

УДК 669.162.2: 662.6/9.001.5

О. Л. Чайка, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-1678-2580**Б. В. Корнілов**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5544-3023**А. О. Москалина**, к.т.н., н.с., ORCID 0000-0001-9552-2853**О. Є. Меркулов**, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-7867-0659**В. В. Лебідь**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-3938-3785**М. М. Ізюмський**, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5164-4450*Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України*

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЙ ВИКОРИСТАННЯ ПВП, ПРИРОДНОГО ТА КОКСОВОГО ГАЗУ НА ДЕКАРБОНІЗАЦІЮ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

Анотація. Метою роботи є встановлення закономірностей використання різних паливних добавок, спрямованих на зменшення викидів діоксиду вуглецю з доменної печі. В зв'язку з глобальним потеплінням та пов'язаними з ним негативними наслідками в майбутньому питання зменшення парникових газів (в тому числі CO₂) є одними з найважливіших у світі. Таким чином, питання декарбонізації металургійної галузі України, на яку приходить близько 26 % викидів є актуальним. В Україні при виробництві сталі викиди CO₂ на ~8 % більші, ніж в країнах ЄС, що в першу чергу пов'язано з тим, що енергоємність технології доменного виробництва України більша. Тому з введенням квот на викиди CO₂ (EU ETS), без впровадження технологій декарбонізації доменного виробництва, українська металургія може стати не конкурентоспроможною. З використанням вдосконалених теплоенергетичної та ексергетичної моделей доменної плавки встановлені закономірності при використанні пиловугільного палива (ПВП) як найбільш економічного замітника коксу, природного та коксового газу на викиди CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки. За базовий варіант розрахунку було обрано найкращий період роботи доменної печі №4 об'ємом 2002 м³ ПрАТ «МК «Азовсталь» у 2021 році. Встановлено закономірності впливу застосування різних марок вугілля для ПВП та зміни хімічного складу ПВП при підтримці теоретичної температури горіння на постійному рівні на викиди CO₂ та показники доменної плавки, що дозволить раціонально підходити до вибору вугілля для ПВП, що особливо актуально в воєнний час та повоєнного відновлення України в умовах втрати енергетичної бази вугілля для ПВП. Вперше визначено критичні витрати паливних добавок, при яких, згідно з принципом Грюнера, очікується досягнення повного відновлення заліза непрямым шляхом, а значить і мінімальної витрати палива при досягненні rd близького до 0%. В результаті виконаної роботи встановлені граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, природного та коксового газу на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрату коксу.

Ключові слова: доменна піч, декарбонізація, витрати коксу, тепловий баланс, пиловугільне паливо, природний газ, коксовий газ.

Посилання для цитування: Дослідження впливу технологій використання ПВП, природного та коксового газу на декарбонізацію доменного виробництва / О. Л. Чайка, Б. В. Корнілов, А. О. Москалина, О. Є. Меркулов, В. В. Лебідь, М. М. Ізюмський // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2022. Вип. 36. С. 49-66. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-49-66.

Стан питання. У зв'язку з глобальним потеплінням та пов'язаними з ним негативними наслідками в майбутньому, більшість країн світу, в тому числі й Україна, ратифікували Паризьку угоду по клімату (2016 р.) та Угоду 25-ої Конференції сторін Рамкової конвенції ООН зі зміни клімату (2019 р., Мадрид), які зобов'язують зменшити викиди CO₂. При цьому структура викидів в Україні відрізняється – якщо у світі на металургію припадає 6 % викидів CO₂, то в Україні – 26 % [1-8]. В Україні при виробництві сталі викиди CO₂ на ~8% більші, ніж в країнах ЄС, що в першу чергу пов'язано з тим, що енергоємність технології доменного виробництва України більша [1, 6]. Тому з введенням квот на викиди CO₂ (EU ETS), без впровадження технологій декарбонізації доменного виробництва, українська металургія може стати не конкурентоспроможною.

За прогнозами Міжнародного Енергетичного Агентства (IEA) до 2050 р. доменне виробництво збережеться як домінуюча ланка в отриманні сталі, оскільки вона є найбільш економічно вигідною з тепловим коефіцієнтом корисної дії до 90 % і більше. Порівняно з іншими технологіями виробництва чавуну, доменні печі дозволяють гнучкіше і динамічніше працювати з рудою різної якості. Що ж до продуктивності, то доменні печі значно випереджають інші технології. Завдяки цим перевагам на доменно-конвертерні технології припадає переважна частка (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 можливе лише за умови значних, в десятки мільярдів доларів, інвестицій у реалізацію нових технологій [9-10]. Тому зменшення викидів CO₂ з доменної печі, як найбільш енергоємного виробництва, дозволить зберегти конкурентоспроможність металургійної галузі України.

Метою роботи є встановлення закономірностей використання різних паливних добавок, спрямованих на зменшення викидів діоксиду вуглецю з доменної печі.

Основні результати дослідження. З використанням вдосконалених теплоенергетичної та ексергетичної моделей доменної плавки досліджено вплив застосування ПВП (як найбільш економічного замітника коксу), природного та коксового газу на викиди CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки. За базовий варіант розрахунку було обрано найкращий період роботи доменної печі №4 об'ємом 2002 м³ ПрАТ «МК «Азовсталь» у 2021 році. Визначені закономірності впливу застосування

різних марок вугілля для ПВП при підтримці теоретичної температури горіння на постійному рівні на викиди CO_2 та показники доменної плавки (рис. 1).

Застосування різних марок вугілля (крім бурого) для ПВП з витратою ~ 150 кг/т та більше дозволяє зменшити вихід CO_2 з врахуванням допалювання CO поза доменною піччю на 8,5-11% порівняно з доменною плавкою тільки на коксі. При збільшенні витрати ПВП більше 150 кг/т викиди CO_2 змінюються незначно через збільшення концентрації кисню в дутті для підтримки теоретичної температури горіння на заданому рівні. Аналогічно до виходу CO_2 для всіх марок вугілля, крім бурого має місце екстремум для виходу вторинних енергоресурсів (ВЕР) при витраті ПВП 150 м³/т. При витраті ПВП до 150 м³/т – має тенденцію зменшення з 85 кг умовного палива (ум. пал.) на тонну чавуну при плавці без ПВП до 60-65 кг ум. пал./т при витраті ПВП ~ 150 кг/т, з подальшим збільшенням до 68-76 кг ум. пал./т при витраті ПВП 250 кг/т. Збільшення витрати ПВП від 0 до 250 кг/т при застосуванні бурого вугілля призводить до зменшення виходу вторинних енергоресурсів з 85 кг ум. пал./т до 65 кг ум. пал./т.

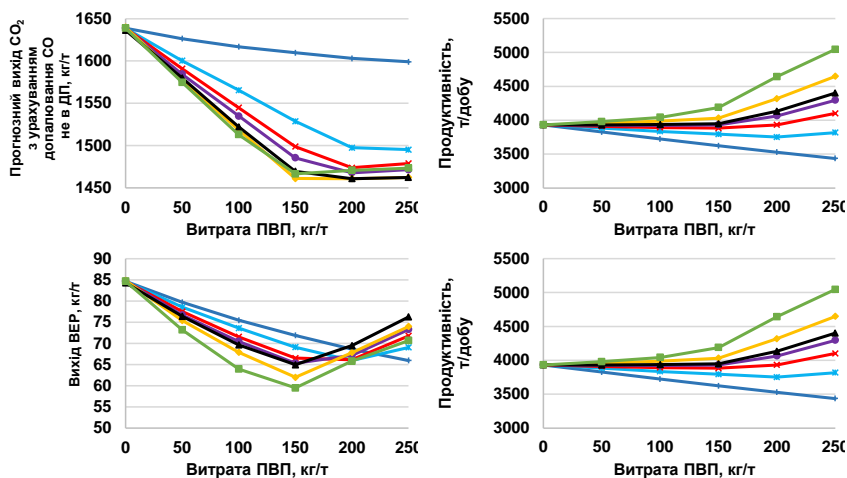


Рисунок 1 – Закономірності впливу використання різних марок ПВП на викиди CO_2 та техніко-економічні показники доменної плавки.

Марки вугілля на рисунку:

— Б — Д — Г — Ж — П — СС — АП

Встановлено, що при використанні антрациту для ПВП в кількості 250 кг/т – виробництво чавуну ~ 5000 т/добу, витрата коксу – 273 кг/т; слабкоспікового вугілля для ПВП в кількості 250 кг/т – виробництво чавуну ~ 4450 т/добу та витрата коксу – 295 кг/т; пісного вугілля для ПВП в кількості 250 кг/т – виробництво чавуну ~ 4700 т/добу, витрата коксу

310 кг/т. Таким чином, встановлено, що буре вугілля для ПВП не дозволяє зменшити викиди CO_2 , а антрацити, незважаючи на економічність, не варто використовувати по причині негативного впливу на жорна для помелу вугілля та абразивний знос трубопроводів для транспортування та подачі вугілля, тому для ПВП варто використовувати марки вугілля Г, Ж, П та СС. Варто зазначити, що зменшення виходу CO_2 при вдуванні ПВП, в значній мірі, досягається за рахунок зменшення вмісту вологи в дутті для підтримки постійної теоретичної температури (рис. 2).

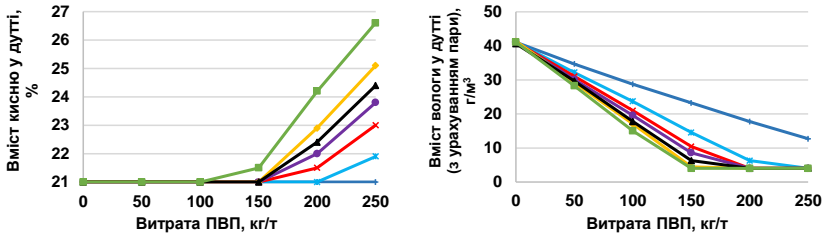


Рисунок 2 – Зміна вмісту кисню та вологи в дутті при використанні різних марок ПВП для підтримки теоретичної температури на постійному рівні (~2100°C).

Марки вугілля на рисунку:

— Б — Д — Г — Ж — П — СС — АП

Однак розрахунки, виконані для конкретних марок вугілля для ПВП, не можуть повною мірою бути застосовані практично, оскільки на фізичні та хімічні властивості вугілля, що вдувається в піч, накладаються вимоги до безпеки і надійності експлуатації установки з приготування та вдування ПВП [11]. Тому питання вибору раціонального марочного складу вугілля для приготування ПВП, при вирішенні якого має враховуватися не лише кон'юнктура-економічна ситуація, а й технологічні умови в конкретному доменному цеху, технічне оснащення та стан доменних печей, енерготехнологічні зв'язки доменного виробництва з іншими переділами є актуальним та маловивченим [11-14].

Виконані оціночні розрахунки впливу вмісту вуглецю, водню, кисню, азоту, сірки та золи на викиди CO_2 , показники роботи печі, теплоенергетичні та ексергетичні показники за підтримки постійної температури в фурменій зоні за рахунок зміни вмісту кисню в дутті та вологості дуття (табл. 1). Розрахунок виконувався варіюванням однієї із складових компонентів хімічного складу ПВП в межах її зміни в різних марках вугілля. При цьому інші компоненти хімічного складу також змінювалися відповідно до їх частки в ПВП. Наприклад, якщо вміст вуглецю в ПВП збільшувався, то частка інших компонентів зменшувалася пропорційно до їх вмісту для збереження суми компонентів на рівні 100 %. Тому при зміні будь-якої складової компоненти хімічного складу ПВП вміст вуглецю в ПВП і, відповідно, його масова частка в паливі, що

спалюється на фурмах у сухому дутті, також буде змінюватися.

Таблиця 1 – Вплив зміни хімічного складу ПВП на показники теплової роботи печі при постійній температурі фурменної зони.

Параметр	Зміна параметру при збільшенні вмісту елемента в ПВП на 1%					
	C	H ₂	O ₂	N ₂	зола	S
Техніко-економічні показники:						
Продуктивність	+0,36	-0,24	-0,73	0,00	-0,06	+0,01
Витрата коксу	-0,43	-0,33	+0,76	+0,40	+0,45	+0,41
Витрата сумарного палива в коковому еквіваленті	-0,72	+0,07	+0,87	+0,58	+0,69	+0,59
Тепло-енергетичні показники:						
Загальна теплова потужність	+0,05	0,00	-0,26	0,00	0,00	0,00
Засвоєна теплова потужність	+0,90	-1,63	-0,91	+0,09	0,00	+0,11
Середній КВП	+0,76	-1,52	-0,59	+0,09	0,00	+0,10
Тепловий дефіцит чавуну	+0,50	-1,40	-0,18	+0,10	+0,07	+0,10
Ступінь прямого відновлення Fe	+2,32	-3,36	-1,02	+0,12	-0,06	-0,05
Вторинні енергоресурси та прогностичний вихід CO₂:						
Вихід сухого колошник. газу	-0,39	+0,41	+0,65	+0,10	+0,06	+0,01
Вихід ВЕР	-0,93	+3,61	-0,15 / +0,76*	-0,12	+0,10	-0,03
Прогностичний вихід CO ₂ з урахуванням допалювання поза доменної печі	-0,11	-0,57	+0,43	+0,03	+0,09	+0,08
Ексергетичні ККД:						
Термодинамічна досконалість доменного процесу	-0,07	+0,69	-0,35	-0,26	-0,27	-0,23
Технологічний ККД	+0,30	-0,19	-0,49	-0,24	-0,27	-0,24
Узагальнений ККД виробництва чавуну	+0,11	+0,75	-0,50	-0,26	-0,28	-0,22
Екологічні показники:						
Екологосміність	+0,10	-0,33	+0,03	+0,05	0,00	-0,05
Ресурсосміність	+0,02	-0,08	+0,02	+0,03	0,01	0,10
Коефіцієнт екологічності	-0,03	+0,11	-0,02	-0,03	-0,01	-0,09

* чисельник – при вмісті кисню в ПВП до 10%;
знаменник – кисень у межах 10-20 %.

Зменшенню викидів CO₂ буде сприяти збільшення вмісту водню (на 0,57 % на кожен 1 % H₂) та вуглецю (на 0,11 % на кожен 1 % C), зменшення вмісту кисню (на 0,43 % на кожен 1 % O₂). Інші складові ПВП практично не впливають на викиди CO₂. Збільшенню продуктивності доменної печі буде сприяти збільшення вмісту вуглецю (на 0,36 % на кожен 1 % C), зменшення вмісту кисню (на 0,73 % на кожен 1 % O₂) та водню (на

0,24 % на кожен 1 % H_2). Інші складові ПВП практично не впливають зміну виплавки чавуну. Зменшенню витрати коксу буде сприяти збільшення вмісту вуглецю (на 0,43 % на кожен 1 % C) та водню (на 0,33 % на кожен 1 % H_2), зменшення вмісту кисню (на 0,76 % на кожен 1 % O_2), та азоту (на 0,40 % на кожен 1 % N_2), золи (на 0,45 % на кожен 1% золи) та сірки (на 0,76 % на кожен 1 % S).

Для природного газу характерний нижчий вміст вуглецю (на 10-15 %) порівняно з пиловугільним паливом та коксом, тому часткова заміна коксу та ПВП природним газом створює потенційні можливості для поступового зниження викидів CO_2 з доменної печі у разі, якщо економічна перевага вдування ПВП компенсується підвищенням цін на сертифікати викидів CO_2 [15]. На відміну від ПВП, коли скорочення витрати коксу забезпечується заміною вуглецю коксу на фурмах, природний газ дозволяє зменшити витрати коксу завдяки скороченням долі процесів прямого відновлення заліза (rd). При збагаченні дуття киснем, підвищенні нагрівання дуття ці два види палива не виключають одне одного, а навпаки, доповнюють, що забезпечує максимальний ефект від їхнього спільного застосування. Це особливо важливо з огляду на невисоку якість залізорудної сировини та коксу на доменних печах України та необхідності зменшення викидів CO_2 .

Так як на даний момент вартість природного газу в кілька разів перевищує вартість коксу та ПВП, то його застосування може бути економічно недоцільним. Однак при цьому використання природного газу в доменній плавці має незаперечні переваги – його застосування зменшує опір газовому потоку у високотемпературній зоні печі та суттєво покращує газодинамічну характеристику доменної печі загалом, що сприяє більш стійкій газодинамічній роботі цієї системи [11, 16-22]. А з урахуванням очікуваного підвищення цін на сертифікати на викиди CO_2 застосування природного газу може бути економічно доцільним. Встановлено закономірності впливу природного газу при підтримці постійної (2100 °C) / змінної (1800-2200 °C) теоретичної температури горіння на викиди CO_2 та показники доменної плавки (рис. 3). Збільшення витрати природного газу на кожні ~ 50 м³/т дозволяє зменшити вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю на $\sim 1,9$ -2,6 %; зменшити витрату коксу на 8,5 % / 9,0 % та збільшити вихід ВЕР на 26,8 % / 19,5 %.

Для підтримки постійної (2100 °C) / змінної (1800-2200 °C) теоретичної температури, аналогічно як для ПВП, при застосуванні природного газу використовувався підхід збагачення дуття киснем або застосування пари в дутті (збільшення вологи дуття) (рис. 4). В результаті встановлено, що більш інтенсивне зниження викидів CO_2 співпадає зі зменшенням вологи в дутті (при витраті до 50 м³/т).

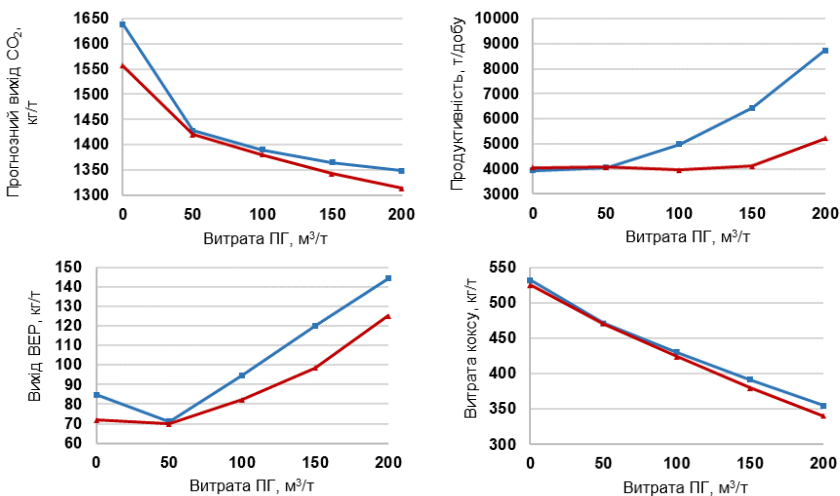


Рисунок 3 – Закономірності впливу використання природного газу на викиди CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки за постійної (—■—, ~2100°C) та змінної (—■—, 1800-2200°C) теоретичної температури горіння.

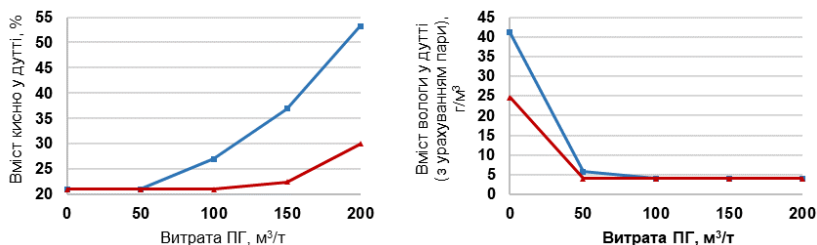


Рисунок 4 – Зміна вмісту кисню та вологості дуття при застосуванні природного газу за підтримки теоретичної температури горіння на постійному рівні (—■—, ~2100 °C) та при змінній теоретичній температурі горіння (—■—, 1800-2200 °C).

Оскільки останнім часом в доменному виробництві України технологія вдування ПВП набула широкого поширення завдяки її економічності, то актуальним питанням є вдосконалення технології спільного застосування ПВП та природного газу. Встановлено вплив спільного застосування ПВП та природного газу на викиди CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки (рис. 5). В результаті отримано, що прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю практично не залежить від витрати ПВП при спільному вдуванні з природним газом (ПГ) та його тенденція зміни така сама, як і при застосуванні тільки природного газу. Застосування ПВП спільно з ПГ дозволяє зменшити витрати коксу на

0,90-0,93 кг на кожний 1 кг ПВП як при постійній, так і при змінній теоретичній температурі горіння. Зі збільшенням витрати ПВП при спільному застосуванні з ПГ збільшується вихід ВЕР: при постійній теоретичній температурі на 0,85-1,30 кг/т умовного палива на кожні 10 кг/т ПВП та при змінній теоретичній температурі – на 0,5-0,7 кг/т умовного палива.

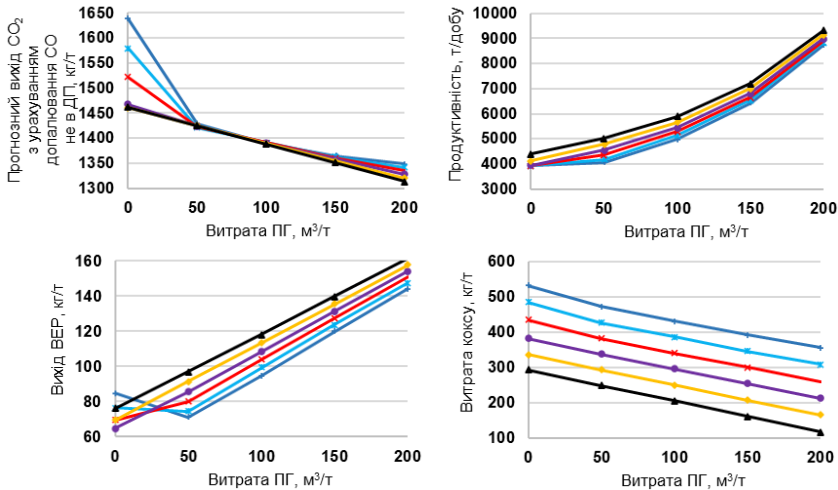


Рисунок 5 – Закономірності впливу спільного використання природного газу та ПВП на викиди CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки.

На рисунку зміна параметрів при різній витраті ПВП:

- - ПВП=0 кг/т; —■— - ПВП=50 кг/т; —▲— - ПВП=100 кг/т;
- ◆— - ПВП=150 кг/т; —★— - ПВП=200 кг/т; —●— - ПВП=250 кг/т.

Таким чином, спільне вдування в горні доменної печі природного газу та ПВП дозволяє вирішити одночасно два завдання зменшення викидів CO₂ та забезпечити мінімальну собівартість чавуну та сталі. При цьому збільшення витрати природного газу визначає зменшення викидів CO₂, а збільшення витрати ПВП – зменшення собівартості виробництва чавуну.

Одним з перспективних способів зменшення викидів CO₂ є використання коксового газу. Так як в його складі до 60 % водню, то його вдування може бути перехідною технологією до вдування водню в доменну піч [23-26]. Встановлено закономірності впливу коксового газу при підтримці постійної (2100 °C) / змінної (1800-2200 °C) теоретичної температури горіння на викиди CO₂ та показники доменної плавки (рис. 6). Встановлено, що збільшення витрати коксового газу на кожні ~50 м³/т дозволяє зменшити вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю на ~1,1-1,7 %, зменшити витрати коксу на 4,4 % / 4,6 % та

збільшити вихід ВЕР на 14,5 % / 16,5 %. В рамках дослідження було отримано теоретичний коефіцієнт заміни коксу коксовим газом – 0,46-0,49 кг/м³.

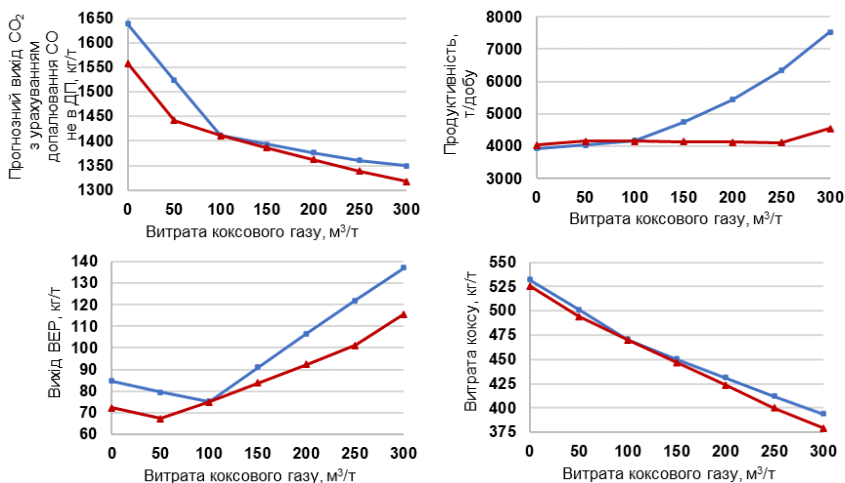


Рисунок 6 – Закономірності впливу використання коксового газу на викиди CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки за постійної (—■—, ~2100°C) та змінної (—■—, 1800-2200°C) теоретичної температури горіння.

Для підтримки постійної (2100 °C) / змінної (1800-2200 °C) теоретичної температури горіння, аналогічно як для природного газу та ПВП, при застосуванні коксового газу використовувався підхід збагачення дуття киснем або застосуванням пари в дутті (збільшення вологи дуття). В результаті встановлено, що більш інтенсивне зниження викидів CO₂ співпадає зі зменшенням вологи в дутті (при витраті до 100 м³/т / 50 м³/т при постійній / змінній теоретичній температурі) (рис. 7).

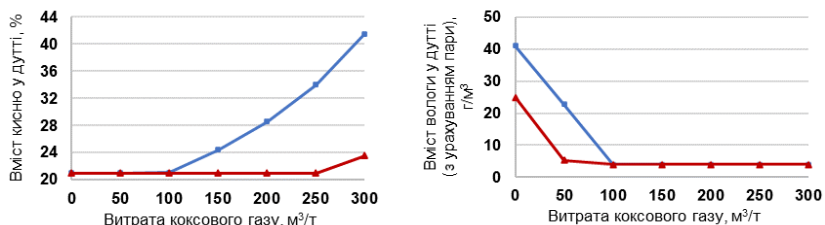


Рисунок 7 – Зміна вмісту кисню та вологості дуття при застосуванні коксового газу за підтримки теоретичної температури горіння на постійному рівні (—■—, ~2100 °C) та при змінній теоретичній температурі горіння (—■—, 1800-2200 °C).

Виконано дослідження спільного використання ПВП та коксового газу (КГ). Отримано, що прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО

поза доменною піччю практично не залежить від витрати ПВП при спільному вдуванні з коксовим газом та його тенденція зміни така сама, як і при застосуванні тільки коксового газу. Застосування ПВП спільно з ПГ дозволяє зменшити витрати коксу на 0,81-0,91 кг на кожний 1 кг ПВП як при постійній, так і при змінній теоретичній температурі горіння. Зі збільшенням витрати ПВП при спільному застосуванні з КГ збільшується вихід ВЕР: при постійній теоретичній температурі на 1,15-1,35 кг/т умовного палива на кожні 10 кг/т ПВП та при змінній теоретичній температурі – на 0,35-1,15 кг/т умовного палива (рис. 8).

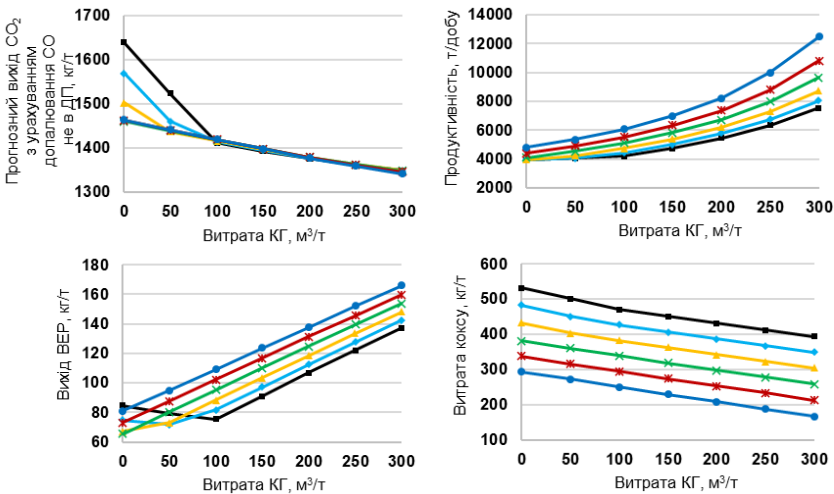


Рисунок 8 – Закономірності впливу спільного використання коксового газу та ПВП на викиди CO₂ та техніко-економічні показники доменної плавки.

На рисунку зміна параметрів при різній витраті ПВП:

- ПВП=0 кг/т; — ПВП=50 кг/т; — ПВП=100 кг/т;
- ПВП=150 кг/т; — ПВП=200 кг/т; — ПВП=250 кг/т.

Таким чином, спільне вдування в горні доменної печі ПВП та коксового газу (так само як і природного) дозволяє вирішити одночасно два завдання – зменшення викидів CO₂ за рахунок коксового газу та забезпечити мінімальну собівартість чавуну та сталі за рахунок ПВП. Також встановлено, що на металургійному комбінаті повного циклу при роботі 2 доменних печей однакового об'єму з витратою ПВП ~150 кг/т і витратою коксу ~385 кг/т є можливість забезпечити коксовим газом роботу третьої доменної печі такого ж об'єму з витратою КГ 160-335 м³/т, що дозволить зменшити витрату коксу на 20-25 % з урахуванням повного забезпечення коксових батарей коксовим газом.

Вперше 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 rd близького до 0 % при постійній / змінній теоретичній температурі горіння (табл. 2):

- при витраті ПВП 200 кг/т витрата природного газу – 191 м³/т / 193 м³/т. При цьому витрата коксу досягає 173 кг/т / 162 кг/т відповідно;
- при витраті ПВП 250 кг/т витрата природного газу – 179 м³/т / 180 м³/т. При цьому витрата коксу досягає 136 кг/т / 129 кг/т відповідно.
- при витраті ПВП ~200-250 кг/т та КГ ~300 м³/т досягається rd близьке до нуля. При цьому витрата коксу досягає 201-213 кг/т / 156-167 кг/т відповідно.

Таблиця 2 – Витрата палива, при якій все залізо у печі відновлюється непрямим шляхом.

Параметр	Tтеор=const			Tтеор=invar		
	200	250	200-250	200	250	200-250
Витрата ПВП, кг/т	200	250	200-250	200	250	200-250
Витрата природного газу, м ³ /т	191	179	-	193	180	-
Витрата коксового газу, м ³ /т	-	-	300	-	-	300
Витрата коксу, кг/т	173	136	201-213	162	129	156-167

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, природного та коксового газу на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрату коксу, в тому числі з підігріванням палива (табл. 3).

Таблиця 3 – Ефективність використання технологій вдування різного палива на викиди CO₂, витрату коксу та вихід ВЕР.

	ПВП 250 кг/т	Природний газ 200 м ³ /т	Коксовий газ 300 м ³ /т
Викиди CO ₂	-10%	-17,8%	-17,6%
Вихід ВЕР	-6%	+69%	+61%
Кокс	-45%	-33%	-26%
<i>З врахуванням підігріву палива:</i>			
Температура підігріву палива	400°C	800°C	800°C
Викиди CO ₂	-11,2%	-23,4%	-23%
Вихід ВЕР	-8%	+63,5%	+55,3%
Кокс	-46%	-39%	-31%

Висновки

1. Вдосконалені теплоенергетична та ексергетична моделі доменної плавки та встановлено закономірності впливу ПВП, природного та коксового газу при підтримці постійної (2100 °C) / змінної (1800-2200 °C) теоретичної температури горіння на викиди CO₂:

- збільшення витрати природного газу на кожні ~50 м³/т дозволяє зменшити вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю

на $\sim 1,9-2,6$ %. Застосування природного газу в кількості до $200 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволить зменшити викиди CO_2 на $7,6$ % / $10,4$ %;

- збільшення витрати коксового газу на кожні $\sim 50 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю на $\sim 1,1-1,7$ %. Застосування коксового газу в кількості до $200 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволить зменшити викиди CO_2 на $6,6$ % / $10,2$ %;

- прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю практично не залежить від витрати ПВП.

2. Встановлено закономірності впливу застосування різних марок вугілля для ПВП та зміни хімічного складу ПВП при підтримці теоретичної температури на постійному рівні на викиди CO_2 та показники доменної плавки, що дозволить раціонально підходити до вибору вугілля для ПВП, що особливо актуально в воєнний час та повоєнного відновлення України в умовах втрати енергетичної бази вугілля для ПВП.

3. Спільне вдування в горн доменної печі природного / коксового газу та ПВП дозволяє вирішити одночасно два завдання зменшення викидів CO_2 та забезпечити мінімальну собівартість чавуну та сталі. При цьому збільшення витрати природного / коксового газу визначає зменшення викидів CO_2 , а збільшення витрати ПВП – зменшення собівартості виробництва чавуну.

4. На металургійному комбінаті повного циклу при роботі 2 доменних печей однакового об'єму з витратою ПВП $\sim 150 \text{ кг/т}$ і витратою коксу $\sim 385 \text{ кг/т}$ є можливість забезпечити коксовим газом роботу третьої доменної печі такого ж об'єму з витратою КГ $160-335 \text{ м}^3/\text{т}$, що дозволить додатково зменшити витрату коксу $15-25$ % з урахуванням повного забезпечення коксових батарей коксовим газом.

5. Вперше визначено критичні витрати паливних добавок, при яких, згідно з принципом Грюнера, очікується досягнення повного відновлення заліза непрямым шляхом, а значить і мінімальної витрати палива при досягненні rd близького до 0% при постійній / змінній теоретичній температурі:

- при витраті ПВП 200 кг/т витрата природного газу – $191 \text{ м}^3/\text{т}$ / $193 \text{ м}^3/\text{т}$. При цьому витрата коксу досягає 173 кг/т / 162 кг/т відповідно;

- при витраті ПВП 250 кг/т витрата природного газу – $179 \text{ м}^3/\text{т}$ / $180 \text{ м}^3/\text{т}$. При цьому витрата коксу досягає 136 кг/т / 129 кг/т відповідно.

- при витраті ПВП $\sim 200-250 \text{ кг/т}$ та КГ $\sim 300 \text{ м}^3/\text{т}$ досягається rd близьке до нуля. При цьому витрата коксу досягає $201-213 \text{ кг/т}$ / $156-167 \text{ кг/т}$ відповідно.

6. Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування ПВП, природного та коксового газу на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрату коксу:

- використання ПВП без підігріву / з підігрівом дозволяє зменшити викиди CO_2 на 10% / $11,2$ %, витрату коксу на 45% / 46% та вихід ВЕР

на 6 / 8 %;

- використання ПГ без підігріву / з підігрівом дозволяє зменшити викиди CO₂ на 17,8 % / 23,4 %, витрату коксу на 33 % / 39 % та збільшити вихід ВЕР на 69 % / 63,5 %;

- використання КГ без підігріву / з підігрівом дозволяє зменшити викиди CO₂ на 17,6 % / 23 %, витрату коксу на 26 % / 31 % та збільшити вихід ВЕР на 61 % / 55,3 %.

Перелік посилань

1. Аналіз тенденцій розвитку уявлень та технологій, спрямованих на зменшення емісії діоксиду вуглецю в доменному виробництві / О. Л. Чайка, Б. В. Корнілов, О. С. Меркулов, А. О. Москалина, В. В. Лебідь, М. М. Ізюмський // *Метал і лиття України*. 2022. № 2. (329). С. 8-19.
2. Парижское соглашение в расках Рамочной конвенции ООН. Париж. 2015. *unfccc.int*: веб-сайт. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.
3. 25-я сессия конференции ООН по изменению климата. Мадрид. 2019. *unfccc.int*: веб-сайт. URL: <https://unfccc.int/event/cop-25>.
4. 26-я сессия конференции ООН по изменению климата. Глазго. 2021. *unfccc.int*: веб-сайт. URL: <https://unfccc.int/ru/peregovornyy-process-i-vstrechi/parizhskoe-soglashenie/klimaticheskii-pakt-glazgo/itogi-ks-26-voprosy-otchyotnosti#eq-9>.
5. Економічна статистика. Навколишнє природне середовище. Держстат України. 2021. *ukrstat.gov.ua*: веб-сайт. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/ns.htm.
6. Украина четвертая в мире по сокращению выбросов парниковых газов. GMK Center. 9 септя 2021. *gmk.center*: веб-сайт. URL: <https://gmk.center/infographic/ukraina-chetvertaya-v-mire-po-sokrashheniju-vybrosov-parnikovyyh-gazov/>.
7. Як держава підтримує «зелену» енергетику за рахунок підприємств, які інвестують в екологічне виробництво (рос.). Економічна правда. 23 жовтня 2020. *epravda*: веб-сайт. URL: <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2020/10/23/666559/>.
8. Эконолог (не) в помощь: почему в Украине не уменьшаются выбросы CO₂ в атмосферу (рос.). Видавництво «Дело.юа». 2 грудня 2019. *delo.ua*: веб-сайт. URL: <https://delo.ua/economyandpoliticsinukraine/ekonolog-ne-v-pomosch-rochemu-v-ukraine-ne-umen-361322/>.
9. Buergler T., Kofler I. Direct Reduction Technology as a Flexible Tool to Reduce CO₂ Intensity of Iron and Steelmaking. *Ibid*. P. 284-291.
10. 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.
11. Большаков В. И., Чайка А. Л., Лебедь В. В., Сохацкий А. А. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива на доменных печах Украины. *Металл и литье Украины*. 2013. № 10. С. 1-6.
12. Доменное производство с учётом применения прошлых, современных и будущих технологий по сокращению выбросов CO₂ / А. К. Агравал, К. П. Кинзель, Б. Роснер, Х. Каппес и др. // *METEC & 4th ESTAD (European Steel Technology and Application Days) 24-28 June 2019*. Congress Centre Düsseldorf,

- Germany. 2019.
13. Жеребин Б. Н., Пареньков А. Е. Неполадки и аварии в работе доменных печей. Новокузнецк, 2001. 275 с.
 14. Чайка А. Л., Сохацкий А. А., Москалина А. А., Авдеев Р. В. Эксергетический анализ эффективности доменной плавки при применении пылеугольного топлива и природного газа. *Инновационные пути модернизации базовых отраслей промышленности, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей природной среды*. 2013, С. 17-23.
 15. Люнген Х. Б., Шмёле П. Сравнение режимов работы доменной печи в масштабах всего мира. *8-й Международный научно-технический конгресс по производству чугуна и стали ICSTI 2018*. 2018 (Luengen H.B., Schmoele P.: Comparison of blast furnace operation modes in the world: 8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking - ICSTI 2018, 2018)
 16. Системная надежность доменного производства, опыт и перспективы освоения технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива на Украине / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, Б. В. Корнилов, А. Г. Шевелев // *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2014. Вып. 28. С. 16-31.
 17. Большаков В. И., Чайка А. Л., Лебедь В. В., Сохацкий А. А. Опыт и перспективы применения пылеугольного топлива в доменном производстве Украины. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 2. С. 6-11.
 18. Системная надежность доменного производства с использованием пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий, К. С. Цюпа, Б. В. Корнилов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. №7. С. 22-30.
 19. Особенности вдувания пылеугольного топлива и тепловой работы фурменной зоны доменной печи / В. Ю. Шостак, А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий, К. С. Цюпа, Б. В. Корнилов, А. А. Москалина // *Теория и практика металлургии*. 2017. № 3-4 (110-111). С. 21-26.
 20. Тепловая работа доменной печи, полезным объемом 3000 м³, при переходе на технологию применения пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь, А. А. Сохацкий, Р. В. Авдеев // *VI Международный Конгресс по агло-коксо-доменному производству «Проблемы доменного и смежных производств в современных условиях. Технологии использования разных видов топлива и сырья»*: 20-24 мая 2013 г., г. Ялта. С. 261-270.
 21. Освоение работы доменной печи, полезным объемом 3000 м³, с применением пылеугольного топлива / В. И. Большаков, А. Л. Чайка, В. В. Лебедь и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 4. С. 36-40.
 22. Корнилов Б. В. Совершенствование технологии и повышение энергоэффективности доменной плавки путем улучшения теплогазодинамической работы фурменной и колошниковой зон доменной печи с применением пылеугольного топлива: дис. канд. техн. наук. ИЧМ. Днепро. 2019.
 23. Пашинский В. Ф., Товаровский И. Г., Коваленко П. Е., Бойков Н. Г. Доменная плавка с вдуванием коксового газа. К. : Техника, 1991. 104 с.
 24. Шаповалов М. А. О вдувании восстановительных газов в горн доменной печи. *Сталь*. 1958. №5. С. 385-389.

25. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. М. : Металлургия. 1980. 303 с.
26. Товаровский И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки. Днепропетровск: Журфонд. 2015. 912 с.

Reference

1. Analiz tendentsii rozvytku uiaвлен ta tekhnologii, spriamovanykh na zmenshennia 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] / O. L. Chaika, B. V. Kornilov, O. Ye. Merkulov, A. O. Moskalyna, V. V. Lebid, M. M. Iziumskiy // *Metal i lyttia Ukrainy*. 2022. No 2. (329). P. 8-19.
2. Parizhskoe soglashenie v raskakh Ramochnoi konventsii OON Parizh 2015. *unfccc.int* Retrieved from: https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf.
3. 25-ia sessiia konferentsii OON po izmeneniiu klimata Madrid 2019. *unfccc.int*. Retrieved from: <https://unfccc.int/event/cop-25>.
4. 26-ia sessiia konferentsii OON po izmeneniiu klimata Glazgo 2021. *unfccc.int*. Retrieved from: <https://unfccc.int/ru/peregovornyy-process-i-vstrechi/parizhskoe-soglashenie/klimaticheskii-pakt-glazgo/itogi-ks-26-voprosy-otchyotnosti#eq-9>.
5. Ekonomichna statystyka. Navkolyshnie pryrodne seredovyshe. Derzhstat Ukrainy. 2021. *ukrstat.gov.ua*. Retrieved from: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/ns.htm.
6. Ukraina chetvertaia v mire po sokrashcheniiu vybrosov parnikovykh gazov GMK Center 9 serpnia 2021. *gmk.center*. Retrieved from: <https://gmk.center/infographic/ukraina-chetvertaya-v-mire-po-sokrashcheniu-vybrosov-parnikovykh-gazov/>
7. Yak derzhava pidtrymuie «zelenu» enerhetyku za rakhunok pidpriemstv, yaki investuiut v ekolohichne vyrobnytstvo (ros.). Ekonomichna pravda. 23 zhovtnia 2020. *epravda*. Retrieved from: <https://www.epravda.com.ua/rus/columns/2020/10/23/666559/>.
8. Ekonalog ne v pomoshch pochemu v Ukraine ne umenshaiutsia vybrosy SO₂ v atmosferu (rus). Vydavnytstvo «Delo.ua». 2 hrudnia 2019. *delo.ua*. Retrieved from: <https://delo.ua/economyandpoliticsinukraine/ekonalog-ne-v-pomosch-pochemu-v-ukraine-ne-umen-361322/>
9. Buergler T., Kofler I. Direct Reduction Technology as a Flexible Tool to Reduce CO₂ Intensity of Iron and Steelmaking. *Ibid*. P. 284-291.
10. Kurunov I. F. Sovremennoe sostoianie i ozhidaemye mirovye tendentsii razvitiia metallurgii zheleza [The current state and expected global trends in the development of iron metallurgy]. *Biulleten nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii Chernaia metallurgii*. 2017. No 2. P. 3-11.
11. Bolshakov V. I., Chaika A. L., Lebed V. V., Sokhatskii A. A. Opyt i perspektivy primeneniia pyleugolnogo topliva na domennykh pechakh Ukrainy [Experience and prospects of using pulverized coal fuel at blast furnaces in Ukraine]. *Metall i lyttia Ukrainy*. 2013. No 10. P. 1-6.
12. Domennee proyzvodstvo s uchëtom pryimeneniia proshlykh, sovremennykh y budushchykh tekhnolohii po sokrashcheniiu vybrosov CO₂ [Blast furnace with past, current and future technologies to reduce CO₂ emissions] / A. K. Ahraval, K. P. Kynzel, B. Rosner, Kh. Kappes et al // *METEC & 4th ESTAD (European Steel Technology and Application Days) 24-28 June 2019*. Congress Centre Düsseldorf,

- Germany. 2019.
13. Zhrebryn B. N., Parenkov A. E. *Nepoladky y avaryy v rabote domennykh pechei* [Malfunctions and accidents in the operation of blast furnaces]. Novokuznetsk, 2001. 275 p.
 14. Chaika A. L., Sokhatskyi A. A., Moskalyna A. A., Avdeev R. V. Eksergeticheskii analiz effektivnosti domЕННОI plavki pri primenenii pyleugolnogo topliva i prirodnoгo gaza [Exergy analysis of blast-furnace smelting efficiency using pulverized coal fuel and natural gas]. *Innovatsionnye puti modernizatsii bazovykh otraslei promyshlennosti energo- i resursoberezhnie okhrana okruzhaiushchei prirodnoi srede*. 2013. P. 17-23.
 15. Luengen H. B., Schmoele P. Sravnenie rezhimov raboty domЕННОI pechi v masshtabakh vseгo mira. 8-i *Mezhdunarodnyi nauchno-tekhnicheskii kongress po proizvodstvu chuguna i stali ICSTI 2018*. 2018 (Luengen H. B., Schmoele P. : Comparison of blast furnace operation modes in the world: 8th International Congress on Science and Technology of Ironmaking - ICSTI 2018, 2018)
 16. Sistemnaia nadezhnost domЕННОгo proizvodstva opyt i perspektivy osvoeniia tekhnologii domЕННОI plavki s ispolzovaniem pyleugolnogo topliva na Ukraine [System reliability of blast-furnace production, experience and prospects of mastering the technology of blast-furnace smelting using pulverized coal in Ukraine] / V. Y. Bolshakov, A. L. Chaika, V. V. Lebed, B. V. Kornilov, A. H. Shevelev // *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2014. Collection 28. P. 16-31.
 17. Bolshakov V. Y., Chaika A. L., Lebed V. V., Sokhatskyi A. A. Opyt i perspektivy primeniia pyleugolnogo topliva v domennom proizvodstve Ukrainy [Experience and prospects of using pulverized coal fuel in blast furnace production in Ukraine]. *Metallurgicheskai i gornorudnaia promyshlennost*. 2015. No 2. P. 6-11.
 18. Sistemnaia nadezhnost domЕННОгo proizvodstva s ispolzovaniem pyleugolnogo topliva [Systemic reliability of blast furnace production using pulverized coal] / V. Y. Bolshakov, A. L. Chaika, V. V. Lebed, A. A. Sokhatskyi, K. S. Tsiupa, B. V. Kornilov // *Metallurgicheskai i gornorudnaia promyshlennost*. 2015. No 7. P. 22-30.
 19. Osobennosti vduvaniia pyleugolnogo topliva i teplovoi raboty furmennoi zony domЕННОI pechi [Peculiarities of injection of pulverized coal fuel and thermal performance of the blast furnace tuyere zone] / V. Iu. Shostak, A. L. Chaika, A. A. Sokhatskyi, K. S. Tsiupa, B. V. Kornilov, A. A. Moskalyna // *Teoriia i praktika metallurgii*. 2017. No 3-4 (110-111). P. 21-26.
 20. Teplovaia rabota domЕННОI pechi poleznym obieemom 3000 m³ pri perekhode na tekhnologiiu primeniia pyleugolnogo topliva [Thermal performance of a blast furnace with a useful volume of 3000 m³ during the transition to the technology of using pulverized coal] / V. Y. Bolshakov, A. L. Chaika, V. V. Lebed, A. A. Sokhatskyi, R. V. Avdeev // *VI Mezhdunarodnyi Kongress po aglo-kokso-domennomu proizvodstvu Problemy domЕННОгo i smezhnykh proizvodstv v sovremennykh usloviakh Tekhnologii ispolzovaniia raznykh vidov topliva i syria*: 20-24 may 2013. P. 261-270.
 21. Osvoenie raboty domЕННОI pechi poleznym obieemom 3000 m³ s primeniem pyleugolnogo topliva [Mastering the operation of a blast furnace with a useful volume of 3000 m³, using pulverized coal] / V. Y. Bolshakov, A. L. Chaika, V. V. Lebed et

- al // *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*. 2012. No 4. P. 36-40.
22. Kornilov B. V. Sovershenstvovanie tekhnologii i povysenie energoeffektivnosti domЕННОI plavki putem uluchsheniia teplo-gazodinamicheskoi raboty furmennoi i koloshnikovoi zon domЕННОI pechi s primeneniem pyleugolnogo topliva [Improving the technology and increasing the energy efficiency of blast-furnace smelting by improving the heat-gas-dynamic operation of the tuyere and top zones of a blast furnace using pulverized coal]: dis. kand. tekhn. nauk. ICHM. Dnepr. 2019.
 23. Domennaia plavka s vduvaniem koksovogo gaza [Blast-furnace smelting with coke gas injection] / V. F. Pashynskiy, Y. H. Tovarovskyi, P. E. Kovalenko, N. H. Boikov. Kyiv: Tekhnika, 1991. 104 p.
 24. Shapovalov M. A. O vduvanii vosstanovitelnykh gazov v gorn domЕННОI pechi [About the blowing of reducing gases into the hearth of a blast furnace]. *Stal*. 1958. No 5. P. 385-389.
 25. Ramm A. N. *Sovremennyyi domennyi protsess* [Modern blast furnace process]. Moskva: Metallurgiya, 1980. 303 p.
 26. Tovarovskyi Y. H. Poznanie protsessov i razvitie tekhnologii domЕННОI plavki [Cognition and developing of blast furnace technology]. Dnepropetrovsk: Zhurfond. 2015. 912 p.

O. L. Chaika, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-1678-2580

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

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

O. Ye. Merkulov, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-7867-0659

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

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

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

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGIES USING PCI, NATURAL AND COKE OVER GAS ON THE DECARBONIZATION OF THE BLAST FURNACE PRODUCTION

Summary. The purpose of the work is to establish the patterns of use of various fuel additives aimed at reducing carbon dioxide emissions from the blast furnace. In connection with global warming and related negative consequences in the future, the issue of reducing greenhouse gases (including CO₂) is one of the most important in the world. Thus, the issue of decarbonization of the metallurgical industry of Ukraine, which accounts for about 26% of emissions, is urgent. In Ukraine during steel production, CO₂ emissions are ~8% higher than in EU countries, which is primarily due to the fact that the energy intensity of blast furnace production technology in Ukraine is greater. Therefore, with the introduction of quotas for CO₂ emissions (EU ETS), without the introduction of blast furnace decarbonization technologies, Ukrainian metallurgy may become uncompetitive. With the use of improved thermal energy and exergy models of blast furnace smelting, regularities were established when using PCI (as the most economical substitute for coke), natural and coke over gas for CO₂ emissions and technical and economic indicators of blast furnace smelting. The best period of operation of blast furnace No. 4 with a volume of 2002 m³ of PJSC "MK "Azovstal" in 2021 was chosen as the basic calculation option. The regularities of the effect of the use of different grades of

coal for pulverized coal injection (PCI) and changes in the chemical composition of PCI while maintaining the theoretical combustion temperature at a constant level on CO₂ emissions and blast furnace smelting indicators have been established, which will allow a rational approach to the choice of coal for PCI, which is especially relevant in wartime and the post-war recovery of Ukraine in the conditions of the loss of the coal energy base for PCI. For the first time, the critical consumption of fuel additives was determined, at which, according to Gruner's principle, it is expected to achieve full recovery of iron by indirect means, and therefore minimum fuel consumption when reaching rd close to 0%. As a result of the work performed, the limit values of the effectiveness of the use of PCI, natural and coke gas injection technologies on carbon dioxide emissions, output of secondary energy resources and coke consumption were established.

Keywords: blast furnace, decarbonization, coke consumption, heat balance, pulverized coal injection, natural gas, coke over gas.

For citation: Doslidzhennia vplyvu tekhnologii 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] / O. L. Chaika, B. V. Kornilov, A. O. Moskalyna, O. Ye. Merkulov, V. V. Lebed, M. M. Izumskyi // *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*. 2022. Collection 36. P. 49-66. [In Ukrainian]. DOI: 10.52150/2522-9117-2022-36-49-66.

*Стаття надійшла до редакції збірника 30.11.2022 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 5 від 20.12.2022 р.)*