зростання висоти горна з 4,0 до 5,4 м, тобто лише на 35%. У відповідності з цим слід визнати завищеною висоту горна, що може бути визначена за новими рекомендаціями [24], за якими $h_{\text{г}} = 0,45 \div 0,50 d_{\text{г}}$. Так для китайської печі в Shougang з діаметром горна 15,5 м висота горна від нижньої кромки заплечиків до вісі чавунних льоток повинна складати 6,975-7,750 м. Від таких розмірів відмовились ще у згаданих 70-х роках.

Порівнюючи дані табл. 1-3 видно, що спостерігається гальмування нарощування висоти горна зі збільшенням корисного об'єму печей. Якщо на сучасних печах на кожні додаткові 1000 м³ корисного об'єму висота горна зросла в середньому на 9%, тоді як на радянських типових печах на 20%.

В порівнянні з профілями печей 70-х років на сучасних печах суттєво зросли абсолютна висота і відносний об'єм зумпфу відносно протитокової частини печі і корисного об'єму горна.

Особливий інтерес викликає питання щодо значного зростання висоти і об'єму зумпфу в 90-х роках ХХ ст. і впродовж наступних десятиліть. Якщо порівняти розміри профілю ДП №9 Криворіжсталі у грудні 1974 р., тоді найбільшої в світі печі об'ємом 5000 м³, з потужними печами сьогодення, то слід навести наступні дані. Діаметр горна ДП №9 Криворіжсталі, що становив 14,7 м, зріс до 15,6 м на ДП №2 в Оіта [25] тобто лише на 6%. Висота горна останньої печі в порівнянні з криворізькою зросла з 4,4 до 5,35 м або на 22%. Корисний об'єм найбільшої в світі ДП №1 у Гваньїні (Південна Корея) [26] у 6000 м³ перевищив такий же об'єм ДП №9 Криворіжсталі на 20%. На противагу цим не дуже суттєвим змінам глибина зумпфу на сучасних ДП №1 і 3 заводу Kashima (Японія), що мають діаметр горна 15 м, зросла до 4,5 м [27], тобто у чотири рази в порівнянні з початковим розміром зумпфу ДП №9 Криворіжсталі (1,113 м).

На захист зумпфу, як важливого елементу профілю, який має не тільки конструкційне, але й технологічне значення, слід зазначити наступне. По перше, у верхній частині його об'єму відбувається рух і масообмін продуктів плавки упродовж циклу випуску і наповнення розплавів [5].

По друге, рідкий чавун зумпфу при достатній товщині шару сприяє спливанню коксової насадки над лещаддю (див. рис. 1), що унеможливорює утворення тотерману – застиглої коксорозплавного моноліту при розладнаннях ходу доменної плавки. Саме через недостатні абсолютні та відносні глибини горна і зумпфу на печі №9 Криворіжсталі (див. табл. 2) і недостатню глибину зумпфу на печі №5 Северсталі у ряді кампаній печей центральна частина коксової насадки у металоприймачі перетворилася на тотерман – застиглий на лещаді моноліт (рис. 2).

При недостатній глибині зумпфу рівномірному зносу днища лещаді потужних печей перешкоджають два фактори. З однієї сторони інтенсивне рівномірне підлещадне охолодження, з другої сторони просідання центральної частини коксової насадки, обумовлене периферійним підведенням дуття і зменшенням підйомної сили газів в центрі горна [11]. Тому центральна частина лещаді ушкоджується значно менше ніж периферійна (рис. 3, а). На печах з меншим діаметром горна зростає вплив периферійного тиску газів на більшу в перетині частину коксової насадки і руйнування лещаді відбувається відносно рівномірно (рис. 3, б і рис. 1).

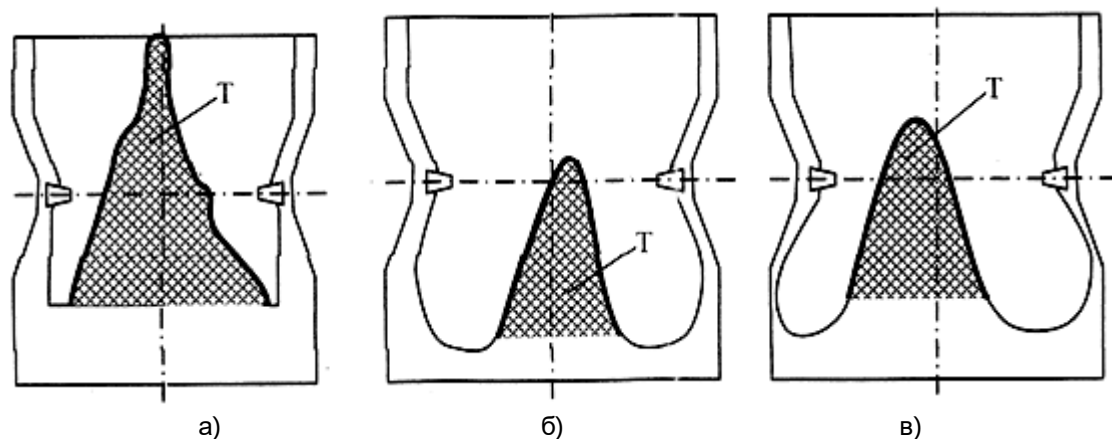


Рисунок 2 - Схеми утворення тотермана (суміші коксу із застиглим розплавом) на лещаді доменних печей з недостатньою глибиною зумпфу за даними ІЧМ [28] : а) ДП №9 Криворіжсталі, видувка в грудні 1977р; б) ДП №5 Северсталі (РФ) у першу кампанію 1986-1995 р.р.; в) ДП №5 у ході другої кампанії 1995-1997 р.р.; Т – тотерман.

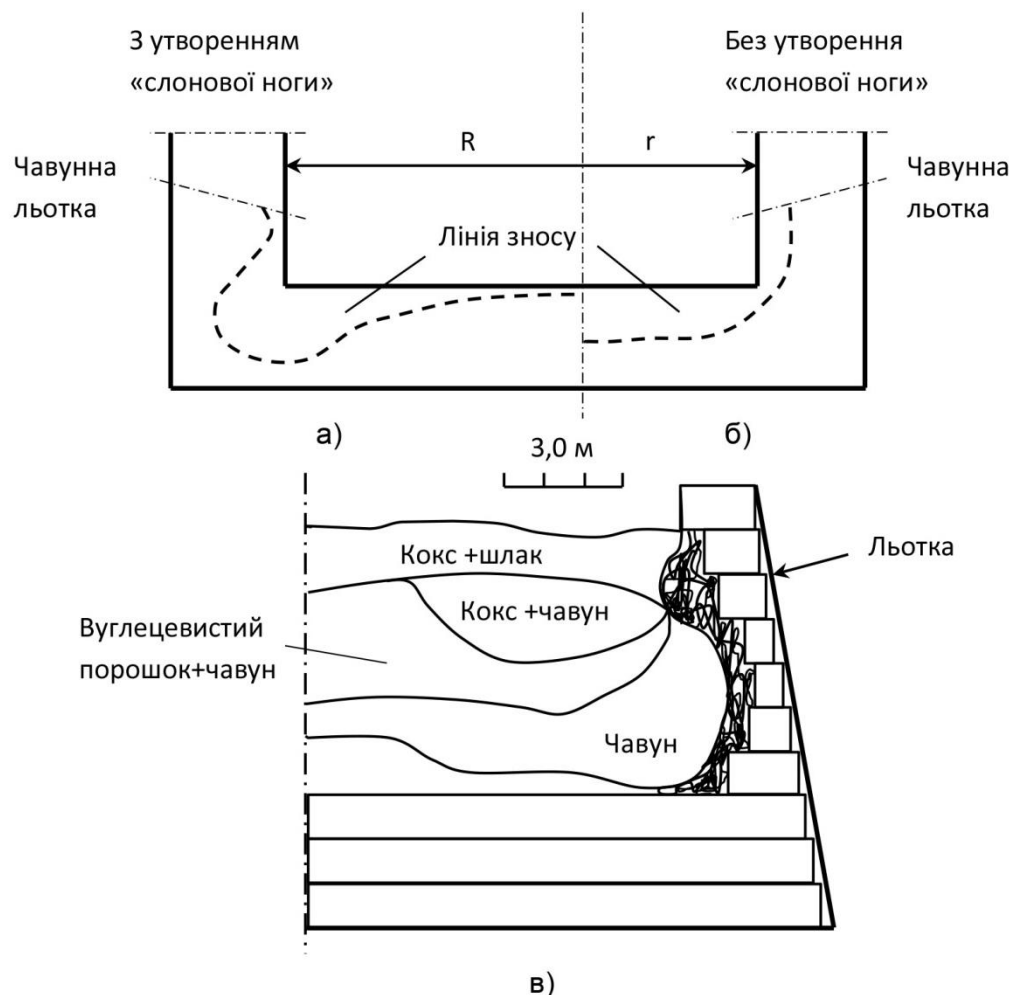


Рисунок 3 – Схема руйнування лещаді і стін зумпфу в залежності від радіусу горна:
а) $R > r$; б) $R < r$; в) перетин матеріалів в зумпфі доменної печі №4 в Курасіки, отриманий методом пошарового розбирання за даними [29]

Через недостатню глибину зумпфу на потужній печі №4 в Курасіки (Японія) з діаметром горна 15 м відбулося характерне руйнування лещаді у вигляді «слонової ноги» (рис. 3, в, [29]).

По третє, тепловміст рідкого чавуну, який заповнює зумпф, обумовлює теплову інерційність ме-

талоприймача, особливо при експлуатації печі з «сухим» горном. Для порівняння втрат тепла на випуску продуктів плавки з можливістю збереження тепла в зумпфі за рахунок розплавленого чавуну зроблено підрахунки з використанням даних про роботу печі Северсталі об'ємом 5580 м³ [15].

Теплоємність чавуну прийнято 1128 кДж/кг, а шлаку 1756 кДж/кг. Розрахунок виконано з умовою, що конденсуючий тепло шар чавуну має висоту нижньої частини зумпфу, яка не приймає участь в циклі «накопичення – випуск». Для типового проекту вона склала $1,20 - 0,77 = 0,43$ м, для рекомендованого за умовою $h_{\text{зум}} \approx 0,2d_r$ $3,00 - 0,77 = 2,23$ м.

Неважко бачити (табл. 4), що при збереженні типової висоти зумпфу величина збереженого те-

пла рідкого чавуну на лещаді у двічі менша ніж втрати тепла з продуктами плавки на випуску. Якщо ж глибину зумпфу збільшити до 3 м, що не є верхньою межею для потужних печей, то ентальпія чавуну на лещаді більше ніж у 2,5 рази перевищить ентальпію розплавів. У такому разі шар металу в зумпфі може сприяти суттєвій інерційності теплового стану горна.

Таблиця 4 – Втрати тепла на випуску продуктів плавки і тепловміст чавуну із зумпфу на печі об'ємом 5580 м³⁺ за даними [15]

Середня маса випуску, т: чавуну шлаку	662 231
Втрати тепла, МДж: з чавуном зі шлаком разом	746736 405636 1152372
Тепловміст чавуну в зумпфі, МДж: при $h_{\text{ч}}$ 0,43 м при $h_{\text{ч}}$ 2,23 м	590620,8 3060489,6

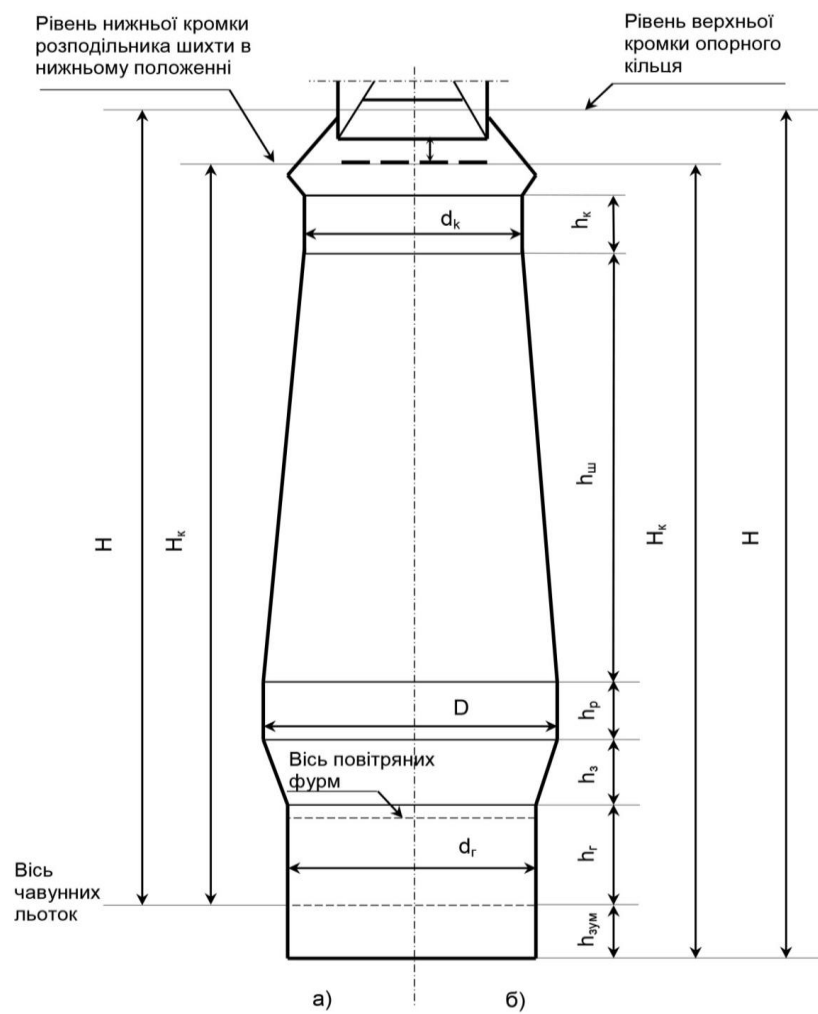


Рисунок 4 – Усталений (а) та запропонований (б) підхід до визначення деяких розмірів профілю доменної печі і робочого простору

Зважаючи на перераховані функції зумпф слід вважати шостим після колошника, шахти, розпару заплечиків і горна елементом профілю доменної печі. Тому повний корисний об'єм печі повинен містити і об'єм зумпфу, що дозволить зблизити розміри технологічного і будівельного об'ємів, робочого простору. Адже в будівельному плані від надійності конструкції огороження зумпфу залежить довгострокова безаварійна експлуатація печі. Об'єм печі від поверхні засипу до лещади є фактичним об'ємом стовпа матеріалів, що в залежності від умов перебувають у різних фізичних станах.

Зважаючи на технологічне значення зумпфу і зростання його розмірів прийшов час переглянути усталений підхід до визначення деяких розмірів профілю доменної печі і робочого простору зокрема. На сьогодні прийнято, що повною висотою печі є відстань між рівнями чавунної льотки і опорним кільцем колошника (рис. 4, а).

Виникає закономірне питання, чому частка фактичної висоти робочого простору печі від чавунної льотки до лещади видаляється з розгляду? Адже вказана частка робочого простору має таке ж і навіть більш досконале огороження, ніж розміщене вгорі над зумпфом. Крім того слід зважати і на те, що зумпф, як частина робочого простору заповнений матеріалами доменної плавки, які пройшли всі стадії перетворення. Виходячи з цього пропонується визначати повну висоту печі між рівнями поду лещади внизу і опорним кільцем вгорі (рис. 4, б).

Практика збільшення числа чавунних льоток при будівництві нових і реконструкції діючих печей показала ефективність впливу цього засобу на стан коксової насадки в горні і на збільшення продуктивності агрегатів. Невипадково, що обладнання печі додатковими льотками розглядалося як фактор сприяння зростанню продуктивності печі і зниженню витрати коксу [30].

Тому не можна погодитись з рішенням проєктувальника [9] скоротити кількість чавунних льоток на ДП №8 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» об'ємом 2700 м³ з трьох до двох, в результаті чого навантаженість об'ємом накопичувальної частини печі на одну льотку зросла зі 145 до 218 м³, що значно більше ніж на печах однакового або близького корисного об'єму. Так на ДП №4 Северсталі (РФ) з трьома льотками і однаковим корисним

об'ємом $V_{нч}/n_{чл}$ склало 152 м³, на ДП №1 Алчевського меткомбінату об'ємом 3000 м³ і трьома льотками – 163 м³.

Висновки. Запропоновані характеристики технологічних можливостей горна і накопичувальної частини печі, а також критерії для оцінки цих характеристик – частки об'єму накопичувальної частини, що приходяться на одну повітряну фурму $V_{нч}/n_{ф}$, потужність однієї повітряної фурми і відносний до протитокової частини печі об'єм зумпфу $V_{зум}/V_{пр}$. Показано, що при проєктуванні і модернізації доменних печей бажано підтримувати критерії $V_{нч}/n_{ф}$ і $V_{нч}/n_{чл}$ на мінімально можливому рівні, а критерії потужності повітряної фурми і $V_{зум}/V_{пр}$ на максимальному.

Встановлено тенденцію гальмування нарощування висоти горна зі збільшенням корисного об'єму печей. На сучасних печах на кожні додаткові 1000 м³ корисного об'єму висота горна зростала в середньому на 9%, тоді як на радянських печах з типовим профілем – на 20%.

Показано, що випереджаюче зростання глибини зумпфу у порівнянні з іншими розмірами профілю обумовлено не тільки його конструкційною функцією, але й суто технологічними. Тому запропоновано вважати зумпф або мертвий шар шостим після горна невід'ємним елементом профілю доменної печі, оскільки зумпф, як частина робочого простору печі, заповнений рідким чавуном, виконує не тільки функцію захисту лещади від руйнування при осіданні коксової насадки, але й виконує технологічні функції, а саме від'єднує коксову насадку від лещади, що унеможливорює утворення тотерману на осіданнях при розладнаннях ходу печі, створює запас тепла, чим збільшує інерційність доменного процесу, а також приймає участь в циклі накопичення і випуску продуктів плавки.

Оскільки зумпф є частиною робочого простору печі запропоновано змінити підхід до визначення повної і корисної висоти доменної печі. Більш конкретно повною висотою слід вважати відстань від лещади до верхньої кромки опорного кільця (фланця) кожуху колошника, а корисною – до конусу або лотка засипного пристрою в нижньому робочому положенні.

Бібліографічний список

1. Н.И. Савелов, А.Е. Сухоруков, Ю.И. Гохман О совершенствовании профиля доменных печей / Сталь.1987.№8.С.685-688.
2. О профиле проектируемых доменных печей большого объема / Г.Ю. Крячко, П.К. Лебедь, О.А. Бабенко [и др.] // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема. Темат.отрасл.сб.№7.М. : Металлургия.1981.С.4-10.
3. Гиммельфарб А.А., Воловик Г.А., Левченко В.Е. Рациональный профиль и перспективы его развития / Изв. вузов. Черная металлургия.1987.№7.С.32-41.
4. Бабарыкин Н.Н, О рациональном профиле современной печи // Изв. вузов. Черная металлургия.1987.№7.С.20-32.
5. Новохатский А.М. Дис. на соискание докт. техн. наук. Алчевск.2009.392с.

6. H-B. Vogelpoth, G. Stell, M. Peters Estimations concerning the flow behavior of hot metal in the blast furnace / *Sfahl and Eisen*.1985.vol.105.№8.p.451-457.
7. Современные аспекты развития доменных печей в мире. Х. Хилле, В. Ланцер, Х.Б. Люнген, Р. Зигер / *Черные металлы*.1997.№8.С.10-19.
8. Кривченко Ю.С., Бычков С.В., Жариков А.Н. Состояние и проблемы реконструкции доменных печей Украины / *Теория и практика производства чугуна: Сб.тр. международной научно-технич. конф.- Кривой Рог. КГГМК «Криворожсталь»*.2004.С.122-132.
9. Панин В.Н. Модернизация действующих доменных цехов Украины / *Новини науки Придніпров'я. Збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції присвяченої 100-річчю відомого вченого Г.А. Воловика Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-VAL»*.2010.С.39-43.
10. Каплун Л.И. Устройство и проектирование доменных печей : учебное пособие. Л.И. Каплун, А.В. Малыгин, О.П. Онорин, А.В. Пархачев. Екатеринбург : УрФУ.2016.219с.
11. Металлургия чугуна : Учебник для вузов.3-е изд.перераб. и доп. / под ред. Ю.С. Юсфина. -М.: ИКЦ «Академкнига».2004.774с.
12. Шатлов В.А., Бузоверя М.Т., Горобец С.Г. Анализ размеров типовых профилей и рекомендации по их модернизации при реконструкции доменных печей / *Новини науки Придніпров'я. Збірка наукових доповідей до науково-практичної конференції присвяченої 100-річчю відомого вченого Г.А. Воловика Дніпропетровськ: РВА «Дніпро-VAL»*.2010.С.103-105.
13. Исследование и анализ проектов конструкций профиля и показателей доменной плавки при переходе к технологии работы с применением пылеугольного топлива в условиях Украины / А.Л. Чайка, В.В. Лебедь, А.А. Сохацкий [и др.] // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии* : Сб. науч. тр.- Дніпро : ІЧМ НАН України.2017.вип.31.С.53-67.
14. Тенденции изменения проектных профилей доменных печей в современных топливно-сырьевых условиях / В.В. Горупаха, Ю.С. Семенов, Е.И. Шумельчик, Е.Д. Вышинская // *Сталь*.2019.№2.С.2-7.
15. Дружков В.Г., Прохоров И.Е. Выбор режима выпуска чугуна и шлака из горна доменных печей в современных условиях // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*.2011.№4.С.9-12.
16. Коробов И.И. Анализ работы горна больших доменных печей // *Металлургия и коксохимия*.Киев.1982.№75.С.102-106.
17. Всесезонное совещание доменщиков по обмену опытом работы мощных доменных печей / *Сталь*.1964.№1.С.23-24.
18. Довгань Л.В. Разгары кладки лещадей доменных печей / *Металлург*.1978.№5.С.17-18.
19. Сорокин Л.А. Работа конструкций доменных печей. М : *Металлургиздат*.1962.264с.
20. Реконструкция доменной печи, совмещенная с капитальным ремонтом / В.М. Грацилев, В.И. Солодков, В.И. Стекачев, В.И. Новиков // *Металлург*.1978.С.15-18.
21. Опыт эксплуатации доменной печи №6 объемом 3200 м³ на НЛМЗ. Н.С. Антипов, В.В. Капорулин, Э.А. Шепетовский, Е.М. Визлов / *Сталь*.1983.№5.С.31-33.
22. Капитальный ремонт с реконструкцией доменной печи №4 ОАО «Северсталь» / В.Н. Логинов, А.В. Захаров, В.И. Нетронин и др. // *Черные металлы*.2007.№6.С.8-13.
23. Zhang Fuming/ Design, Construction and commissioning of 5500 m³ Blast Furnace at Shougang jino-tang // *Technical contribution to the 6th International Congress on the Science Tehnology of Ironmaking – ICSTI.Oktober 14th to 18th.2012.Piode Janero. R.J., Brazil. P.P.185-194.*
24. Патент RU №2722947 «Профиль доменной печи для высокоинтенсивной работы» МПК⁶ C21B 7/06, опубл.05.06.2020.Бюл.№16
25. Miwa Takashi, Kuribara Kiichiro. Recent Development in Iron making Technologies in Japan // *Steel researcg international*.2001.vol.82.Issue 5.P.P.422-466.
26. Электронный ресурс. В Южной Кореи начала работу самая большая в мире доменная печь. Режим доступу: azovpromstal.com/news/one/id/1728
27. Advanced Technologies for Blast Furnace Life Extension / Kaoru Nakano, Takanoby Inada, Kenji Katajama at al. / *Nippon Steel Technical Report No.123*.March.2020.P.109-118.
28. Влияние распределения шихты на разгар металлоприемника доменной печи / В.И. Большаков, С.Т. Шулико, В.В. Канаев, Ф.М. Шутылев // *Металлургическая и горнорудная промышленность*.- 2001.-№4.-С.4-9.
29. Влияние формы свободного производства в горне на характер выпуска жидких продуктов при снижении температуры в доменной печи / Т. Ноуши, С. Ватакабе, М. Такеда и др. // *Новости черной металлургии за рубежом*.2004.№6.С.28-29.
30. Технолог-доменщик. Справочное и методическое руководство / Ю.П. Волков, Л.Я. Шпарбер, А.К. Гусаров // М. : *Металлургия*, 1986. 263 с.