

УДК 669.162.21.22:001.8

М. А. Альтер¹, к.т.н., ORCID 0009-0009-3709-5449**О. Л. Чайка**², к.т.н., с.н.с., зав. лаб. ТЕТ, ORCID 0000-0003-1678-2580**Б. В. Корнілов**², к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5544-3023**А. О. Москалина**², к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-9552-2853¹ "ALTER Blast Furnace consulting", USA² Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАДУВКИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ В 20-21 СТОЛІТТЯХ

Анотація. В статті обговорюються тенденції та класифікація задувок доменних печей за останні 100 років. Розвиток технології задувок поділяється на 3 періоди: 1-й – тривав до кінця 30-х років ХХ століття, який характеризується відсутністю наукових знань, містицизмом та заснований на попередньому досвіді; 2-й період – до початку 70-х років, коли було освоєно «традиційну» технологію задувок з однією проблемою – складнощами з відкриттям перших випусків та одночасним перегрівом верху; 3-й період триває і сьогодні, він включає розробку нових методів інтенсифікації теплообміну при задувці та наукового узагальнення прийомів задувок. Основними задачами задувки є виведення доменної печі в короткі терміни до нормального режиму роботи, з дотриманням правил безпеки, без значних витрат, а також збереження доменної печі та допоміжного обладнання для тривалої продуктивної експлуатації. Ці задачі тісно пов'язані з конструктивними особливостями доменних печей, включаючи систему охолодження, тип футерування та розміри печей, які неухильно збільшувалися з менш, ніж 500 м³ до 5600 м³. Складність розуміння процесів нагрівання стовпа шихти в період задувки з утворенням у ньому газового потоку та зони когезії є причиною численних дискусій про раціональні методи задувки: методи розрахунку та розміщення шарів задувної шихти в доменній печі, використання різних добавок до гарячого дуття (азот, природний, доменний або коксовий газ, кисень, пара та ін.), швидкість збільшення витрати гарячого дуття та підвищення його температури, тренд перепаду тисків по висоті стовпа шихти. Обговорюється використання деревини в задувній шихті, встановлення звужувальних кілець в повітряні фурми або закриття частини фурми для задувки. Подано рекомендації щодо задувок доменних печей. Наведено порівняння «традиційної» задувки з «прогресивною» та задувки з азотом, розробленої в Інституті чорної металургії НАН України.

Ключові слова: доменна піч, технологія задувки, труби Дюрфі, дрова, природний газ, азот, вдування

Посилання для цитування: Аналіз розвитку технологій задувки доменних печей в 20-21 століттях / М. А. Альтер, О. Л. Чайка, Б. В. Корнілов, А. О. Москалина // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*.

Вступ. Головні складові доменного процесу – процеси теплообміну та відновлення – відбуваються у протитоці в результаті взаємодії висхідного потоку газів з певним тепловим та відновним потенціалом та низхідним потоком шихтових матеріалів, які нагріваються та відновлюються, а потім плавляться, утворюючи чавун та шлак.

При нормальній роботі доменної печі (ДП) ці процеси є високою мірою стабілізованими, тобто в кожній точці об'єму печі встановлюється характерна температура газу і шихти та досягається певний ступінь відновлення оксидів заліза.

Доменні печі є агрегатами безперервної дії. Проте їх час від часу зупиняють з різних причин для обслуговування та ремонтів і, відповідно, задувають після таких зупинок. В таблиці 1 наведено класифікацію зупинок та задувок доменних печей залежно від тривалості та мети зупинки.

Таблиця 1 – Класифікація зупинок доменних печей.

Тривалість зупинки	Тепловий стан горна	Температура горна, °С	Рівень шихти	Причина зупинки	Задувка
< 5 годин	Дуже гарячий	1450-1520	Повна піч	Заміна фурми, інші роботи	добре відома
6-24 години	Дуже гарячий	1420-1470	¾ шахти	Ремонт жолобу, інші роботи	добре відома
1-2 доби	Дуже гарячий	1380-1430	¾ шахти	Ремонт жолобу, інші роботи	добре відома
3-4 доби	Гарячий	1300-1400	Повна піч – низ шахти	Капремонт 3-го розряду, ремонт заватажувального пристрою	добре відома
5-7 діб	Гарячий	1150-1250	Низ шахти – фурми	Торкретування верху печі	менш відома
1-2 тижня	Теплий	900-1150	Низ шахти – фурми	Торкретування всієї печі	менш відома
2-3 тижня	Теплий	500-900	Запечечики – фурми	Торкретування всієї печі, інші роботи	Погано вивчена
3-4 тижня	Теплий	250-500	Фурми	Капремонт 2-го розряду	Погано вивчена
>1 місяця	Холодний	20-40	Фурми	Капремонт 1-го або 2-го розряду	добре відома

Короточасні зупинки, зумовлені зміною охолоджувальних приладів, усуненням несправностей в устаткуванні і т. п. Тривалість цих зупинок, зазначені у табл. 1 в верхніх рядках, може бути від кількох хвилин до кількох годин або навіть 1-1,5 діб.

У багатьох випадках спеціальної підготовки печі до таких зупинок не роблять, тому що це або не потрібно, або коли тривалість зупинки значна, - не може бути зроблено, оскільки зупинка здійснювалася за аварійними обставинами. Тип зупинки може бути різним: "на пару", із запалюванням газу на колошнику і т. п. Пуск після короткочасних зупинок не викликає ускладнень, якщо доменна піч до зупинки знаходилася в нормальному стані і не було потрапляння води в піч, тому що протягом кількох діб зниження температур у робочому просторі зупиненої доменної печі відбувається зі швидкістю $40 \div 50^\circ\text{C}/\text{добу}$, що встановлено прямими вимірами температури в горні тобто, і чавун і шлак в горні залишаються рідкими [1, 2].

Технологія задувки, як і раніше, хвилює і приваблює доменних технологів та дослідників, оскільки залишається недостатньо вивченою задачею.

Класичним видом задувки є пуск доменної печі після нового будівництва або холодного капітального ремонту I або II розряду. Зупинки, після яких слідує капремонт доменної печі, зазвичай виконують із випуском «козла» та вигрібанням матеріалів з горна. Ці види зупинок представлені у нижніх рядках в табл. 1.

На відміну від нормальної роботи печі, задувочний період характеризується нестабільністю процесів, що об'єктивною необхідністю проходження етапу формування температурних полів у робочому об'ємі доменної печі та в горні.

Це вимагає додаткової витрати палива, більше необхідного, в порівнянні з тепловим балансом при нормальній роботі доменної печі і, відповідно, значно відрізняються параметри висхідного потоку газу і низхідного потоку шихти задувочного періоду.

При нормальній роботі печі теплообмінні процеси описуються відомими закономірностями встановленого протитечії Б. І. Китаєва: коли водяний еквівалент газу ($W_{\text{газ}}$) у верхній зоні теплообміну вище водяного еквівалента шихти ($W_{\text{шихта}}$): $W_{\text{газ}} > W_{\text{шихта}}$, в резервній зоні (приблизно середина шахти) вони рівні: $W_{\text{газ}} = W_{\text{шихта}}$; та в нижній зоні теплообміну $W_{\text{газ}} < W_{\text{шихта}}$ [3].

На основі теорії теплообміну при задувці формування температурних полів у робочому об'ємі доменної печі (вище за фурми) відбувається в умовах протитечії і характеризується повною завершеністю теплообміну до початку підвищення температури колошникового газу. Два основних фактори впливають на процес теплообміну: показник Q , що представляє кількість тепла від спалювання 1 кг вуглецю коксу та відношення водних еквівалентів $W_{\text{газ}}/W_{\text{шихта}} > 1$ у всій протиточній зоні до суттєвого розвитку прямого відновлення заліза [3].

Умови для завершення теплообміну в нижніх частинах доменної печі визначаються високим значенням коефіцієнта теплопередачі при високих температурах, наявністю сильно розвиненої поверхні нагріву, оскільки значна частина шихти знаходиться в розплавленому стані, та розвитком ендотермічних процесів, інтенсивність перебігу яких із зростанням температури підвищується. Ці обставини призводять до того, що висоти в кілька метрів виявляється достатньо для теплообміну між газом і шихтою. В результаті теплообміну, що супроводжується відновленням діоксиду вуглецю, температури газів та шихти практично стають рівними. Тому температура, з якою гази виходять із теплообміну, визначається початком інтенсивного відновлення діоксиду вуглецю коксом. Підігрівання шихтових матеріалів у верхній частині доменної печі не вимагає значних об'ємів та здійснюється на глибині 5-10 м нижче за рівня засипу шихти. Розрахунки також показали, що теплообмін між шихтою та газами відбувається на порівняно невеликих висотах, які в сумі значно менші за корисну висоту сучасних доменних печей.

Таким чином, при класичній задувці доменної печі необхідно вирішити дві важливі задачі:

- у короткий термін досягти роботи шахти доменної печі в стабільних умовах теплообміну;
- забезпечити прогрівання стінок горна та коксової насадки до рівня, коли чавун і шлак вільно витікають з печі, проходять по жолобах і зливаються в ковші або шлакові ями.

Мета роботи. Аналіз існуючих технологій задувки та роздувки, що дозволяють вивести доменну піч в короткі терміни до нормального режиму роботи, з дотриманням правил безпеки та без значних витрат, зі збереженням доменної печі та допоміжного обладнання для тривалої продуктивної експлуатації.

Історична ретроспектива. Історію розвитку методів задувки можна умовно розділити на *три періоди*.

Перший період проіснував до кінця 1930-х років і включав прийняття досить різноманітних і незвичайних організаційних і технологічних прийомів для покращення роботи доменної печі в пусковий період. Ці методи були викликані відсутністю наукової теорії про перебіг відновлювальних процесів та теплопередачі доменної печі. Іноді розігрів доменної печі до початку виплавки чавуну тривав кілька тижнів до початку завантаження залізрудних матеріалів і виплавки чавуну та шлаку.

Технологія задувки ґрунтувалася на старому досвіді, інтуїції, і м'яко кажучи, екстравагантних прийомах, змішаних з містикою та забобонами.

Відомий, наприклад, наступний випадок задувки ДП [4]. На денце доменної печі набили 50 мм маси зі смоли з дрібним коксовим сміттям. Потім обшили горн та під дошками товщиною 37 мм. За дошки набили масу зі смоли з дрібним коксовим сміттям. Зверху на дерев'яний настил набили 50 мм вогнетривкої глини. Потім, при завантаженні печі, було насипано сухі дерев'яні стружки шаром 100 мм. Далі поклали 150 сухих березових мітел. Поставили між мітлами 15 пляшок, наполовину наповнених гасом. На мітли клялися сухі березові дрова до 1/3 висоти заплечиків. Надалі були завантажені кокс і залізородні матеріали (табл. 2).

Таблиця 2 – Порядок завантаження ДП №4 Дніпровського заводу 1898 г. [4].

Горно та низ заплечиків		"0" шихта - 6 колош	
Смола та коксове сміття	товщина - 50 мм	Кокс, кг	3200
Дерев'яні стружки	товщина - 100 мм	Сієніт, кг	96
Березові мітли	150 шт.	Плавикий шпат, кг	64
Березові дрова	до 1/3 заплечиків	Доменний шлак, кг	480
Об'єм завантаженого матеріалу, м³	38,85		41,20
<i>Наступні завантажені матеріали:</i>			
	6 колош	6 колош	6 колош
Руда Криворізька, кг	992	1152	1552
Кварцит, кг	1040	1408	2128
Плавикий шпат, кг	96	96	0
Вапняк, кг	1056	1344	2128
Марганцева руда, кг	0	80	128
Об'єм завантаженого матеріалу, м³	18,61	24,04	36,00
Загальний об'єм завантаженого матеріалу з урахуванням умінки, м³			170,30

Внаслідок такого завантаження березові мітли ущільнились і зовсім не хотіли горіти. Через 4 години після задувки дали слабкий тиск дуття – 0,025-0,04 атм., та покровою збільшували до 0,27 атм через 20 годин після початку задувки. Перші три випуски чавуну характеризувалися високим вмістом сірки (3,53%, 1,97% і 1,30%) та кислими шлаками і тільки з 4-го випуску піч наблизилася до звичних шлаків і чавунів.

Однак такий спосіб задувки призвів до занадто швидкого розігріву і, в подальшому, руйнуванні стінок горна до такої міри, що призвело до виходу "козлового" чавуну назовні через стінку горна вище шлакової льотки вже на 8 день з початку задувки. Отримати такий невдалий результат в принципі дуже нелегко - сірка в чавуні вище за граничну

розчинність.

Протягом першого періоду задувались доменні печі з внутрішнім об'ємом від 100 до 1000 м³ і більше, але результати не завжди були успішними. Ми назвали цей період розвитку технології задувки доменних печей, який характеризується відсутністю наукових знань про процеси теплообміну та відновлення, здобрений забобонами та містицизмом, започаткований, в основному, на попередньому досвіді – періодом «Містицизму, Інтуїції та Досвіду старих майстрів» [4-9].

Другий період (з 1930-х до початку 1970-х рр.) характеризується освоєнням методу задувки, що передбачає заповнення першого об'єму типовою архітектурою стовпа шихти, який складається, як правило, з дров, потім шару холостих подач коксу, вище – шар коксу з флюсами та 4÷10 шарів з низьким, з поступова зростаючим, рудним навантаженням, з витратою коксу в шарі від 1,1 до 4,0 тонни на тонну заліза. Доменні печі з внутрішнім об'ємом від менш, ніж 1000 до 3000 м³ задували в цей час в США, Японії, країнах Європи, колишнього СРСР та Австралії, але істотних інновацій в технології задувки було небагато [7-11].

Вдування шихти зазвичай починали з дров (рис. 1), використовуючи шпали або дерев'яний брус у вогнищі. Ця традиція прийшла з 19-го століття, оскільки температура гарячого дуття була низькою (250-350°C), тому дрова легко розпалювалися на початковому етапі і спрощували запалювання коксу. У низці випадків відмовилися від завантаження шару дров у горні [11], а прогрівання коксу в горні проводили, випускаючи з відкритих льоток газ із печі.



а



б

Рисунок 1 – Завантаження дров в горно перед вдуванням, США, 1920 рік (а) та дерев'яні дрова, замовлені для завантаження в горно на заводі ArcelorMittal у Віторії, Бразилія, 2008 рік (б).

Використання дров під час задування ДП описано, наприклад, у [12]. Дрова укладали, починаючи від поду, прикривали стінки горна, захищали фурми таким чином, щоб верхній шар дров знаходився вище фурм. Іноді обшивали шпалами заплечики. Перевагою дров є та обставина, що дрова легше запалюються і швидше вигорають

порівняно з коксом, звільняючи місце для вище розташованого розігрітого коксу. Якщо під час задування в металоприймач, куди покладено дрова, надходить не кисень, а нагрітий фурменний газ, то дрова піддаються термічному піролізу, також водночас істотно зменшуючись в об'ємі.

Оскільки дрова містять незначну кількість золи, вона не формує в'язких шлаків у горні та не створює додаткових труднощів із розкриттям льоток. Крім того, багато операторів вважають, що дрова, згораючи або зменшуючись в об'ємі під час піролізу, забезпечують плавний початок сходження шихти без примусових осідань або мимовільного обриву шихти.

За останні 100 років конструкція ДП та допоміжного обладнання істотно змінилися: збільшення об'єму доменних печей до 5000-5600 м³ призвело до "потовщення" профілю ДП (оскільки діаметр горна і розпару значно зросли порівняно з висотою шахти), збільшено висоту горна і щільність розташування фурм, поглиблено зумпф. Значно покращилася якість коксу та залізородних матеріалів. Сучасні потужні повітрянагрівачі з перших хвилин задувочного періоду можуть підтримувати температуру дуття в межах 650-850°C, що гарантовано забезпечує загорання коксу без дров.

Таким чином, зручність задування "на дровах" вступає в протиріччя з великою втратою часу на підготовку ДП до задувочного періоду, включно з потребою охолодження ДП після сушіння горна і шахти, яке потрібне після завершення ремонту, особливо при торкретуванні шахти. Загалом графік підготовки ДП до задувочного періоду зі встановленням кліті з дров у горні вимагає 4-7 днів залежно від об'єму горна і місцевих особливостей ремонту та умов експлуатації.

Досвід ІЧМ НАНУ по задувкам доменних печей України та Росії підтверджує, що використання дров у період задування – не є обов'язковим. Доменні печі об'ємом 1000 ÷ 5000 м³ на ПАТ "АМКР", ПАТ "АМК", ПАТ "Запоріжсталь", ВАТ "НЛМК", ПрАТ "ММК" та інші задувають ДП без застосування дров. Багато заводів з 1968 року відмовилися від використання дров при задувці, але близько 20% доменних печей продовжують використовувати дрова і сьогодні [13].

Науково-практичний інтерес представляє теплотехнічний аналіз задувки з використанням дров на ДП №4 ПрАТ "МК "Азовсталь" і його зіставлення з іншими способами задувок доменних печей. У таблиці 3 наведено результати порівняльного аналізу теплової роботи 300 м³ соснових колод з мінімальним і максимальним вмістом вологи, характерним для лютого, з аналогічним об'ємом коксу, завантаженим в металоприймач ДП №4 ПрАТ "МК "Азовсталь" (рис. 2, табл. 3).

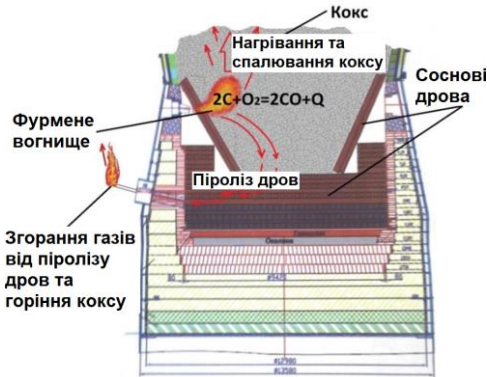


Рисунок 2 – Схема розташування соснових колод та термодинаміка роботи горна в період задувки ДП №4 ПрАТ "МК "Азовсталь".

Таблиця 3 – Зіставлення хімічного складу та теплової роботи соснових колод і коксу, завантаженого в металоприймач під час задувки ДП №4 ЧАО «МК «Азовсталь»¹.

Паливо	Дрова		Кокс
Об'єм матеріалу, м ³	300 м ³		
Вміст вологи	мінімум	максимум	
Хімічний склад:			
Абсолютна вологість ² , %	20	45	5
Вуглець, %	14,5	14,5	87
Летючі, %	85	85	0,8÷1,2
Зола, %	1-2	1-2	11
Температура займання, °С	250	250	450-750
Насипна густина ³ , кг/м ³	416	416	450
Маса з урахуванням вологи, т	156	156	135
Суха маса, т	130	108	129
Кількість вологи, т	26	48	7
Витрати енергії на випаровування вологи, ГДж	-61	-113	-16
Температура термічного розкладання, °С	270÷450	270÷450	-
Кількість теплоти, що виділяється при піролізі, ГДж	+86÷108	+104÷130	0
Кількість теплоти, яку потрібно повідомити матеріалам під час їх нагрівання до 1200°С, ГДж	-156	-129	-172
Кількість теплоти, яку потрібно повідомити коксу через усадку дров ⁴ , ГДж	-160	-160	-
Сумарні затрати теплоти, ГДж	-269	-313	-188

¹ Тепловий ефект зі знаком мінус - поглинання теплоти, зі знаком плюс - виділення теплоти;

² Приймалася вологість деревини, просушеної природним шляхом на відкритому повітрі;

³ Середня порозність соснових колод 0,2;

⁴ Вихід твердого залишку у вигляді деревного вугілля становить близько 15%.

Зіставлення оціночних теплових ефектів під час використання 300 м³ соснових колод (з мінімальним і максимальним вмістом води в них і порозністю ~ 0,2) порівняно з аналогічним об'ємом коксу під час задування доменної печі показало, що з теплотехнічного погляду використання соснових колод під час задування недоцільне. У разі використання коксу замість 300 м³ соснових колод необхідно внести в горн у 1,4 ÷ 1,7 разів менше теплоти.

Кількість енергії, що виділяється під час піролізу соснових колод залежно від вмісту води в них, не значно більша за витрати енергії на її випаровування (табл. 2). У соснових колодах міститься в 3,5-7 разів більше води, на випаровування якої необхідно затратити відповідно в 3,5-7 разів більше енергії, в порівнянні з витратами енергії на випаровування води з коксу.

По закінченню процесу піролізу деревини вихід твердого залишку з неї у вигляді деревного вугілля становить близько 15%, включно з золою, від маси абсолютно сухого зразка, 85% становить вихід летких. Тобто, відбудеться зменшення об'єму дров без урахування уминки деревного вугілля під вагою стовпа шихти мінімум на 85%. Цей простір, з досвіду задувки ДП №4 ПрАТ "МК "Азовсталь", через 2 ÷ 4 години від початку задувки буде зайнятий погано прогрітим коксом і надалі задувка відбудуватиметься за неповноти печі на 255 м³.

Було розроблено новий спосіб нагрівання горна, без укладання дров. Цей метод полягає у вдуванні гарячого повітря через з фурм у льотку за допомогою "Труби Дюрфі" [9, 14].

Також, протягом другого періоду було сформульовано низку цінних рекомендацій щодо вдосконалення технології задувок ДП, які ґрунтуються на практичному досвіді. Розроблена типова процедура задувок дала змогу уникати серйозних порушень у роботі доменної печі та забезпечила встановлення нормальних робочих параметрів зазвичай протягом 15 діб.

В результаті задувки проводилися більш-менш успішно, проте зберігалися деякі проблеми. Найпоширенішими з них – проблеми з відкриттям кількох перших випусків, чавун і шлак перших випусків були холодні, що ускладнювало очищення жолобів і підготовку наступного випуску.

Крім того, 500-1500 тонн холодного чавуну містили велику кількість сірки та непередбачуваний вміст кремнію в діапазоні від 0.1% до 10.0%. Відповідно, властивості шлаків також погано подавалися контролю. Часто доводилося охолоджувати верх печі за допомогою розбризкування води протягом декількох годин у міру підвищення рудного навантаження завантаженої шихти.

Більшість статей і довідників, опублікованих за цей період часу [7,

15-17], містили подібні рекомендації та практики з відносним благополуччям задувок у всьому світі, тому ми називаємо цей період "Традиційні задувки з проблемою перших холодних випусків". Сьогодні багато заводів все ще використовують цей "традиційний" підхід. Приклади таких задувок можна побачити в [7,15].

Третій період у розвитку технології задувок почався в 1970-х роках і триває до теперішнього часу. За цей час було введено в експлуатацію великі доменні печі з внутрішнім об'ємом 3200 - 5600 м³.

Основною характеристикою цього періоду є впровадження наукового підходу до практики задувок і поява важливих інновацій, спрямованих на усунення труднощів "традиційних задувок", такими як холодні перші випуски і відносно тривалі періоди виведення печі на нормальний режим роботи. Ми називаємо це періодом "Наукового підходу до технології задувок". Були проведені великі експерименти з акцентом на інтенсифікацію теплообміну під час задування доменної печі з добавками природного газу [11, 18-24], коксового газу [25], азоту [26-31], кисню [32] і навіть пари [33] з високими температурами гарячого дуття в перші години задувочного періоду. Узагальнення та валідація нових знань і досвіду задувок тривають, з'являються нові ідеї щодо вдосконалення технології задувок. Наприклад: шар відновлених залізних брикетів, або брукст стали використовувати в стовпі шихти між шарами холостого офлюсованого коксу і шарами із залізорудним навантаженням, попереднє нагрівання коксу в горні з використанням азоту, введення "моно-шихти" - спеціального агломерату з низькою основністю, використовуваного для задувки. Ці розробки було успішно реалізовано під час задувки доменних печей [34,35].

Шлаки в задувочному періоді. Для створення оптимальних умов шлакового режиму, а саме рівномірного його прогрівання і достатньої рідинної плинності за температурних коливань по перерізу печі, а також покращення процесів десульфурації під час плавки до задування шихти в певних кількостях і послідовності вводили шебінь (або гранульований шлак), гравій, марганцеву руду, вапняк. Усе це забезпечувало стабільність хімічного складу продуктів плавки. Підтримання основності шлаку (CaO:SiO₂) в межах 0,85-1,05 давало змогу одержувати стійкі шлаки, що є одним із головних чинників створення в горні хороших умов для дренажу продуктів плавки.

Вміст Al₂O₃ в шлаку повинен бути нижче 14%, але краще навіть менше 13,0%. Для розбавлення глинозему з коксової золи і руди оптимальна кількість шлаку на виході з першої шихти може варіюватися в межах 400-900 кг/т.

Під час вибору основних параметрів задувочної шихти, крім вибору основності за співвідношенням - CaO:SiO₂, особливу увагу приділяють

рівню загального рудного навантаження в задувочній шихті. Рудне навантаження в задувочній шихті визначається з розрахунку вмісту кремнію в чавуні 3,0-3,5%. Як правило, цільовим показником у процесі задування є доведення виходу шлаку до 400-500 кг/т чавуну, і з цією метою використовують залізородні матеріали, якими володіє комбінат. Хімічний склад сирих матеріалів обирають із розрахунку підтримання основності шлаку в раціональному діапазоні, що забезпечує хороший дренаж продуктів плавки. Послідовність укладання матеріалів по висоті печі повинна обов'язково враховувати наступне:

- шихтові матеріали, що вимагають високого рівня теплової та відновлювальної обробки, розташовуються на рівні середини шахти і вище;
- матеріали задувочної шихти в робочому просторі печі мають бути розташовані з урахуванням явищ випередження та уминки;
- рудне навантаження задувочних шихт має збільшуватися відповідно до прогрівання кладки і стовпа шихтових матеріалів за умови забезпечення нормального фізичного нагріву продуктів плавки та їхньої рідинної рухливості.

Про вплив конструкції систем охолодження та вогнетривів. Час прогрівання футерівки і збільшення теплових втрат у системі охолодження печі до робочих значень становить від 15 до 20 годин і більше залежно від типу футерівки та системи охолодження печі (рис. 3, 4) [10, 28].

Для задування доменних печей без процесу сушіння футерівки розробляють спеціальні конструкції горну та поду, які враховують навантаження на неї від тиску пари, внаслідок випаровування вологи та розширення матеріалів. Для захисту лещаді від теплових ударів зверху її викладають із малотеплопровідних матеріалів (низькосортна вогнетривка цегла).

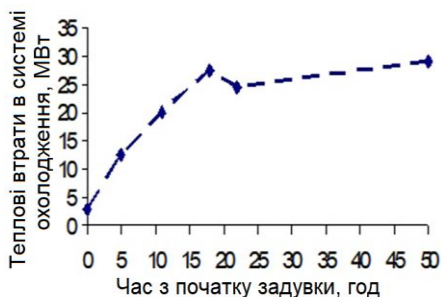


Рисунок 3 – Теплові втрати в системі охолодження ДП №9 ПАТ "АМКР" під час задувки.

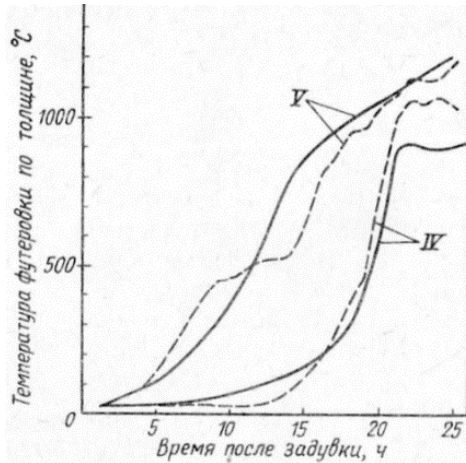


Рисунок 4 – Прогрівання футеровки за даними японських дослідників [10].
На рисунку відмітки: IV – температура в кладці ДП на відмітці 13 м над рівнем повітряних фурм (суцільна лінія відповідає розрахунковим значенням, пунктирна – фактичним); V – температура в кладці ДП на відмітці 7,5 м над рівнем повітряних фурм (суцільна лінія відповідає розрахунковим значенням, пунктирна - фактичним).

Для прогрівання футеровки горна та поду в чавунні льотки вставляють перфоровані труби діаметром 80÷100 мм з довжиною "висуву" їх у металоприймач не менше ніж 2/3 радіуса горна. Отвори розташовані на відріжку труби, розташованій в печі, і орієнтовані в бік поду. На ливарному дворі перед трубами встановлюють пальники з природним газом, що забезпечує надійне допалювання горнових газів, які виходять під час задувки печі [23].

У світовій практиці для недопущення розтріскування невисушеного футерування шахти застосовують вогнетривкі бетони – торкрет-маси з малим вмістом вологи і коефіцієнтом термічного розширення.

Задувки доменних печей з використанням азоту. Труднощі в забезпеченні режиму задувки печі за наявних технологій задувки із застосуванням атмосферного дуття, природного газу і пари полягають, насамперед, у тому, що для прогріву стовпа шихти до колошника, за різними даними, потрібно приблизно 15-30 годин, а за цей час у процесі спалювання коксу шихта опускається до фурменної зони і починає плавитися, не прогрівшись по всій висоті печі [3,10,26-31]. При цьому спостерігається збільшення газодинамічного опору

висхідному потоку горнових газів і зниження витрати дуття. Тобто не забезпечуються типові умови для протікання стійкого теплообміну між газовим потоком і матеріалами, завантаженими в піч - теплообмін між газовим потоком і шихтою не завершено, а процес плавлення активізовано (рис. 5).

Найсприятливішим варіантом для формування зон розм'якшення і плавлення є технологія задування печі із застосуванням нагрітого азоту, що дає змогу, до початку плавлення залізородних матеріалів, що перебувають над неодруженими подачами коксу, у робочому просторі печі під час задування сформувати температурне поле шихти та газового потоку, що забезпечує стійкий перебіг теплообмінних процесів, ефективність якого зростає зі зменшенням концентрації кисню в дутті та збільшенням температури дуття.

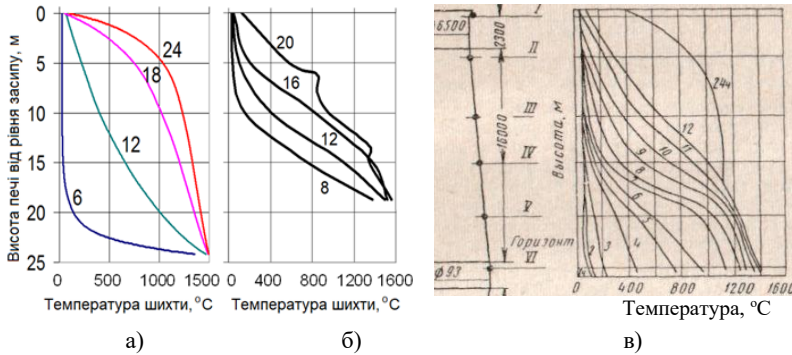


Рисунок 5 - Порівняння розрахункових даних, отриманих для задувки ДП №9 ПАТ "АМКР" у 2003 р. (а) з експериментальними даними японських дослідників (б) [10,28] і за даними Б.І. Китаєва для НТМК (в) [3]. Цифри біля кривих відповідають часу в годинах після початку задувки.

Доцільність використання нагрітого азоту в доменному виробництві привертала увагу металургів давно. Одним із перших цю ідею сформулював А. С. Саркісянц ще в 1911 році [29, 30], за зміни кон'юнктури ринку в сімдесяті роки минулого століття її активно розвивали металурги Японії для регулювання поточного виробництва чавуну.

Велику увагу розвитку технології використання азоту приділяли в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова. Фахівці інституту виконували задувки і дослідні плавки із застосуванням нагрітого азоту на доменних печах України і Росії. Накопичений досвід із задування печей із використанням нагрітого азоту малої, середньої та великої потужності об'ємом 600-5000 м³ показав, що ця технологія дає змогу [26-28, 31]:

- ефективно прогрівати шихтові матеріали по висоті;
- знизити витрату коксу, в середньому, на 15%, що, крім економії в разі виникнення "розладів" у тепловій роботі печі, залишає резерв часу для вжиття заходів, що не допускають похолодання горна;
- отримувати добре прогрітий чавун, що відповідає вимогам ТУ на виплавку ливарного чавуну;
- зменшити теплові навантаження на футерівку та кожух печі;
- знизити ймовірність прогару повітряних фурм;
- закласти базис для надійної, тривалої та ефективної роботи печі та агрегатів, що її обслуговують;
- попередити і пом'якшити наслідки порушення рівності ходу печі, пов'язані з організаційними або технологічними причинами (склад і розподіл завантажувальних шихт, зростання температури дуття за умови зниження його витрати тощо).

З досвіду задувок доменних печей заводу ім. Г. І. Петровського та ЗСМК, наявний резерв нагрітого азоту, чистотою 99,3%, може бути подано через чавунні льотки або фурми для сушіння і прогріву шихти до максимально можливої температури під час або після її завантаження в піч [26-31]. Надалі для запалювання коксу на фурмах, прогрівання шихтових матеріалів по всій висоті доменної печі, організації стійкої її тепло-газодинамічної роботи та отримання, фізично добре прогрітих продуктів плавки, спільно з нагрітим азотом необхідна подача атмосферного дуття. Зниження концентрації кисню в дутті дасть змогу в інтервалі більшого часу прогрівати і сушити шихтові матеріали по висоті печі до настання фази їхнього плавлення завдяки уповільненню процесу спалювання вуглецю коксу та опусканню шихтових матеріалів до високотемпературної фурменої зони.

Застосування нагрітого азоту, порівняно з іншими енергетичними добавками, дає змогу в ширших діапазонах, і більш ефективно для прогрівання шихти по всій висоті доменної печі за забезпечення її рівності "ходу", регулювати розвиток теплообмінних і газодинамічних процесів. Ефект від застосування нагрітого азоту зростає в міру зниження концентрації кисню в дутті та збільшення його температури. Підвищення температури дуття на 100°C збільшує коефіцієнт використання теплоти (КВТ) вуглецю коксу в печі на 5-10 % при вмісті кисню в дутті 14-21%. При цьому кожен відсоток зниження концентрації кисню в дутті зменшує теоретичну температуру горіння на 60°C. Для збереження величини теоретичної температури на колишньому рівні необхідно підвищити температуру дуття на 70°C [37] (рис. 6).

Таким чином, КВТ палива у разі збагачення дуття азотом зменшується в горні, а в зоні помірних температур і в печі загалом зростає. Це сприятливо впливає на газодинаміку і розвиток фізико-

хімічних процесів, що протікають у печі, знижує теплові навантаження на футерівку, забезпечує економію коксу.

"Прогресивна" технологія задувки з використанням природного газу. Крім задувки азотом, інші технології після "холодного" ремонту або нового будівництва можна розділити на "традиційні", що застосовуються з невеликими відмінностями в усьому світі [1-3, 7, 9, 10], і прискорену "прогресивну липецьку" задувку, розроблену на НЛМК в 1985-1989 рр. [22-25]. Основними особливостями інноваційної технології задувки є важливі зміни в архітектурі стовпа шихти, контроль перепаду тиску вздовж ДП і теоретичної температури горіння, підтримання більш високої швидкості дуття та використання великих об'ємів природного газу з перших годин продувки [13, 22-25]. На рис. 7 представлені результати зондування ДП №5 НЛМК (внутрішній об'єм 3200 м³) на двох горизонтах шахти протягом перших 35 годин з моменту загорання коксу. Аналіз попередніх задувок, а також отримані результати дозволили створити надійну прискорену та економічну технологію продувки.

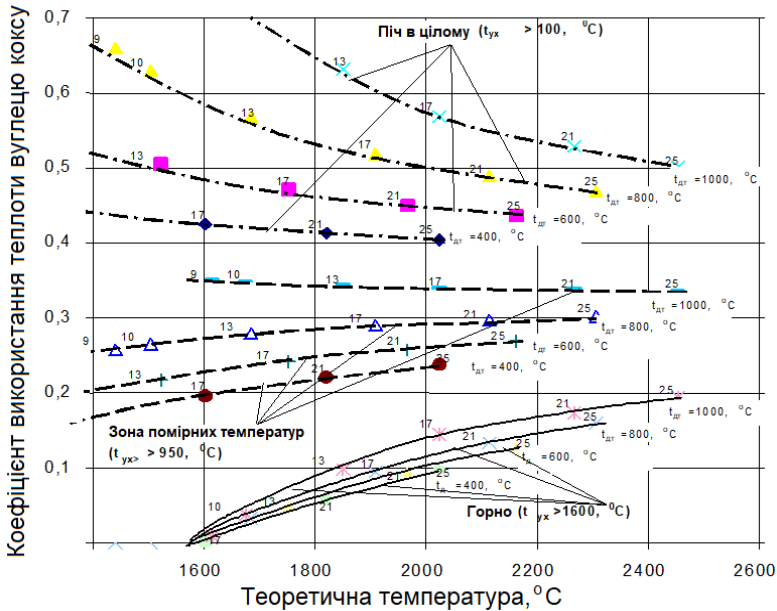


Рисунок 6 – Взаємозв'язок КВТ вуглецю коксу і теоретичних температур горіння за різного вмісту кисню і нагрівання дуття, °C.

На малюнку: цифри біля точок на кривих - вміст кисню в дутті, %.

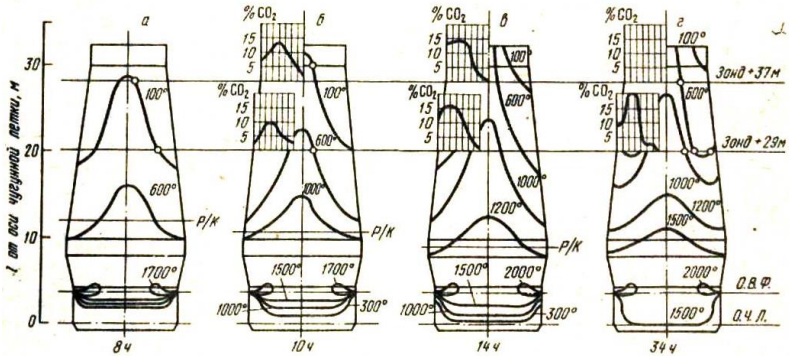


Рисунок 7 - Результати зондування доменної печі №5 ВАТ "НЛМК" на двох горизонтах шахти протягом перших годин задування [22].

На нову технологію задування доменної печі отримано авторське свідоцтво СРСР [18] та два патенти РФ [38, 39]. Нова технологія вдування доменних печей була неодноразово випробувана на доменних печах НЛМК корисним об'ємом 1000, 2000 і 3200 м³.

Основні елементи прискореного вдування були успішно застосовані на "ТулаЧермет", а також на заводі Vizak в Індії під керівництвом В.В. Капоруліна. Така технологія задувки доменної печі забезпечує прискорене досягнення нормальних параметрів шихти і гарячого дуття вже через 24-45 годин після загорання коксу. Гарячий метал з першої ж плавки добре нагрівається і має відповідну якість, що дозволяє відокремлювати чавун і шлак на скімері вже з першої плавки.

Порівняння тепловіддачі палива при вдуванні азоту, природного газу, кисню та пари під час вдування. Залежність споживання теплової енергії в доменній печі від вологості гарячого дуття, температури гарячого дуття, збагачення азотом, киснем і вдування природного газу представлено на рис. 8. Робочий діапазон теоретичної температури горіння передбачається в межах 1750-2300°C (виділено жовтим кольором на рис. 8). Розрахунки проводилися на основі спрощених рівнянь, визначених в [36]. В доменній печі є надлишок коксу, який реагує з киснем і паром гарячого дуття. Безпечна робота печі завжди можлива в білій області графіка, але також може бути досягнута в лівій жовтій області протягом перших кількох годин після задувки. Тепловіддача палива в доменній печі для різних кількостей азоту/кисню в дутті представлені червоними лініями, де $\omega = 0,21$ - атмосферне повітря, $\omega > 0,21$ - зона, збагачена киснем, і $\omega < 0,21$ - зона, збагачена азотом. Широкі сині лінії показують вплив вдування природного газу разом з температурою гарячого дуття 600°C, 900°C і 1200°C без збагачення киснем. Вдування природного газу

Висновки

Виділяють три періоди розвитку технології задувок доменних печей. 1-й період характеризується відсутністю наукових знань, коли дії ґрунтувалися на містиці, інтуїції та старому досвіді (до 1930-х років). У 2-му періоді (до початку 1970-х років) освоювалася "традиційна" технологія вдування з не вирішеною проблемою – труднощами з відкриттям кількох перших випусків, чавун і шлак перших випусків були холодні і водночас з перегрівом колошнику доменної чаші.

3-й період (триває до сьогодні) включає розробку нових методів інтенсифікації теплообміну під час задувки та наукове узагальнення досвіду задувок. Для успішного проведення задувок необхідно досягти встановленого режиму теплообміну і відновлення оксидів заліза, забезпечити попередній нагрів коксу в горні та футерівки до рівня, коли чавун і шлак добре прогриваються, вільно виходять з печі, а склад чавуну відповідає вимогам, що пред'являються до ливарного чавуну. Використання дров в період продувки не є обов'язковим, хоча 20% продувок в світі все ще забезпечуються дровами. Для інтенсифікації теплообміну в період продувки найкращими добавками до гарячого дуття є природний газ або азот. Такі технології вдування дозволяють повністю використовувати потужність доменних печей і знизити витрату коксу в період задувки до 15%. За досвідом авторів, щонайменше 10% задувок доменних печей супроводжуються технологічними порушеннями, аж до охолодження горна. Тому залучення досвідчених консультантів для надання допомоги у проведенні задувок доменних печей є актуальною рекомендацією.

Перелік посилань

1. Урбанович Г. И., Альтер М. А., Капорулин В.В., и др. Изменение температуры в горне доменной печи во время длительной остановки и пуска после нее. *Металлург.* 1992. № 5. С. 23.
2. Чернобривец Б. Ф., Альтер М. А., Емельянов В. Л., Капорулин В. В. Особенности задувки доменной печи после длительной остановки без выпуска козлового чугуна и заливки печи водой. *Металлург.* 1995. № 10. С. 20–21.
3. Китаев Б. И., Ярошенко Ю. Г., Лазарев Б. Л. Теплообмен в доменной печи. М. : Металлургия, 1966. 355 с.
4. Жендзян С. В. Устройство и ведение доменных печей. Харьков : Пролетарий, 1927. 774 с.
5. Красавцев Н. И., Сировский И. А. Очерки по металлургии чугуна. Москва : Металлургиздат, 1947. 492 с.
6. Резолюции, принятые Всесоюзной конференцией металлургов : материалы всесоюз. конф., г. Магнитогорск, 1951. Москва : Металлургиздат, 1951. С. 9–12.
7. Rorick F. C. Lecture 14 – Challenging Blast Furnace operation. *Blast Furnace and Iron-making an intensive course.* McMaster University, Hamilton, Ontario,

Canada, 2006, P. 1–65.

8. Кудояров М. С., Жигулев П. Г., Парфенов Е. Г. и др. Задувка доменной печи после капитального ремонта. *Металлург.* 1968. № 10, С. 10–11.

9. *Proceedings of the AIME Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials Conference : Session: Blowing in Practice*, Apr. 21 1953. Buffalo : AIME, 1953. P. 216–245.

10. Кутнер С. М. Технология задувки доменных печей за рубежом: Обзорн. информ. сер. «Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна». Москва : ин-т «Черметинформация», 1984. Вып. I. 43 с.

11. Жеребин Б. Н. *Практика ведения доменной печи* : монография. М., 1980. С. 73–98.

12. Остроухов М. Я. Газовщик доменного цеха : 3-е изд., перераб. и доп. Харьков, 1937. 246 с.

13. Alter M., McGovern C. The Best way to Blow-In of Blast Furnace: Definition, Philosophy, Theory, and Practical Approach. *AISTech-2013 Proceedings*, 6-9 May 2013. Pittsburgh, 2013. P. 367–379.

14. Method of blowing in Blast Furnace: пат. 2468738 США. № 722174; заявл. 15.01.1947; опубл. 03.05.1949. 5 с.

15. Гердес М., Токсопеус Х. *Введение в современный доменный процесс* : монография. Липецк, 2004. С. 105–110.

16. Wakelin D., Fruehan R. *Making, Shaping and Treating of Steel (Iron Making)* : monography. Pittsburgh : The AISE Steel Foundation, 1999. P. 699-739 (chapter 10).

17. Металлургия чугуна / Вегман Е. Ф. и др. ; под общей ред. Ю. С. Юсфина (3-е изд., перераб. и доп.). М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.

18. А. с. 1424342 СРСР. Спосіб задувки доменної печі / В. В. Капорулін, Б. Ф. Чернобривець, Г. І. Урбанович, В. Л. Ємельянов, М. А. Альтер, В. І. Козодеров. № 4137910; заявл. 17.07.1986; опубл. 15.05.1988.

19. Галиев Г. Г., Кривоносов В. И., Пономарев Ф. П. и др. Задувка доменной печи с применением природного газа. *Металлург.* 1976. № 2. С. 15–17.

20. Спосіб задувки доменної печі: пат. 519474 СРСР: С21 В3/00. № 2036204/02; заявл. 14.06.1974; опубл. 30.06.1976. 2 с.

21. Григорьев В. Н., Яриков И. С., Альтер М. А. и др. Принципы расчета задувочной шихты и выбора дутьевого режима при пуске доменной печи. *Сталь.* 1999. № 2. С. 1–6.

22. Капорулин В. В., Урбанович Г. И., Альтер М. А. и др. Некоторые вопросы технологии задувки доменных печей. *Сталь.* 1989. № 6, С. 17–20.

23. Капорулин В. В., Григорьев В. Н., Альтер М. А. и др. О рациональной тепловой подготовке горна при задувке доменной печи. *Сталь.* 1989. № 10. С. 9–12.

24. Чернобривец Б. Ф., Капорулин В. В., Завидонский В. А. *Практика доменного производства.* М. Металлургия : 1992. 111 с.

25. Спосіб задувки доменної печі: пат. 1225858 СРСР: С21 В7/24. № 3757566/22-02; заявл. 22.06.1984; опубл. 23.04.1986. 3 с.

26. Жембус М. Д., Монаршук А. П., Огурцов А. П., Васюченко А. И. Форсированная раздувка доменных печей с пониженным расходом кокса. *в кн.*

«Экономия кокса в доменных печах». М. : Металлургия, 1986. С. 23–28.

27. Жембус М. Д., Монаршук А. П., Зуенок Г. А. Применение азота при раздувке доменных печей. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1986. № 2. С. 7–9.

28. Бородулин А. В., Васюченко А. И., Дмитренко К. А., Костенко Г. П. и др. Задувка доменной печи объемом 5000 м³ с применением нагретого азота. *Сталь*. 2006. № 9. С. 6–9.

29. Жембус М. Д., Монаршук А. П., Бородулин А. В. Тепловая работа доменной печи в период раздувки. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1987. № 6. С. 145–146.

30. Янковский А. С., Марьясов М. Ф., Бородулин А. В. и др. Раздувка доменной печи с применением азота. *Металлург*. 1988. № 11. С. 29.

31. Демидов В. А., Таранец А. И., Котов В. В. Технология выдувки и задувки доменной печи с использованием азота. *Металл и литье Украины*. 2005. № 5. С. 16–20.

32. Пареньков А. Е., Мишин Ю. П., Вегман Е. Ф. и др. Исследование доменного процесса в задувочный период при вдувании кислорода в центральную часть горна. *Изв. ВУЗов. Черная металлургия*. 1983. № 5. С. 20–24.

33. Пареньков А. Е., Ростовский А. В., Михайлов А. В. Задувка доменной печи на паровоздушном дутье. *Материалы 51-й студенческой научно-технической конференции МИСиС*, Москва, 1997.

34. Михайлов В. Г., Семенов О. А., Гавриков Ю. В., Прохорова Т. В., Иноземцев Н. С. Опыт промышленного производства агломерата для задувки доменных печей. *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. 2014. № 10. С. 34–38.

35. Щеглов Э. М., Холодный Д. П., Грачев С. Н., Титов В. Н., Бурмыкин В. Б., Ивлева Л. С., Иноземцев Н. С., Михайлов В. Г., Дубровский С. А. Совершенствование технологии задувки доменных печей после капитальных ремонтов I и II разрядов. *Металлург*. 2013. № 12. С. 40–43.

36. Саркисянц А. С. Некоторые выводы из теории доменного процесса. *Сталь*. 1937. № 1.

37. Бородулин А. В., Горбунов А. Д., Романенко В. И., Сущев С. П. *Домна в энергетическом измерении*. Днепропетровск : ДГДУ, 2006. 542 с.

38. Спосіб задувки доменної печі: пат. 2132390 Росія: С21 В3/00. № 98104665/02; заявл. 12.03.1998; опубл. 27.06.1999. 5 с.

39. Спосіб задувки доменної печі: пат. 2164242 Росія: С21 В3/00. № 99111395/02; заявл. 31.05.1999; опубл. 20.03.2001. 5 с.

40. Пишикин А. А., Альтер М. А., Щеглов Э. М., Семенов О. А., Логвинов Н. В., Титов В. Н., Иноземцев Н. С. Анализ отклонений в ходе доменной плавки в задувочном периоде и меры по их предотвращению и устранению. *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. 2022. Том 78, № 8. С. 3–11. DOI: 10.32339/0135-5910-2022-8-671-681

References

1. Urbanovich, G. I., Alter, M. A., Kaporulin, V. V. et al. (1992). *Izmenenie temperatury v gorne domennoi pechi vo vremia dlitelnoi ostanovki i puska posle nee* [Temperature change in the hearth of a blast furnace during a long stop and start after

it]. *Metallurg*, (5), 23

2. Chernobrivets, B. F., Alter, M. A., Emel'yanov, V. L., & Kaporulin, V. V. (1995). Blowing-in a blast furnace after a long-term shut-down without discharging saw-iron and filling in water. *Metallurgist*, 39, 176. <https://doi.org/10.1007/BF00740810>

3. Kitaev, B. I., Iaroshenko, Yu. G., Lazarev, B. L. (1966). *Heat exchange in the blast furnace*. Moscow. P. 355 [in Russian]

4. Zhendzyan, S. V. (1927) *The construction and operation of blast furnaces*. Kharkov, Proletarian. P. 774 [in Russian]

5. Krasavtsev, N., & Sirovski, I. (1947) *Outline of Iron Metallurgy*. Moscow. P. 492 [in Russian]

6. *Resolutions Adopted by All-Union Conference of Ironmakers*. (1951). Magnitogorsk, Metallurgisdat, 9-12

7. Rorick, F. C. (2006). Lecture 14 - Challenging Blast Furnace operation. *Blast Furnace and Iron-making an intensive course*. McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, P. 1–65

8. Kudoyarov, M. S., Zhigulev, P. G., Parfenov, Y. G. et al. (1968). Blowing in a blast furnace after major overhaul. *Metallurgist*, (12), 522-524. <https://doi.org/10.1007/BF00734160> (Without firewood)

9. *Proceedings of the AIME Blast Furnace, Coke Oven and Raw Materials Conference : Session: Blowing in Practice* (1953, Apr. 21), Buffalo, 216-245

10. Kutner S. M. (1984). Blast Furnace Blow-in technology Abroad. *Chernmet Informatsiya*, (1), P. 43 [in Russian]

11. Zherebin, B. N. (1980). *Blast Furnace Management Practice* (pp. 73-98). Moscow [in Russian]

12. Ostrouhov, M. Ya. (1937). *Blast furnace gasman operator* [3rd ed.]. Kharkov. P. 246 [in Russian]

13. Alter, M., & McGovern, C. (2013, May 6-9) The Best way to Blow-In of Blast Furnace: Definition, Philosophy, Theory, and Practical Approach. *AISTech-2013 Proceedings*, Pittsburgh, PA, 367-379

14. Durfee, W. W. et. al. (1949). U.S. Patent No. 2468738. U.S. Patent and Trademark Office

15. Geerdes, M., Toxopeus, H., & Van der Vliet, C. (2004). *Modern Blast Furnace Ironmaking* (pp. 105-110). Verlag Stahleisen GmbH, ISBN 3-514-00713-6

16. Wakelin, D., & Fruehan, R. (1999). *Making, Shaping and Treating of Steel (Iron Making)* (pp. 699-739, chapter 10). Pittsburgh : The AISE Steel Foundation

17. Vegman, E. F., Zherebin, B. N., Pohvisnev, A. N. et al. (2004) *Metallurgy of cast iron* [3rd ed., revised.]. Moscow. P. 774 [in Russian]

18. Kaporulin, V. V., Chernobrivets, B. F., Urbanovich, G. I., Emel'yanov, V. L., & Alter, M. A. (1986). USSR Author's Inventor's Certificate No 1424342. USSR State Committee for Inventions and Discoveries

19. Galiev, G. G., Krivososov, V. I., Ponomarev, F. P. et al. (1976) *Zaduvka domennoi pechi s primeneniem prirodno go gaza* [Blowing-in a Blast Furnace with natural gas]. *Metallurg*, (2), 15-17

20. Zherebin, B. N. et. al. (1976) USSR Author's Inventor's Certificate No 519474. USSR State Committee for Inventions and Discoveries

21. Grigor'ev, V. N., Yarikov, I. S., Alter, M. A., Emel'yanov, V. L., & Loginov,

- A. M. (1999) Principles for formulating blow-in charge and choosing blast conditions in blast furnace start-up. *Steel in translation*, vol. 29 (2), 1-8
22. Kaporulin, V. V., Chernobrivets, B. F., Alter, M. A., Urbanovich, G. I., & Emel'yanov, V. L. (1989) Some problems in blast furnace blowing in. *Steel in the USSR*, vol. 19 (6), 236-239
23. Kaporulin, V. V., Grigorev, V. N., Alter, M. A. et al. (1989). Efficient thermal hearth preparation for blowing in of blast furnace. *Steel in the USSR*, 19(10), 419-422
24. Chernobrivets, B. F., Kaporulin, V. V., & Zavidonskiy, V. A. (1992). *Practice of Ironmaking*. Moscow. P. 111 [in Russian]
25. Nekrasov, Z. I. et al. (1986). USSR Author's Inventor's Certificate No 1225858. USSR State Committee for Inventions and Discoveries
26. Zhembus, M. D., Monarshuk, A. P., Ogurtsov, A. P., Vasiuchenko, A. I. (1986). Forced blow-in of blast furnaces with reduced coke consumption. *In book "Saving Coke in Blast Furnace"*. Moscow, P. 23-28 [in Russian]
27. Zhembus, M. D., Monarshuk, A. P., & Zuenok, G. A. (1986). Primenenie azota pri razduvke domennykh pechei [Using nitrogen in blast furnace blowing operations]. *Metallurgical and mining industry*, (2), 7-9
28. Borodulin, A. V., Vasuchenko, A. I., Dmitrenko, K. A., Kostenko, G. P., Listopadov, V. S., Mozhareno, N. M., & Chaika, A. L. (2006) Hot-Nitrogen Injection in Starting a 5000 m³ Blast Furnace. *Steel in Translation*, 36(9), 28-32
29. Zhembus, M. D., Monarshuk, A. P., & Borodulin, A. V. (1987). Teplovaia rabota domennoi pechi v period razduvki [Thermal work of the blast furnace during the blow-up period]. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, (6), 145-146
30. Yankovskij, A. S., Maryasov, M. F., Borodulin, A. V. et al. (1988). Razduvka domennoi pechi s primeneniem azota [Blast furnace blow-in with nitrogen]. *Metallurg*, (11), 29
31. Demidov, V. A., Taranetz, A. I., & Kotov, V. V. (2005). Tekhnologija vyduvki i zaduvki domennoi pechi s ispolzovaniem azota [Blast furnace blow-down and blow-in technology using nitrogen]. *Metal and Casting of Ukraine*, (5), 16-20
32. Paren'kov, A. E., Mishin, Yu. P., Vegman, E. F. et al. (1983). Issledovanie domennogo protsessa v zaduvochnyi period pri vduvanii kisloroda v tsentralnuiu chast gorna [Blast Furnace Startup with Oxygen Injection in the Central Region]. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, (5), 20-24
33. Parenkov, A. E., Rostovskij, A. V., & Mihajlov, A. V. (1997). Blast furnace blowing on steam-air blast. *Materials of the 51st student scientific and technical conference*, Moscow, MISiS
34. Mikhailov, V. G., Semenov, O. A., Gavrikov, Iu. V., Prokhorova, T. V., & Inozemtsev, N. S. (2014). Opyt promyshlennogo proizvodstva aglomerata dlia zaduvki domennykh pechei [Experience in industrial production of agglomerate for blow-in BF]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, (10), 34-38
35. Shcheglov, E. M., Kholodnyi, D. P., Grachev, S. N. et al. (2014). Improving the Technology for the Blow-In of Blast Furnaces After Class-I and Class-II overhauls. *Metallurgist*, 57, 1082-1087. <https://doi.org/10.1007/s11015-014-9849-7>
36. Sarkisyantz, A. S. (1937). Некоторые выводы из теории доменного процесса [Some conclusions from the theory of blast furnace process]. *Steel*, (1)
37. Borodulin, A. V., Gorbunov, A. D., Romanenko, V. I., & Sushhev, S. P.

(2006). *Blast furnace in the energy dimension*. Dneprodzerzhinsk. P. 542 [in Russian]

38. Grigorev, V. N., Monaenkov, C. K., Shepetovsky, E. A., Alter, M. A., & Emel'yanov, V. L. (1999). RU Patent No. 2132390. Russian agency for patents and trademarks

39. Grigorev, V. N., Monaenkov, C. K., Shepetovsky, E. A., Alter, M. A., & Emel'yanov, V. L. (1999). RU Patent No. 2164242. Russian agency for patents and trademarks

40. Pishikin, A. A., Al'ter, M. A., Shcheglov, E. M., Semenov, O. A., Logvinov, N. V., Titov, V. N., & Inozemtsev, N. S. (2022) Analiz otклонeniі v khode domennoi plavki v zaduvochnom periode i mery po ikh predotvrashcheniiu i ustraneniіu [Analysis of deviations during the blast furnace smelting in the blow-in period and measures to prevent and eliminate them]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 78 (8), 671-681. <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2022-8-671-681>

M. A. Alter¹, Ph. D. (Tech.), ORCID 0009-0009-3709-5449

O. L. Chaika², Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Head of Laboratory, ORCID 0000-0003-1678-2580

B. V. Kornilov², Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5544-3023

A. O. Moskalyna², Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-9552-2853

¹ "ALTER Blast Furnace consulting"

² Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF BLAST FURNACE BLOWING TECHNOLOGIES IN THE 20TH AND 21ST CENTURIES

Abstract. The article discusses the trends and classification of blast furnace blowers over the past 100 years. The development of blower technology is divided into 3 periods: The 1st period lasted until the end of the 30s of the XX century, characterized by a lack of scientific knowledge, mysticism and based on previous experience; the 2nd period - until the early 70s, when the "traditional" blower technology was mastered with one problem - difficulties with opening the first releases and simultaneous overheating of the top; the 3rd period continues today, it includes the development of new methods for intensifying heat transfer during blowing and scientific generalization of blower techniques. The main tasks of blowdown are to bring the blast furnace back to normal operation in a short time, in compliance with safety rules, without significant costs, and to preserve the blast furnace and auxiliary equipment for long-term productive operation. These tasks are closely linked to the design features of blast furnaces, including the cooling system, lining type and furnace size, which have steadily increased from less than 500 m³ to 5,600 m³. The complexity of understanding the processes of heating the charge column during the blowing period with the formation of a gas flow and a cohesion zone in it is the reason for numerous discussions about rational blowing methods: methods for calculating and placing layers of the blast furnace charge, the use of various hot blast additives (nitrogen, natural, blast furnace or coke oven gas, oxygen, steam, etc.), the rate of increase in hot blast flow and its temperature, the trend of

pressure drop along the height of the charge column. The use of wood in the blast charge, the installation of constrictor rings in air tuyeres or the closure of a part of the tuyeres for blowing are discussed. Recommendations for blast furnace blowers are given. A comparison of "traditional" blowing with "progressive" blowing and blowing with nitrogen developed at the Iron and Steel Institute National Academy of Sciences of Ukraine are presented.

Key words: Blast Furnace, Blow-In, Technology, Durfee Pipe, Firewood, Nitrogen, Natural Gas, Injection.

For citation: Alter, M. A., Chaika, O. L., Kornilov, B. V., & Moskalyna, A. O. (2023). Analysis of the development of blast furnace blowing technologies in the 20th and 21st centuries. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 26-49. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-26-49>

*Стаття надійшла до редакції збірника 02.10.2023 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 9 від 15.09.2023 р.)*