

О. Л. Чайка¹, к.т.н., с.н.с., зав. лаб., ORCID 0000-0003-1678-2580

Б. В. Корнілов¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5544-3023

А. О. Москалина¹, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-9552-2853

В. В. Лебідь¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-3938-3785

М. М. Ізюмський¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5164-4450

М. Г. Джигота¹, провідний інж., ORCID 0000-0003-3062-5127

¹ *Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

АНАЛІЗ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ З ДОМЕННОЇ ПЕЧІ В УМОВАХ ВИКОРИСТАННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТА ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ

Анотація. У статті обговорюються результати теплоенергетичного та ексергетичного розрахунків можливостей нових та існуючих технологій скорочення викидів діоксиду вуглецю та зниження витрати коксу, збільшення виробництва чавуну за рахунок вдування в горн водню та водневмісних паливних добавок (коковий та природний газ), застосування металодобавок, збільшення температури дуття, теплових втрат та покращення газорозподілу в доменній печі. Розрахунки виконані з використанням розробленої в ІЧМ НАНУ математичної моделі повного енергетичного балансу доменної плавки, виконано оцінку впливу потенціалу нових та існуючих технологій на зменшення викидів CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки при зміні витрати пилоугільного палива, водню та водневмісних паливних добавок та їх комбінацій широкому діапазоні. Встановлено граничні значення вдування водню та водневмісних паливних добавок у горн доменній печі, які визначаються такими факторами: ступенем прямого відновлення заліза, теоретичною температурою горіння, наявністю технічного кисню та температурою колошнікового газу. Результати дослідження показали, що викиди CO₂ у доменному виробництві можна знизити на 25–30% за рахунок внесення змін до технології доменної плавки і залежать від інвестицій, сировинної та енергетичної бази металургійного підприємства, рівня існуючої технології доменної плавки. Розглянуто вплив маловитратних заходів щодо збільшення температури дуття, застосування чистих металодобавок, зменшення теплових втрат та покращення газорозподілу у доменній печі на скорочення викидів діоксиду вуглецю та техніко-економічні показники доменної плавки. Результати можуть бути корисними для визначення економічної доцільності того чи іншого заходу щодо зниження викидів CO₂ у доменному виробництві.

Ключові слова: домена піч, декарбонізація, природний газ, коксовий газ, витрата коксу

Посилання для цитування: Аналіз скорочення викидів вуглекислого газу з доменної печі в умовах використання перспективних та існуючих технологій

доменної плавки / О. Л. Чайка, Б. В. Корнілов, А. О. Москалина, В. В. Лебідь, М. М. Ізюмський, М. Г. Джигота // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 158-174. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-158-174>

Вступ. У зв'язку з глобальним потеплінням та пов'язаними з ним негативними наслідками в майбутньому більшість країн світу, у тому числі й Україна, ратифікували Паризьку угоду щодо клімату (2016 р.) та Угоду 25-ї Конференції сторін Рамкової конвенції ООН щодо зміни клімату (2019 р., Мадрид), які зобов'язують зменшити викиди CO₂. При цьому у світовій структурі викидів CO₂ на металургію припадає 6-8% викидів CO₂. Причому в структурі викидів CO₂ України на долю металургії станом на 2021 рік приходилось 26% [1-4].

За прогнозами Міжнародного Енергетичного Агентства (IEA) до 2050 року доменне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90% і більше. У порівнянні з іншими технологіями виробництва чавуну, доменні печі дозволяють гнучкіше і динамічніше працювати з рудою різної якості. Щодо продуктивності, то доменні печі значно випереджають інші технології. Завдяки цим перевагам на доменно-конвертерні технології припадає переважна частина (60-70%) світового виробництва сталі. Нові технології одержання сталі почнуть активно впроваджуватися лише після 2030 року, і це до 2050 року може призвести до зменшення традиційного способу виробництва сталі на 50%. Однак це можливо лише за умови значних у десятки мільярдів доларів інвестицій у реалізацію нових технологій. Тому зменшення викидів CO₂ із доменної печі як найбільш енергоємного виробництва у циклі виробництва сталі дозволило зберегти конкурентоспроможність металургійної галузі в Україні та світі особливо в умовах введення системи торгівлі квотами на викиди CO₂ (EU ETS)[1, 5-6]. Таким чином, питання декарбонізації доменного виробництва є актуальним.

Мета роботи. Дослідження впливу існуючих та перспективних технологій доменної плавки на скорочення викидів CO₂ з доменної печі та техніко-економічні показники доменної плавки.

Методика досліджень. Для оцінки впливу потенціалу нових та існуючих технологій виробництва заліза на зменшення викидів CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки виконано розрахунки з використанням розробленої в ІЧМ НАНУ математичної моделі повного енергетичного балансу доменної плавки [7].

Методика складання повного енергетичного балансу ґрунтується на основі трьох законів термодинаміки та придатна для аналізу будь-яких процесів. Ця методика отримала назву повного енергетичного балансу,

оскільки дозволяє врахувати всі види енергії, включаючи хімічну енергію палива, сировини та матеріалів у прихідній частині, а також продуктів та відходів процесу у витратній [8-13]. Повний енергетичний баланс дозволяє оцінити ступінь енергоефективності та вибрати способи зниження енергоємності продукції.

Повний енергетичний баланс стосовно до доменного виробництва включає загальний розрахунок і розгляд матеріального, теплового та ексергетичного балансів. Матеріальний баланс розраховується у системі обліку В. П. Іжевського, теплової – за теплоенергетичною моделлю І. Д. Семікіна, ексергетичний – розвиток праць А. В. Бородуліна та В. С. Степанова [11-15].

Вплив застосування паливних добавок на викиди CO₂ та техніко-економічні показники. Аналіз впливу пиловугільного палива (ПВП) та водневмісних паливних добавок (таких як природний та коксовий газ) на викиди CO₂ та техніко-економічні показники роботи доменної печі проводиться у широкому діапазоні зміни витрати:

- ПВП – від 0 до 250 кг/т;
- природний газ (ПГ) – від 0 до 200 м³/т;
- коксовий газ (КГ) – від 0 до 300 м³/т;
- водень – від 0 до 500 м³/т.

Всі розрахунки застосування паливних добавок виконувались при зміні теоретичної температури горіння 1800-2200°C, підтримка в даному діапазоні якої здійснювалася збільшенням вмісту пари в дутті (для її зниження) та кисню (для її підвищення). Вплив зміни теоретичної температури від витрат різних паливних добавок наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 - Зміна теоретичної температури при зміні витрат паливних добавок.

Зміна витрати палива	Величина зменшення теоретичної температури зі збільшенням витрати паливної добавки, °C			
	ПВП	ПГ	КГ	Водень
на 1 т/год (для ПВП) / 1 тыс. м ³ /год (для газоподібного палива)	9	27	14	7
на 10 кг/т (для ПВП) / 10 м ³ /т (для газоподібного палива)	14	39	22	12

Таким чином встановлено, що збільшення витрати водню на кожні 10 м³/т надає менший вплив на зменшення теоретичної температури (на 12°C на 1 тис. м³/год) в порівнянні з природним та коксовим газом, що в першу чергу пов'язано з його густиною. ПВП має подібний вплив на зміну теоретичної температури з воднем (табл. 1).

Базовий період роботи доменної печі для аналізу впливу різних факторів на вихід діоксиду вуглецю та техніко-економічні та

ексергетичні показники, а також значення даних параметрів при максимальній витраті паливних добавок наведено у таблиці 2.

Встановлено, що найбільш істотне зниження викидів CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю надає водень – до 30% (на 0,6% на кожні $10 \text{ м}^3/\text{т H}_2$). Водневмісне паливо – природний та коксовий газ дозволяють зменшити викиди CO_2 до 15% (на 0,75% на кожні $10 \text{ м}^3/\text{т ПГ}$ та на 0,5% на кожні $10 \text{ м}^3/\text{т КГ}$) (рис. 1).

Застосування ПВП дозволяє зменшити викиди CO_2 на 11% (0,44% на кожні 10 кг/т ПВП), однак це зменшення досягається тільки при витраті менше 150 кг/т , де для підтримки теоретичної температури в раціональному діапазоні приймається пара. При витраті ПВП понад 150 кг/т зменшення викидів CO_2 не спостерігається.

Таблиця 2 – Розрахунковий вихід CO_2 , техніко-економічні та ексергетичні показники доменної плавки при застосуванні різних видів палива.

Параметр	База	ПВП	ПГ	КГ	Водень
Максимальна витрата паливної добавки, $\text{м}^3/\text{т}$ (кг/т для ПВП)		250	200	300	50
Продуктивність, т/добу	4694	4621	5213	4551	4787
Сумарна витрата коксу та кокс. горіха, кг/т	352	293	340	379	397
Витрата ПВП в базовому періоді, кг/т	153	-	-	-	-
Витрата ПГ в базовому періоді, $\text{м}^3/\text{т}$	32,0	-	-	-	-
Витрата дугтя, $\text{м}^3/\text{хв}$	4011	4011	4011	4011	4011
Температура дугтя, $^{\circ}\text{C}$	1112	1112	1112	1112	1112
Вміст кисню в дугті, %	25,7	25,7	30,0	23,6	21,8
Вміст Fe в шихті, %	56,70	56,70	56,70	56,70	56,70
Основність шлаку CaO/SiO_2	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10
Основність шлаку $(\text{CaO}+\text{MgO})/\text{SiO}_2$	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
Вихід ВЕР, кг ум.пал./т	82	79	125	116	131
Розрахунковий вихід CO_2 з врахуванням допалювання CO поза доменною піччю, кг/т	1439	1463	1313	1318	1095

Одним із показників, що характеризує екологічність доменного процесу крім викидів CO_2 , є вихід вторинних енергоресурсів (ВЕР). Під вторинними енергоресурсами розуміється кількість тепла, що виходить з колошниковим газом за вирахуванням тепла, необхідного для нагрівання, стиснення та збагачення дугтя киснем.

Застосування водню та водневмісних паливних добавок дозволяє суттєво збільшити вихід ВЕР, а саме: водень – до 81% (на 1,62% на кожні 10 м³/т), природний газ – до 74% (на 3,7% на кожні 10 м³/т), коксовий газ – до 60% (на 2% на кожні 10 м³/т). При цьому застосування ПВП призводить до зменшення виходу ВЕР до 23%, залежно від його витрати. Його застосування у кількості 250 кг/т призводить до зменшення виходу ВЕР на 10%, що еквівалентно зменшенню ВЕР на 0,4% на кожні 10 кг/т.

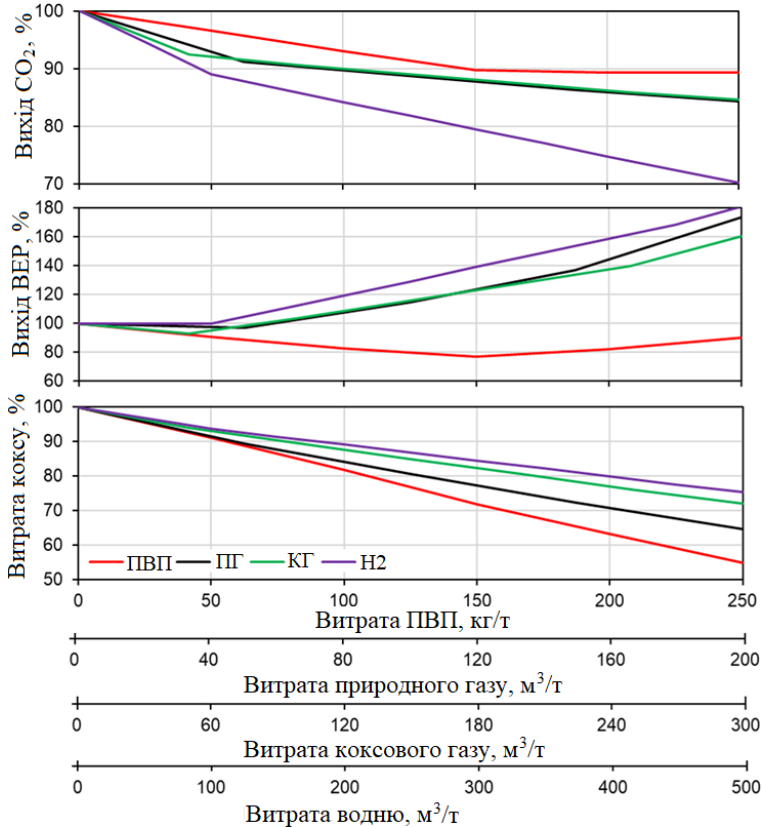


Рисунок 1 – Залежність розрахункового виходу діоксиду вуглецю, виходу вторинних енергоресурсів (ВЕР) та витрати коксу від витрати паливних добавок.

Найбільший вплив щодо зменшення витрати коксу надає збільшення витрати ПВП при збільшенні його витрати до 250 кг/т – до 45% (на 1,8% на кожні 10 кг/т ПВП). Застосування природного газу дозволяє

зменшити витрату коксу до 35% (на 1,75% на кожні 10 м³/т ПГ), коксового газу – до 28% (на 0,93% на кожні 10 м³/т КГ) та водню – на 25% (на 0,5% кожні 10 м³/т Н₂) (рис. 1).

Встановлено, що застосування водню сильніше впливає збільшення виробництва чавуну проти іншими паливними добавками.

Визначено, що збільшенню продуктивності при великих витратах ПВП (понад 150 кг/т), природного (понад 100 м³/т) та коксового (більше 250 м³/т) газів сприяє збільшення кисню в дутті, необхідне підтримки теоретичної температури в раціональному діапазоні. При менших витратах цих паливних добавок очікувати збільшення продуктивності неможливо.

Таким чином, застосування паливних добавок дозволяє збільшити виробництво:

- до 13% при застосуванні ПВП витратою понад 150 кг/т, що еквівалентно його збільшенню на 1,3% на кожні 10 кг/т ПВП;
- до 29% при застосуванні природного газу витратою понад 100 м³/т, що еквівалентно його збільшенню на 2,9% на кожні 10 м³/т ПГ;
- на 2% при застосуванні коксового газу витратою від 50 до 250 м³/т збільшити (збільшення на 0,1% на 10 м³/т КГ), а понад 250 м³/т ще на 11% (збільшення на 2,2% на 10 м³/т КГ);
- на 18% при застосуванні водню до 500 м³/т, що еквівалентно його збільшенню на 0,36% на кожні 10 м³/т Н₂.

Перспективи застосування металодобавки на викиди CO₂ та техніко-економічні показники. Одним із перспективних способів зниження викидів CO₂ є застосування чистих металодобавок, що завантажуються через колошник доменної печі. Однак їх застосування обмежене наявністю цієї шихти та її вартістю.

Виконано аналіз застосування металодобавки на розрахунковий вихід діоксиду вуглецю, виходу ВЕР та техніко-економічні показники доменної плавки від витрати металодобавки від 0 до 500 кг/т (рис. 2).

Встановлено, що застосування металодобавки дозволяє зменшити та викиди CO₂ до 47% (0,94% на кожні 10 кг/т металодобавки) та витрату коксу до 16% (на 0,32% на кожні 10 кг/т металодобавки), збільшити виробництво чавуну на 76% (на 1,52% на кожні 10 кг/т металодобавки). Однак застосування металодобавки призводить до істотного зниження виходу вторинних енергоресурсів (до 108% або на 2,16% на кожні 10 кг/т металодобавки), що призведе до необхідності використання сторонніх енергоресурсів для заміщення недостатнього доменного газу в інших переділах металургійного комбінату і для підігріву, стиснення та збагачення киснем дуття (а отже, і додаткові викиди CO₂).

Таким чином застосування металодобавки дозволяє, з одного боку,

збільшити виробництво чавуну, зменшити витрату коксу та викиди CO_2 , а з іншого боку – зменшує корисний потенціал доменного газу.

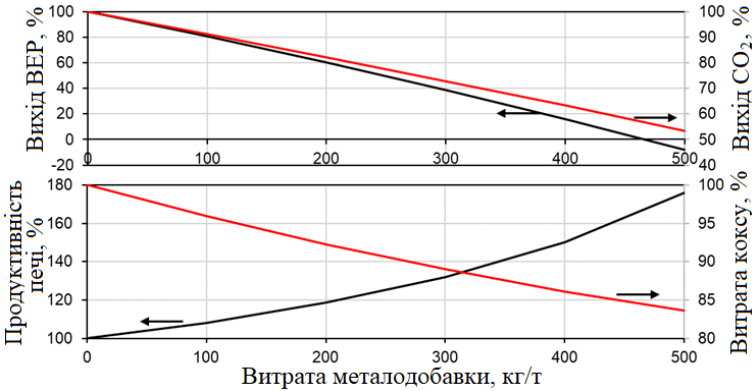


Рисунок 2 – Залежність розрахункового виходу діоксиду вуглецю, виходу ВЕР, продуктивності та витрати коксу від витрати металодобавки.

Вплив зміни температури дуття та теплових втрат на викиди CO_2 та техніко-економічні показники. Розглянуто вплив зміни температури дуття та теплових втрат, на які значною мірою впливає стан та теплофізичні характеристики футерівки доменної печі на зміну викидів діоксиду вуглецю та техніко-економічні показники доменної плавки (рис. 3).

Збільшення температури дуття кожні 100°C дозволяє зменшити прогнозного виходу CO_2 на 1,9% та вихід ВЕР – на 7,9%. Також досягається незначне зменшення витрати коксу на 0,5% та збільшення виробництва чавуну – на 3,2%.

Таким чином, при збільшенні температури дуття з 1100 до 1450 є можливість зменшити викиди CO_2 на 6% та витрату коксу на 2%, а також збільшити виробництво на 15%. При цьому вихід ВЕР зменшиться на 27%.

Зменшення теплових втрат у системі охолодження позитивно впливає на викиди CO_2 (зменшення на 0,18% на кожен 1 МВт), витрату коксу (зменшення на 0,05% на кожен 1 МВт) та продуктивність печі (збільшення на 0,32% на кожен 1 МВт), при цьому практично не впливає на вихід ВЕР.

Таким чином, при забезпеченні умов зменшення теплових втрат з 20 до 5 МВт є можливість зменшити викиди CO_2 на 2,3%, витрату коксу на 0,6% і збільшити виробництво на 5%.

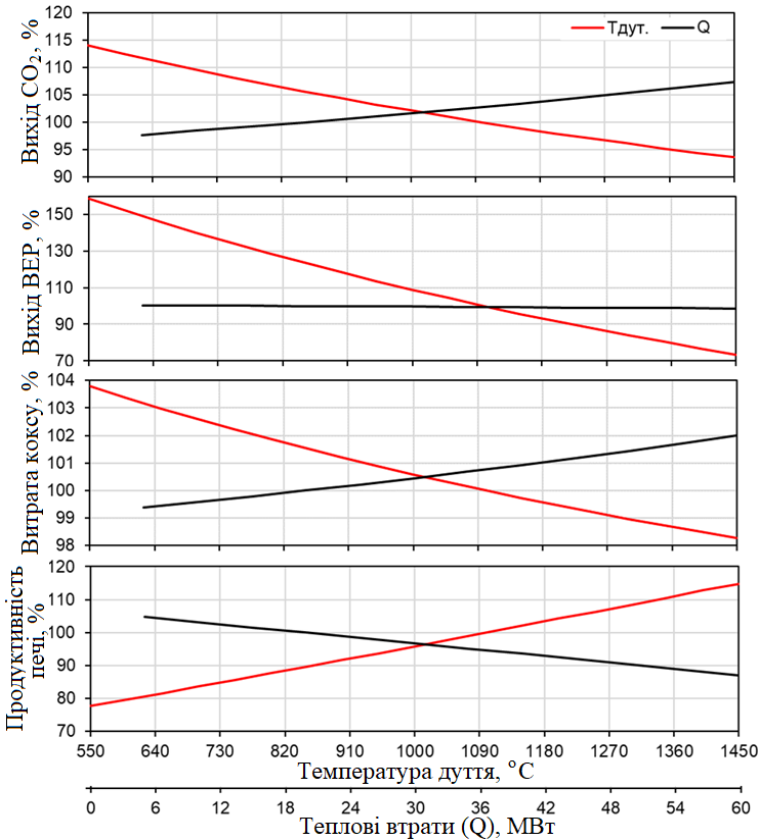


Рисунок 3 – Залежність розрахункового виходу діоксиду вуглецю, виходу ВЕР, витрати коксу та продуктивності печі від температури дуття та теплових втрат Q у системі охолодження.

Вплив зміни ступеня використання CO та H₂ на викиди CO₂ та техніко-економічні показники. Розглянуто вплив зміни ступеня використання CO та H₂, (η_{CO} та η_{H_2} відповідно) на які впливає режим завантаження та газодинамічний режим роботи доменної печі на зміну викидів діоксиду вуглецю та техніко-економічні показники доменної плавки (рис. 4).

Встановлено, що ступінь використання CO більший суттєво у порівнянні зі ступенем використання H₂ впливає на зміну розрахункового виходу діоксиду вуглецю, виходу вторинних енергоресурсів та техніко-економічних показників доменної плавки.

Збільшення ступеня використання CO та H₂ на кожний 1% їх зміни

в широкому діапазоні дозволяє зменшити викиди CO_2 (на 2,9% та 0,25% відповідно) та покращити техніко-економічні показники (збільшити продуктивність печі на 1,6% та 0,2% відповідно і зменшити витрату коксу на 2,6% та 0,2% відповідно). При цьому суттєво зменшується вихід вторинних енергоресурсів (на 8,8% та 1% відповідно) внаслідок зменшення витрати та калорійності доменного газу.

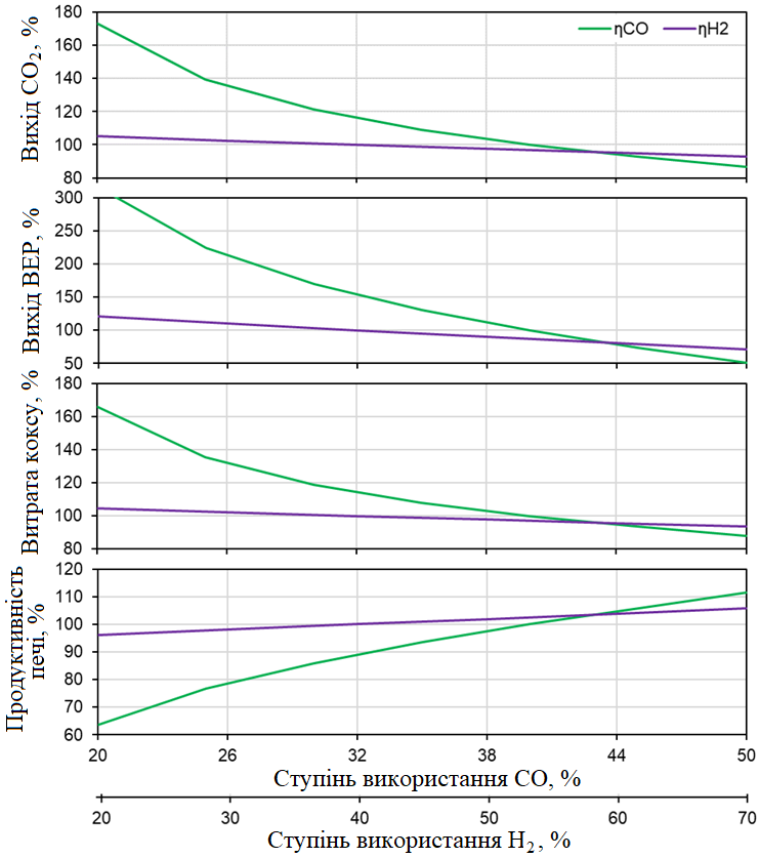


Рисунок 4 – Залежність техніко-економічних показників доменної плавки, розрахункового виходу діоксиду вуглецю та виходу вторинних енергоресурсів від ступеня використання CO та H_2 .

Спільне застосування ПВП та водневмісних паливних добавок.

В результаті дослідження спільного вдування водневмісних паливних добавок спільно ПВП встановлено, що прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю практично не

залежить від витрати ПВП і його тенденція зміни така ж сама, як і при застосуванні тільки водневмісної добавки. Таким чином спільне вдування в горн доменної печі водневмісних паливних добавок і ПВП дозволяє вирішити одночасно два завдання: зменшення викидів CO_2 і забезпечення мінімальної собівартості чавуну та сталі. При цьому збільшення витрати водневмісних паливних добавок визначає зменшення викидів CO_2 , а збільшення витрати ПВП – зменшення собівартості виробництва чавуну.

В результаті дослідження визначено критичні витрати паливних добавок, при яких, згідно з принципом Грюнера, очікується досягнення повного відновлення заліза непрямим шляхом, а значить і мінімальної витрати палива при досягненні ступеня прямого відновлення близького до 0% [16-21] (табл. 3).

Таблиця 3 – Витрата палива, при якій все залізо в печі відновлюється непрямим шляхом.

Параметр	ПВП+ПГ	ПВП+КГ	ПВП+H ₂
Витрата ПВП, кг/т	200-250	200-250	200-250
Витрата водневмісної паливної добавки, м ³ /т	193-180	300	485-450

Ефективність використання різних технологій на викиди CO_2 та показники роботи доменної печі. Важливою задачею є визначення ефективності тієї чи іншої технології при впровадженні виробництва для оцінки економічного та екологічного ефекту від її застосування. Таким чином було узагальнено результати ефективності застосування/зміни того чи іншого параметра на викиди CO_2 , вихід ВЕР та витрату коксу [22-24].

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПУТ, водню та водневмісних добавок (природного та коксового газу) на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрату коксу (табл. 4).

Показано, що водень та водневмісні добавки дозволяють більшою мірою забезпечити зменшення викидів CO_2 та збільшити вихід вторинних енергоресурсів у порівнянні з ПВП. При цьому ПВП може забезпечити найбільше зменшення витрати коксу.

Підігрів зазоподібних паливних добавок (H₂, природний та коксовий газ) може дати більший ефект - до 10%, 6% та 5% зменшення викидів CO_2 відповідно та 4-6% зменшення витрати коксу за рахунок можливості до більшого нагрівання – ПГ та КГ до 800°C H₂ – до 1000°C, порівняно з ПВП – до 400°C, що забезпечить зменшення викидів CO_2 та зменшення витрати коксу на 1%.

Встановлено граничні значення ефективності застосування

металодобавки та технологічних заходів щодо збільшення температури дуття, зменшення теплових втрат та збільшення ступеня використання CO та H₂ на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрату коксу (табл. 5).

Таблиця 4 – Ефективність застосування різних паливних добавок при максимальній їх витраті на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрати коксу.

	ПВП 250 кг/т	Природний газ 200 м ³ /т	Коксовий газ 300 м ³ /т	Водень 500 м ³ /т
Викиди CO ₂	-11% (-0,44%) *	-15% (-0,75%)	-15% (-0,5%)	-30% (-0,6%)
Вихід ВЕР	-10% (-0,4%)	+74% (+3,7%)	+60% (+2%)	+81% (+1,62%)
Витрата коксу	-45% (-1,8%)	-35% (-1,75%)	-28% (- 0,93%)	-25% (-0,5%)
<i>З врахуванням підігрівання палива:</i>				
	400°C	800°C	800°C	1000°C
Викиди CO ₂	-12% (-0,48%) *	-21% (-1,05%)	-20% (-0,67%)	-40% (-0,8%)
Вихід ВЕР	-8% (-0,32%)	+64% (+3,2%)	+57% (+1,9%)	+69% (+1,38%)
Витрата коксу	-44% (-1,76%)	-40% (-2%)	-32% (-1,07%)	-31% (-0,62%)

* для ПВП зниження викидів CO₂ досягається за рахунок зменшення витрати пари для підтримки теоретичної температури в заданих межах;

** у дужках зазначено зміну параметра зі збільшенням витрати паливної добавки на 10 кг/т (м³/т).

Таблиця 5 – Ефективність застосування металодобавки та технологічних заходів щодо збільшення температури дуття, зменшення теплових втрат та збільшення ступеня використання CO та H₂ на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрата коксу.

	Метало- добавка	Температура дуття	Теплові втрати	Ступінь використання CO	Ступінь використання H ₂
Діапазон зміни:	0-500 кг/т	від 1100°C до 1450°C	від 20 МВт до 5 МВт	від 40% до 50%	від 40% до 70%
Викиди CO ₂	-47% (-0,93%)	-6,4% (-1,82%)	-2,3% (-0,15%)	-13,2% (-1,32%)	-7,2% (-0,24%)
Вихід ВЕР	-108% (-2,16%)	-26,5% (-7,6%)	-0,4% (-0,03%)	-48,4% (-4,84%)	-29% (-0,97%)
Витрата коксу	-16% (-0,33%)	-2% (-0,49%)	-0,6% (-0,04%)	-11,9% (-1,19%)	-6,4% (-0,21%)

* у дужках зазначено зміну впливу збільшення витрати металодобавки на 10 кг/т, температури дуття на 100°C, ступеня використання CO та H₂ на 1% та зменшення теплових втрат на 1 МВт.

Найбільш суттєве зменшення викидів CO_2 сприятиме використанню металодобавки, однак використання цієї технології обмежене її наявністю та ціною, щоб використовувати його в доменному виробництві та значне зменшення ВЕР, що потребуватиме використання додаткового палива в тих переділах металургійного комбінату та ТЕЦ, де використовується доменний газ.

Покращення газодинамічних умов, спрямованих на збільшення ступеня використання CO та H_2 на кожен 1%, зменшує викиди вуглекислого газу на 1,32% та 0,24% та витрату коксу на 1,19% та 0,21% відповідно. Однак вони призводять до зменшення виходу вторинних енергетичних ресурсів. Аналогічні тенденції щодо зменшення викидів CO_2 (на 1,82%), витрати коксу (на 0,49%) та вторинних енергетичних ресурсів (на 7,6%) надає підвищення температури дуття на кожні 100°C .

Теплові втрати надають відносно незначний вплив на зменшення викидів CO_2 (до 2,3%), споживання коксу (до 0,6%) та виходу ВЕР (до 0,4%) зі зменшенням теплових втрат в системі охолодження на 15 МВт.

Висновки

1. Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування паливних добавок в горн доменної печі на викиди CO_2 : при використанні ПВП - зменшення викидів вуглекислого газу на 11%, природного та коксового газу – на 15%, водню – на 30%. При цьому існує потенціал зменшення викидів CO_2 за рахунок нагрівання палива.

2. Підігрівання газоподібних паливних добавок (H_2 , природний та коксовий газ) може дати більший ефект – до 10%, 6% та 5% зменшення викидів CO_2 відповідно та 4-6% зменшення витрати коксу за рахунок можливості до більшого нагрівання – природного та коксового до 800°C , водню – до 1000°C , порівняно з ПВП – до 400°C , що може забезпечити зменшення викидів CO_2 та зменшення витрати коксу на 1%.

3. Встановлено граничні значення зменшення викидів CO_2 при застосуванні металодобавки (до 47%) та технологічних заходів щодо збільшення температури дуття (до 6,4%), зменшення теплових втрат (до 2,3%) та збільшення ступеня використання CO та H_2 (до 13, 2% та 7,2% відповідно).

4. Визначено критичні витрати паливних добавок, за яких, згідно з принципом Грюнера, очікується досягнення повного відновлення заліза непрямим шляхом, а значить і мінімальної витрати палива при досягненні τ_d близько 0%:

- при витраті ПВП 200-250 кг/т та природного газу – 193-180 m^3/t . При цьому очікується скорочення викидів CO_2 до 18%.

- при витраті ПВП ~200-250 кг/т та коксового газу ~300 m^3/t . При цьому очікується скорочення викидів CO_2 до 18%.

- при витраті ПВП ~200-250 кг/т та водню ~485-450 м³/т. При цьому очікується скорочення викидів CO₂ до 28%.

5. Розробка нових та вдосконалення існуючих технологій доменного виробництва направлених на декарбонізацію доменного виробництва є актуальною задачею, вирішення якої дозволить покращити екологічний стан навколишнього середовища, а також збільшити конкурентоспроможність української металургії в умовах введення система торгівлі квотами на викиди CO₂ (EU ETS).

Перелік посилань

1. Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Меркулов О. Є., Москалина А. О., Лебідь В. В., Ізюмський М. М. Аналіз тенденцій розвитку уявлень та технологій, спрямованих на зменшення емісії діоксиду вуглецю в доменному виробництві. *Метал і лиття України*. 2022. № 2 (329). С. 8–19.

2. Парижское соглашение в рамках Рамочной конвенции ООН. Париж. 2015. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (дата звернення: 26.10.2023).

3. 25-я сессия конференции ООН по изменению климата. Мадрид. 2019. URL: <https://unfccc.int/event/cop-25> (дата звернення: 26.10.2023).

4. 26-я сессия конференции ООН по изменению климата. Глазго. 2021. URL: <https://unfccc.int/ru/peregovornyy-process-i-vstrechi/parizhskoe-soglashenie/klimaticheskii-pakt-glazgo/itogi-ks-26-voprosy-otchyotnosti#eq-9> (дата звернення: 26.10.2023).

5. Buergler T., Kofler I. Direct Reduction Technology as a Flexible Tool to Reduce CO₂ Intensity of Iron and Steelmaking. *Berg Huettenmaenn Monatsh*. 2017. № 162. P 14–19. <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0567-2>

6. Курунов И. Ф. Современное состояние и ожидаемые мировые тенденции развития металлургии железа. *Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия»*. 2017. № 2. С. 3–11.

7. А. с. 73905 Україна. «Методика розрахунку «Повний енергетичний баланс доменної плавки» / О.В. Бородулін, О.Л. Чайка, О.А. Сохалькний, А.О. Москалина. № 73841; заявл. 15.05.17; опубл. 27.10.17, Бюл. № 46. URL: https://ukrpatent.org/atachs/Avt_Pravo_%E2%84%9646_2017.pdf (дата звернення: 26.10.2023).

8. Jan Szargyt, David R. Morris, Frank R. Steward. *Exergy analysis of Thermal, chemical and metallurgical processes*. New York, Toronto. 1988. 517 p.

9. Степанов В. С., Степанова Т. Б. О методах расчета кумулятивных затрат энергии и эксергии (на примере производства стали). *Промышленная теплотехника*. 1990. № 6. С. 65–71.

10. Stepanov V. S. *Analysis of energy efficiency of industrial processes*. Heidelberg. Springer-Verlag. 1992. 220 p.

11. Степанов В. С., Степанова Т. Б. Эффективность использования энергии. Новосибирск : Наука, 1994. 256 с.

12. Степанов В. С. Анализ энергетического совершенства технологических процессов. Новосибирск : Наука, 1984. 273 с.

13. Айзатулов Р. С., Бородулин А. В., Ковтун А. Ф. Энергетическая и

эксергетическая характеристика чугуна. ИЧМ, 1989, 19 с. *Деп. рукопись в Черметинформации, 30.11.89, №5311 – ЧМ89.*

14. Ижевский В. П. Система учета доменного баланса. *ЖРМО*. 1912. Ч. 1-я. № 2. С. 180–214.

15. Бородулин А. В., Горбунов А. Д., Романенко В. И., Сушев С. П. *Домна в энергетическом измерении*. Днепродзержинск : ДГДУ, 2006. 542 с.

16. Готлиб А. Д. *Доменный процесс*. М. : Металлургия, 1958. 510 с.

17. Рамм А. Н. *Современный доменный процесс*. М. : Металлургия, 1980. 304 с.

18. Павлов М. А. Исследование плавильного процесса доменных печей Климовского завода. *Горный журнал*. 1994. Т. 3. С. 265.

19. Красавцев Н. И. Развитие представлений о влиянии прямого и косвенного восстановления на удельный расход кокса в доменных печах. В кн.: *«Научные исследования в помощь доменному производству»*. Днепропетровск, 1960. С. 9–57.

20. Рамм А. Н. О необоснованной критике принципа Грюнера. *Сталь*. 1965. № 8. С. 686–689.

21. Лозовой В. П., Шаркевич Л. Д. Прямое восстановление железа в современном доменном процессе. *Сталь*. 1995. № 3. С. 8–10.

22. Chaika A. L., Lebed V. V., Kornilov B. V., Moskalina A. A., Karikov S. A. Heat and Power Analysis of Technologies for Reducing Carbon Dioxide Emissions and Increasing the Energy Efficiency of Blast-Furnace Production. *Steel in Translation*. 2021. Vol. 51 (1). P. 68–72.

23. Chaika O., Kornilov B., Alter M., Lebid V., Izumskiy M., Moskalyna A., Naboka V. Analysis of new and existing technologies for reducing carbon dioxide emissions based on the energy balance of blast furnace. *METEC & 6th ESTAD*. Düsseldorf, Germany. 12-16 June 2023.

24. Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Москаліна А. О., Меркулов О. Є., Лебідь В. В., Ізюмський М. М. Дослідження впливу технологій використання ПВП, природного та коксового газу на декарбонізацію доменного виробництва. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 49–66. DOI: 10.52150/25222-9117-2022-36-49-66.

References

1. Chaika, O. L., Kornilov, B. V., Merkulov, O. Ye., Moskalyna, A. O., Lebid, V. V., & Izumskiy, M. M. (2022). Analiz tendentsii rozvytku uavlenn ta tekhnolohii, spriamovanykh na zmnshennia emisii dioksydu vuhletsiu v domennomu vyrobnytstvi [Analysis of trends in the development of ideas and technologies aimed at reducing carbon dioxide emissions in blast furnace production]. *Metal and casting of Ukraine*, 2 (329), 8–19 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/steelcast2019.10.064>

2. The Paris Agreement within the framework of the UN Framework Convention. Paris. (2015). URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf (Last accessed: 26.10.2023) [in Russian]

3. 25th session of the United Nations Climate Change Conference. Madrid. (2019). URL: <https://unfccc.int/event/cop-25> (Last accessed: 26.10.2023).

4. 26th session of the United Nations Climate Change Conference. Glasgow.

(2021). URL: <https://unfcc.int/ru/peregovornyy-process-i-vstrechi/parizshkoe-soglashenie/klimaticheskij-pakt-glazgo/itogi-ks-26-voprosy-otchyotnosti#eq-9>
(Last accessed: 26.10.2023)

5. Buerger, T., & Kofler, I. (2017). Direct Reduction Technology as a Flexible Tool to Reduce CO₂ Intensity of Iron and Steelmaking. *Berg Huettenmaenn Monatsh*, 162, 14–19. <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0567-2>

6. Kurunov, I. F. (2017). Sovremennoe sostoianie i ozhidaemye mirovye tendentsii razvitiia metallurgii zheleza [Current state and expected global trends in iron metallurgy development]. *Bulleten nauchno-tekhnicheckoi i ekonomicheskoi informatsii "Chernaia metallurgii"*, 2, 3–11 [in Russian]

7. А. с. № 73905 Ukraine. Metodyka rascheta. Polnyi enerhetycheskyi balans domennoi plavky. Borodulyn, A. V., Chaika, A. L., Sokhatskyi, A. A., & Moskalyna, A. A. Zaiavl. № 73841 15.05.17; opubl. 27.10.17, Bjul. No. 46

8. Jan Szargyt, David R. Morris, & Frank R. Steward (1988). *Exergy analysis of Thermal, chemical and metallurgical processes*. New York, Toronto. P. 517

9. Stepanov, V. S., & Stepanova, T. B. (1990). O metodakh rascheta kumulativnykh zatrat energii i eksnergii na primere proizvodstva stali [On methods for calculating cumulative energy and exergy costs (on the example of steel production)]. *Industrial heat engineering*, 6, 65–71 [in Russian]

10. Stepanov, V. S. (1992). *Analysis of energy efficiency of industrial processes*. Heidelberg. Springer-Verlag. P. 220

11. Stepanov, V. S., & Stepanova, T. B. (1994). *Efficiency of use energy*. Novosibirsk. P. 256 [in Russian]

12. Stepanov, V. S. (1984). *Analysis of the energy perfection of technological processes*. Novosibirsk. P. 274 [in Russian]

13. Aizatulov, R. S., Borodulin, A. V., & Kovtun, A. F. (1989). Energeticheskaia i eksergeticheskaia kharakteristika chuguna [Energy and exergy characterization of cast iron]. *OJSC "Chermetinformatsia"* (deposited research paper 30.11.1989, №5311), P. 19 [in Russian]

14. Izhevskij, V. P. (1912). Sistema ucheta domennogo balansa [Accounting system of Blast furnace balance]. *Journal of the Russian Metallurgical Society*. part 1, № 2, 180–214 [in Russian]

15. Borodulin, A. V., Gorbunov, A. D., Romanenko, V. I., & Sushhev, S. P. (2006). *Blast furnace in the energy dimension*. Dneprodzerzhinsk. P. 542 [in Russian]

16. Gotlib, A. D. (1958). *Blast furnace process*. Moscow. P. 510 [in Russian]

17. Ramm, A. N. (1980). *Modern blast furnace process*. Moscow. P. 304 [in Russian]

18. Pavlov, M. A. (1994). Issledovanie plavilnogo protsessa domennykh pechei Klimkovskogo zavoda [Investigation of the melting process of blast furnaces of the Klimkovsky plant]. *Mining Journal*, 3, 265. [in Russian]

19. Krasavcev, N. I. (1960). Development of ideas about the influence of direct and indirect reduction on the specific consumption of coke in blast furnaces. – in book: *"Scientific research to help of blast furnace production"*. Dnepropetrovsk, 9–57 [in Russian]

20. Ramm, A. N. (1965). O neobosnovannoi kritike printsipa Griunera [On the unjustified criticism of the Gruner principle]. *Steel*, 8, 686–689 [in Russian]

21. Lozovoj, V. P., & Sharkevich, L. D. (1995). Priamoe vosstanovlenie zheleza

v sovremennom domennom protsesse [Direct reduction of iron in the modern blast furnace process]. *Steel*, 3, 8–10 [in Russian]

22. Chaika, A. L., Lebed, V. V., Kornilov, B. V., Moskalina, A. A., & Karikov, S. A. (2021). Heat and Power Analysis of Technologies for Reducing Carbon Dioxide Emissions and Increasing the Energy Efficiency of Blast-Furnace Production. *Steel in Translation*, 51 (1), 68–72. <https://doi.org/10.3103/S0967091221010034>

23. Chaika, O., Kornilov, B., Alter, M., Lebid, V., Izumskiy, M., Moskalyna, A., & Naboka V. (2023) Analysis of new and existing technologies for reducing carbon dioxide emissions based on the energy balance of blast furnace. METEC & 6th ESTAD. Düsseldorf, Germany. 12-16 June 2023. URL: <https://metec-estad2023.com/program/lecture-program.html>

24. Chaika, O. L., Kornilov, B. V., Moskalyna, A. O., Merkulov, O.Ie., Lebid, V.V., & Izumskiy, M.M. (2022). Doslidzhennia vplyvu tekhnolohii vykorystannia PVP, pryrodnoho ta koksovoho hazu na dekarbonizatsiiu domennoho vyrobnytstva [Research of the influence of technologies using PCI, natural and coke over gas on the decarbonization of the blast furnace production]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 36, 49-66. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-49-66>

O. L. Chaika¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Head of Laboratory, ORCID 0000-0003-1678-2580

B. V. Kornilov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5544-3023

A. O. Moskalyna¹, Ph. D. (Tech.), Researcher, ORCID 0000-0001-9552-2853

V. V. Lebid¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-3938-3785

M. M. Izumskiy¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5164-4450

M. H. Dzhyhota¹, Leading Engineer, Ph. D. (Tech.), ORCID 0000-0003-3062-5127

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

ANALYSIS OF REDUCTION OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS FROM BLAST FURNACE UNDER CONDITIONS OF USING ADVANCED AND EXISTING BLAST FURNACE MELTING TECHNOLOGIES

Abstract. The article discusses the results of heat and power and exergy calculations of the possibilities of new and existing technologies to reduce carbon dioxide emissions and coke consumption, increase pig iron production by injecting hydrogen and hydrogen-containing fuel additives (coke and natural gas) into the furnace, using metal additives, increasing the blast temperature, heat losses, and improving gas distribution in the blast furnace. The calculations were performed using a mathematical model of the complete energy balance of blast furnace smelting developed at the Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine, and the impact of the potential of new and existing technologies on reducing CO₂ emissions and technical and economic indicators of blast furnace smelting was assessed when the consumption of pulverized coal, hydrogen and hydrogen-containing fuel additives and their combinations in a wide range was changed. The limit values for the injection of hydrogen and hydrogen-containing fuel additives into the blast furnace horn have been determined, which are determined by

the following factors: the degree of direct reduction of iron, theoretical combustion temperature, the presence of industrial oxygen, and the temperature of the furnace gas. The study results showed that CO₂ emissions in blast furnace production can be reduced by 25-30% by making changes to blast furnace technology and depend on investments, the raw material and energy base of the steelmaker, and the level of existing blast furnace technology. The paper considers the impact of low-cost measures to increase the blast temperature, use of clean metal additives, reduce heat losses, and improve gas distribution in the blast furnace on the reduction of carbon dioxide emissions and technical and economic indicators of blast furnace smelting. The results can be useful for determining the economic feasibility of a particular measure to reduce CO₂ emissions in blast furnace production.

Key words: Blast Furnace, decarbonization, natural gas, coke oven gas, coke consumption.

For citation: Chaika, O. L., Kornilov, B. V., Moskalyna, A. O., Lebid, V. V., Iziumskyi, M. M., & Dzhyhota, M. H. (2023). Analysis of reduction of carbon dioxide emissions from blast furnace under conditions of using advanced and existing blast furnace melting technologies. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 37, 158-174. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-158-174>

Стаття надійшла до редакції збірника 21.09.2023 р.

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