

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-120-145>

УДК 669.162.21:661.97:001.8

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

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

І. Г. Муравйова¹, д.т.н., пров.н.с., ORCID 0000-0001-5926-7787

Л. І. Гармаш¹, к.т.н., с.н.с., с.н.с., ORCID 0000-0002-6873-6685

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

В. В. Лебідь¹, к.т.н., с.н.с.

М. М. Ізюмський¹, м.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 ІСНУЮЧИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ДЛЯ СУЧАСНИХ ТА ПЕРСПЕКТИВНИХ УМОВ ВИРОБНИЦТВА ЧАВУНУ В УКРАЇНІ

Анотація. У статті обговорюються результати теплоенергетичного та ексергетичного розрахунків можливостей нових та існуючих технологій зменшення викидів діоксиду вуглецю та витрати коксу, збільшення виробництва чавуну за рахунок вдунання в горн різних паливних добавок – ПВП, водню, мазуту, природного, коксового та угарного газу, 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 паливних добавок та їх комбінацій в широкому діапазоні, використання металодобавок та зміни технологічних параметрів роботи доменної печі. 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. Встановлено граничні значення вдунання різних паливних добавок у горно доменній печі, які визначаються такими факторами: ступенем прямого

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

відновлення заліза, теоретичною температурою горіння, наявністю технічного кисню та температурою колошникового газу. 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 існуючих та перспективних технологій доменної плавки, що забезпечують зменшення викидів діоксиду вуглецю для сучасних та перспективних умов виробництва чавуну в Україні / О. Л. Чайка, Б. В. Корнілов, І. Г. Муравйова, Л. І. Гармаш, А. О. Москалина, В. В. Лебідь, М. М. Ізюмський, М. Г. Джигота // *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 120-145. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-120-145>.

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 дозволить 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 CO_2 з доменної печі та техніко-економічні показники доменної плавки.

Методика досліджень. Для оцінки впливу потенціалу нових та існуючих технологій виробництва чавуну на зменшення викидів CO_2 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 спільний 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 CO_2 та техніко-економічні показники. Аналіз впливу пиловугільного палива (ПВП) та водневмісних паливних добавок (таких як природний та коксовий газ) на викиди CO_2 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;
- мазут – від 0 до 200 кг/т;
- угарний газ (СО) – від 0 до 300 м³/т.

Розрахунки застосування пиловугільного палива виконувались при зміні теоретичної температури горіння 1800-2200°C для різних марок вугілля, а газоподібних паливних добавок – при зміні теоретичної температури горіння 1800-2200°C та при постійній теоретичній температурі – 2100°C. Підтримка теоретичної температури горіння на заданому рівні здійснювалася збільшенням вмісту пари в дутті (для її зниження) та кисню (для її підвищення).

Вплив використання ПВП на техніко-економічні показники та викиди CO_2 з доменної печі. Відносно до пиловугільного палива встановлено, що досягти максимального виробництва (~5000 т/добу) та

мінімальної витрати коксу (~273 кг/т чавуну) дозволяє застосування для ПВП антрациту (АП) витратою 250 кг/т. Деяко менший ефект має застосування для ПВП пісного (П) (~4700 т/добу і 311 кг/т чавуну відповідно) та слабкоспікливого (СС) (~4450 т/добу і 293 кг/т чавуну відповідно) вугілля. Мінімальне виробництво та максимальна витрата коксу досягається при використанні вугілля марок Б (бурий) – виробництво ~3500 т/добу і витрата коксу ~395 кг/т та Д (довгополуменевий) – ~3800 т/добу та ~350 кг/т відповідно (рис. 1).

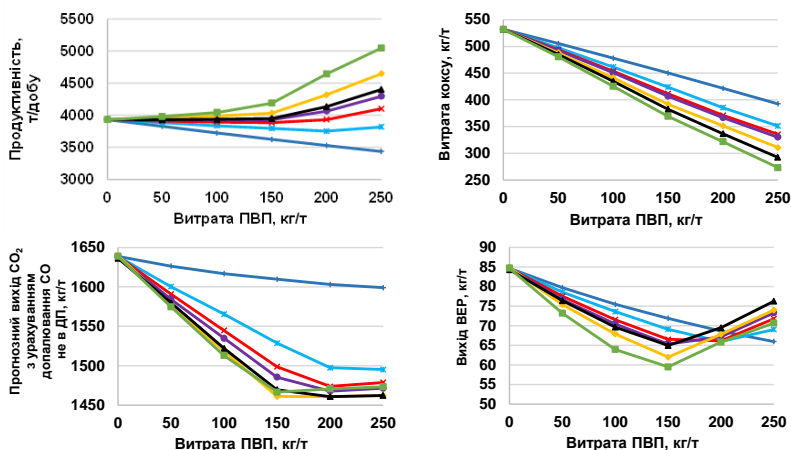


Рисунок 1 – Вплив марок ПВП на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та вихід вторинних енергоресурсів та прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю

Марки вугілля для ПВП:

— Б — Д — Г — Ж — П — СС — АП

При цьому вихід вторинних енергоресурсів (енергія колошникового газу, яку можна отримати допалюючи його до CO₂) для більшості марок вугілля (за винятком бурого) для ПВП має тенденцію зменшення з 85 кг умовного палива на тону чавуну (далі – ум. пал./т) при плавлі 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. Збільшення витрати ПВП від 0 до 250 кг/т при застосуванні бурого вугілля призводить до зменшення виходу енергоресурсів з 85 кг ум. пал./т до 65 кг ум. пал./т.

Прогнозний вихід CO₂ на тону чавуну з врахуванням допалювання СО поза доменною піччю зменшується зі збільшенням витрати ПВП. Якщо при використанні бурого вугілля для ПВП при збільшенні його витрати можна досягти мінімального зменшення виходу CO₂ ~40 кг/т (з 1640 до 1600 кг/т), то для інших марок вугілля це зменшення буде більш

суттєвим – на 140-180 кг/т (з 1640 до 1460-1500 кг/т). Варто зауважити, що зменшення виходу CO_2 спостерігається зі збільшенням витрати ПВП до 150-200 кг/т, а потім практично не змінюється, а для деяких марок вугілля, наприклад, антрациту, – збільшується.

Таким чином встановлено, що застосування різних марок вугілля (крім бурого) для ПВП із витратою ~ 150 кг/т і більше дозволяє зменшити вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю на 8,5-11% порівняно з доменною плавкою тільки на коксі.

Вплив використання природного газу на техніко-економічні показники та викиди CO_2 з доменної печі. Збільшення витрати природного газу для вдування в доменну піч в кількості з 0 до 200 $\text{m}^3/\text{т}$ при підтримці теоретичної температури на постійному рівні призводить до збільшення продуктивності на 117%, з ~ 4000 т/добу до ~ 8700 т/добу. При цьому збільшення витрат природного газу в кількості від 0 до 200 $\text{m}^3/\text{т}$ при змінній теоретичній температурі призводить до збільшення продуктивності на 30%, з ~ 4000 т/добу до ~ 5200 т/добу. Це пов'язано з істотною відмінністю вмісту технічного кисню в дутті (для зміни загального вмісту кисню в дутті), необхідного для підтримки теоретичної температури на необхідному рівні (рис. 2).

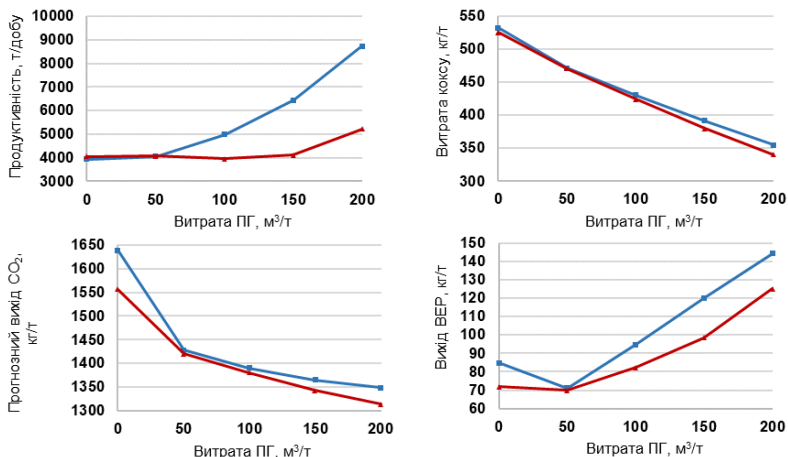


Рисунок 2 – Вплив витрати природного газу на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO до CO_2 поза доменною піччю за підтримки теоретичної температури горіння на постійному рівні (—■—) та змінної теоретичної температури (—▲—)

Застосування природного газу в доменній печі дозволяє зменшити витрати коксу на 1,7% / 1,8% на кожні 10 $\text{m}^3/\text{т}$ ПГ за постійної / змінної

теоретичної температури горіння.

Вихід вторинних енергоресурсів при витраті ПГ 50-200 м³/т збільшується: при постійній теоретичній температурі – з 70 до 145 кг ум. пал./т, за змінної – з 70 до 125 кг ум. пал./т.

Прогнозний вихід CO₂ на тонну чавуну з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю зменшується зі збільшенням витрат природного газу. Застосування ПГ у кількості 50 м³/т порівняно з безгазовою плавкою дозволяє зменшити прогнозний вихід CO₂ на 12,8%, з 1640 кг/т до 1430 кг/т за постійної теоретичної температури і з 1560 кг/т до 1420 кг/т за змінної. Це пов'язано з тим, що зменшується кількість пари, необхідної для підтримки теоретичної температури на постійному рівні (2100°C) / у раціональному діапазоні (1800-2200°C) – на безгазовій шихті з 41 / 25 г/м³ до 6 / 4 г/м³ при застосуванні 50 м³/т природного газу. Тому оцінку впливу природного газу на викиди CO₂ необхідно проводити за постійної кількості пари у дутті, тобто при витраті газу 50 м³/т і більше.

Збільшення витрати природного газу з 50 до 200 м³/т дозволяє зменшити прогнозний вихід CO₂ на 5,6% (з 1430 до 1350 кг/т) при постійній теоретичній температурі та на 7,7% (з 1420 до 1310 кг/т) при змінній.

Таким чином встановлено, що збільшення витрати природного газу на кожні ~50 м³/т дозволяє зменшити вихід CO₂ з урахуванням допалювання CO поза доменною печі до CO₂ на ~1,9-2,6%.

Вплив використання коксового газу на техніко-економічні показники та викиди CO₂ з доменної печі. Збільшення витрати коксового газу для вдунання доменну піч у кількості з 0 до 300 м³/т при підтримці теоретичної температури на постійному рівні призводить до збільшення продуктивності з ~4000 т/добу до ~7550 т/добу. При цьому збільшення витрати коксового газу в кількості від 0 до 250 м³/т при змінній теоретичній температурі не істотно впливає на зміну продуктивності, збільшення продуктивності до ~4550 т/добу можна досягти при витраті коксового газу 300 м³/т. Це пов'язано з істотною відмінністю вмісту технічного кисню в дутті (для зміни загального вмісту кисню в дутті), необхідного для підтримки теоретичної температури на необхідному рівні (рис. 3).

Застосування коксового газу в доменній печі дозволяє зменшити витрати коксу на 0,87% / 0,92% на кожні 10 м³/т КГ, що еквівалентно зменшенню витрат коксу на 0,46 кг/м³ / 0,49 кг/м³ коксового газу при постійній / змінній теоретичній температурі горіння. Таким чином, аналітичним шляхом встановлено коефіцієнт заміни коксу на коксовий газ при вдунанні в доменну піч, який відрізняється від відомих – 0,46-0,49 кг/м³.

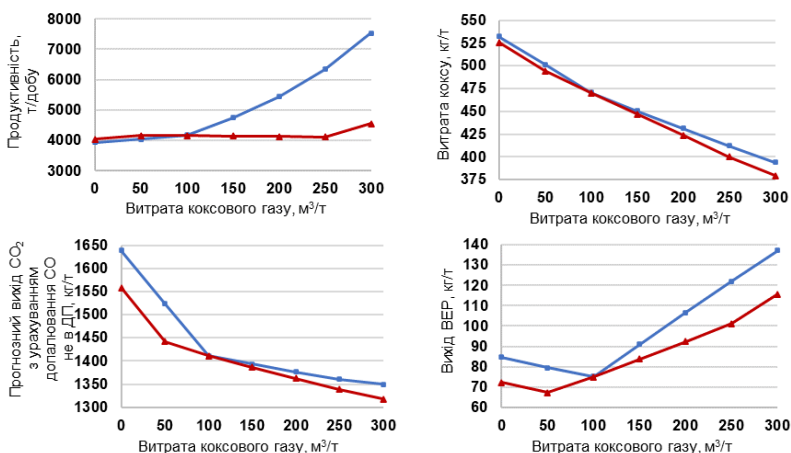


Рисунок 3 – Вплив витрати газу коксового газу на продуктивність печі, вихід вторинних енергетичних ресурсів та витрату коксу, прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО до CO₂ поза доменною піччю за підтримки теоретичної температури горіння на постійному рівні (—■—) та змінної теоретичної температури (—▲—)

Вихід вторинних енергоресурсів має екстремум. Зменшується: при змінній теоретичній температурі та збільшенні витрати КГ до 50 м³/т – з 72 до 67 кг ум. пал./т, за постійної теоретичної температури та збільшення витрати КГ до 100 м³/т – з 85 до 95 кг ум. пал./т. Після досягнення цих екстремумів – збільшується: при змінній теоретичній температурі та збільшенні витрати КГ з 50 до 300 м³/т – з 67 до 116 кг ум. пал./т, за постійної та збільшення витрати КГ з 50 до 300 м³/т – з 75 до 137 кг ум. пал./т. Наявність екстремуму ймовірно пов'язане із застосуванням пари для підтримки теоретичної температури на постійному рівні або раціональному діапазоні.

Прогнозний вихід CO₂ на тону чавуну з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю зменшується зі збільшенням витрати коксового газу. Причому характер його зменшення нерівномірний: при постійній теоретичній температурі застосування КГ у кількості 100 м³/т порівняно з безгазовою плавкою дозволяє зменшити прогнозний вихід CO₂ на 13,9% (1640 до 1410 кг/т); при змінній теоретичній температурі застосування КГ у кількості 50 м³/т порівняно з безгазовою плавкою дозволяє зменшити прогнозний вихід CO₂ на 7,5% (з 1560 до 1430 кг/т). Це пов'язано з тим, що зменшується кількість пари, необхідної для підтримки теоретичної температури на постійному рівні / у раціональному діапазоні – на безгазовій шихті з 41 / 25 г/м³ до 4 / 5 г/м³ при застосуванні 50 / 100 м³/т коксового газу. Тому оцінку впливу

коковского газу на викиди CO_2 потрібно проводити за постійної кількості пари в дутті, тобто при витраті коковского газу понад $100 / 50 \text{ м}^3/\text{т}$ при постійній / змінній теоретичній температурі.

Збільшення витрати коковского газу зі 100 до $300 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити прогнозний вихід CO_2 на $4,3\%$ (з 1410 до $1350 \text{ кг}/\text{т}$) за постійної теоретичної температури та при зміні витрати коковского газу з 50 до $300 \text{ м}^3/\text{т}$ на $8,6\%$ (з 1440 до $1320 \text{ кг}/\text{т}$) за змінної.

Таким чином встановлено, що збільшення витрати коковского газу на кожні $\sim 50 \text{ м}^3/\text{т}$ дозволяє зменшити вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю на $1,1\%$ / $1,7\%$ за постійної / змінної теоретичної температури горіння відповідно.

Вплив використання водню на техніко-економічні показники та викиди CO_2 з доменної печі. Збільшення витрати водню (H_2) для дування в доменну піч у кількості з 0 до $585 \text{ м}^3/\text{т}$ при підтримці теоретичної температури на постійному рівні призводить до збільшення продуктивності з ~ 4000 т/добу до ~ 9800 т/добу. При цьому збільшення витрати водню в кількості від 0 до $600 \text{ м}^3/\text{т}$ за змінної теоретичної температури менш істотно впливає на збільшення продуктивності – до ~ 5900 т/добу. Це пов'язано з істотною відмінністю вмісту технічного кисню в дутті (для зміни загального вмісту кисню в дутті), необхідного для підтримки теоретичної температури на необхідному рівні (рис. 4).

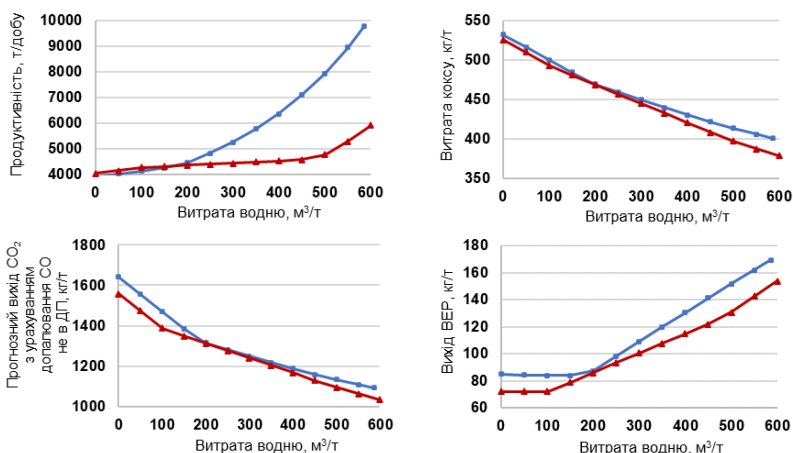


Рисунок 4 – Вплив витрати водню на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO до CO_2 поза доменною піччю за підтримки теоретичної температури горіння на постійному рівні (—■—) та змінної теоретичної температури (—▲—)

Застосування водню в доменній печі дозволяє зменшити витрату коксу на 0,48% / 0,46% на кожні 10 м³/т Н₂, що еквівалентно зменшенню витрат коксу на 0,25 кг/м³ / 0,22 кг/м³ водню при постійній / змінній теоретичній температурі горіння. Таким чином, вперше аналітичним шляхом встановлено коефіцієнт заміни коксу воднем при застосуванні водню в доменній плавці – 0,22-0,25 кг/м³.

Вихід вторинних енергоресурсів практично не змінюється при витраті водню менше 150 / 100 м³/т при постійній / змінній теоретичній температурі.

При постійній теоретичній температурі збільшення витрати водню зі 150 до 585 м³/т призводить до збільшення виходу вторинних енергоресурсів (ВЕР) із 84 до 169 кг ум. пал./т. При змінній теоретичній температурі збільшення витрати водню зі 100 до 600 м³/т призводить до збільшення виходу ВЕР із 72 до 154 кг ум. пал./т.

Прогнозний вихід СО₂ на тонну чавуну з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю зменшується зі збільшенням витрати водню. Причому характер його зменшення нерівномірний: при постійній теоретичній температурі застосування Н₂ у кількості 150 м³/т порівняно з безгазовою плавкою та дозволяє зменшити прогнозний вихід СО₂ з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю на 15,5% (з 1640 до 1385 кг/т); при змінній теоретичній температурі застосування Н₂ у кількості 100 м³/т порівняно з безгазовою плавкою дозволяє зменшити прогнозний вихід СО₂ на 10,9% (з 1560 до 1390 кг/т). Це пов'язано з тим, що зменшується кількість пари, необхідної для підтримки теоретичної температури на постійному рівні / у раціональному діапазоні – на безгазовій шихті з 41 / 25 г/м³ до 4 / 4 г/м³ при застосуванні водню 150 / 100 м³/т.

Тому оцінку впливу водню на викиди СО₂ необхідно проводити за постійної кількості пари в дуті, тобто при витраті водню понад 150 / 100 м³/т при постійній / змінній теоретичній температурі.

Збільшення витрати водню зі 150 до 585 м³/т дозволяє зменшити прогнозний вихід СО₂ на 21,3% (з 1385 до 1090 кг/т) при постійній теоретичній температурі та зміні витрати водню зі 100 до 600 м³/т на 25,9% (з 1390 до 1030 кг/т) при змінній теоретичній температурі.

Таким чином встановлено, що збільшення витрати водню на кожні ~50 м³/т дозволяє зменшити вихід СО₂ з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю на 2,4% / 2,6% за постійної / змінної теоретичної температури горіння відповідно.

Результати, отримані при моделюванні вдування водню в доменну піч узгоджуються з результатами, отриманими авторами [16-17], щодо обмежень, які накладаються на вдування водню та величину коефіцієнту заміни коксу воднем. Обмеження на кількість вдування

водню в горно доменної печі в джерелі [16] дещо нижче в порівнянні з отриманими результатами, що може бути пов'язано з вхідними умовами роботи доменної печі – за базовий період обрана доменна піч, що працює на гарячому агломераті, використання якого в значній мірі зменшило обмежуючий вплив температури колошникового газу при збільшенні витрати водню.

Таким чином, використання гарячого агломерату може бути перспективним технологічним прийомом, що забезпечить збільшення витрати водню в доменній печі.

Вплив використання мазуту на техніко-економічні показники та викиди CO₂ з доменної печі. При підтримці постійної теоретичної температури при витраті мазуту з 0 до 100 кг/т продуктивність печі збільшується з ~3930 до ~4055 т/добу і при збільшенні витрат мазуту до 200 кг/т збільшується до 5050 т/добу за рахунок збільшення інтенсивності плавки при збільшенні вмісту кисню в дутті до 27,3%. При змінній теоретичній температурі при витраті мазуту з 0 до 50 кг/т продуктивність незначно збільшується з 4045 до 4112 т/добу (за рахунок зменшення загальної вологи дуття з 24,6 до 6,7 г/м³) та при збільшенні витрат мазуту до 200 кг/т продуктивність зменшується з 4112 т/добу до ~3950 т/добу при атмосферних значеннях вмісту вологи (4 г/м³) та кисню в дутті (21%) (рис. 5).

При цьому витрата коксу при постійній / змінній теоретичній температурі при збільшенні витрат мазуту з 0 до 200 кг/т зменшується з ~532 / 525,5 до ~291 / 286,5 кг/т.

Аналітичним шляхом встановлено, що коефіцієнт заміни коксу мазутом становить 1,19-1,21 кг/кг.

Вихід ВЕР при постійній теоретичній температурі при витраті мазуту від 0 до 100 кг/т зменшується з 85 до 72 кг ум. пал./т та при збільшенні витрат мазуту до 200 кг/т вихід ВЕР збільшується з 72 до 99 кг ум. пал./т. При змінній теоретичній температурі при витраті мазуту від 0 до 50 кг/т вихід ВЕР зменшується з 72 до 66 кг ум. пал./т та при збільшенні витрат мазуту до 200 кг/т вихід ВЕР збільшується до 85 кг ум. пал./т.

При постійній / змінній теоретичній температурі прогнозний вихід CO₂ на тону чавуну з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю при збільшенні витрат мазуту до 200 кг/т зменшується з ~1640 / ~1555 до ~1375 / ~1370 кг/т, тобто на 16,2% / 11,9% відповідно.

Таким чином, збільшення витрати мазуту на кожні 10 кг/т дозволить зменшити викиди CO₂ з доменної печі на 0,81% / 0,6% при постійній / змінній теоретичній температурі відповідно, що еквівалентно зменшенню викидів CO₂ на 13,3 / 9,3 кг/т.

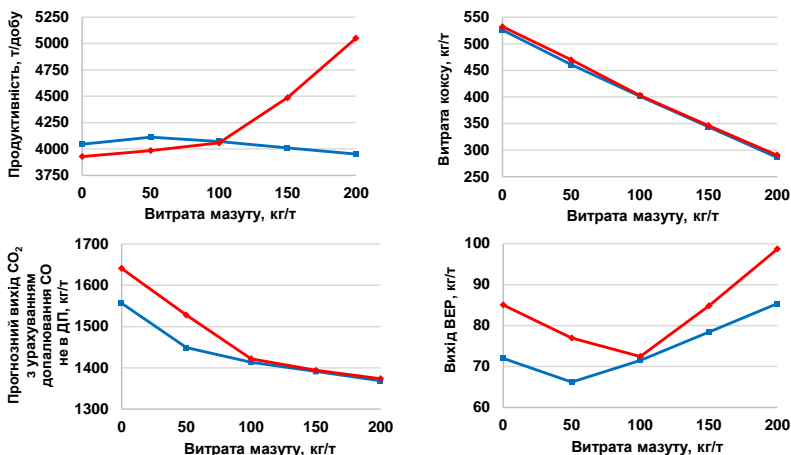


Рисунок 5 – Вплив витрати мазуту на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО до CO₂ поза доменною піччю за підтримки теоретичної температури горіння на постійному рівні (—■—) та змінної теоретичної температури (—▲—)

Вплив використання угарного газу на техніко-економічні показники та викиди CO₂ з доменної печі. При постійній теоретичній температурі при збільшенні витрат СО від 0 до 300 м³/т продуктивність збільшується з ~3930 до ~8315 т/добу. При змінній теоретичній температурі при збільшенні витрат СО від 0 до 200 м³/т продуктивність зменшується з ~4040 до 3780 т/добу та при збільшенні витрат СО до 300 м³/т продуктивність збільшується з 3780 т/добу до ~4860 т/добу (рис. 6).

Витрата коксу при збільшенні витрат СО від 0 до 300 м³/т зменшується з 532 / 526 кг/т до 394 / 376 кг/т при постійній / змінній теоретичній температурі.

Застосування СО в доменній печі дозволяє зменшити витрату коксу на 0,86% / 0,95% на кожні 10 м³/т угарного газу, що еквівалентно зменшенню витрат коксу на 0,46 кг/м³ / 0,5 кг/ м³ СО при постійній / змінній теоретичній температурі горіння. Таким чином, вперше аналітичним шляхом встановлено коефіцієнт заміни коксу угарним газом в доменній плавці – 0,46-0,5 кг/м³.

При постійній теоретичній температурі при збільшенні витрат СО від 0 до 100 м³/т вихід вторинних енергоресурсів зменшується з 85 кг ум. пал./т до 60 кг ум. пал./т, при збільшенні витрат СО від 100 до 300 м³/т вихід ВЕР збільшується з 60 кг ум. пал./т до 91 кг ум. пал./т. При змінній

теоретичній температурі при збільшенні витрат CO від 0 до 200 м³/т вихід ВЕР зменшується з 72 кг ум. пал./т до 54 кг ум. пал./т, при збільшенні витрат CO від 200 до 300 м³/т вихід ВЕР збільшується з 54 кг ум. пал./т до 69 кг ум. пал./т.

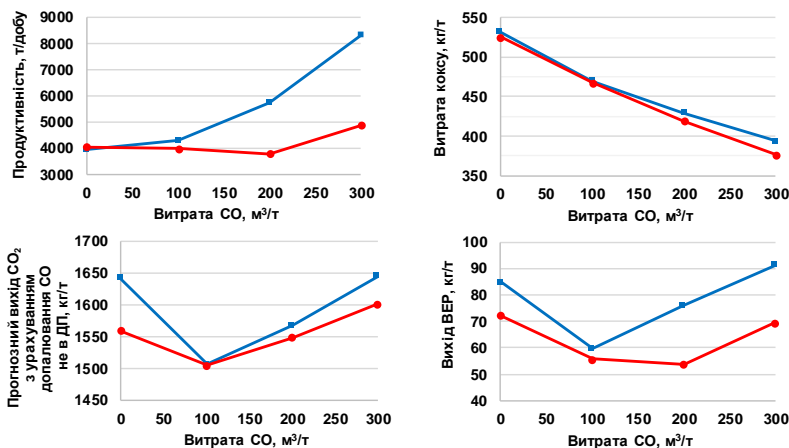


Рисунок 6 – Вплив витрати угарного газу (CO) на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання CO до CO₂ поза доменною піччю за підтримки теоретичної температури горіння на постійному рівні (—■—) та змінній теоретичній температурі (—●—)

При збільшенні витрат CO від 0 до 100 м³/т при постійній / змінній теоретичній температурі прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання CO поза ДП зменшується з 1641 / 1559 кг/т до 1506 / 1504 кг/т, при збільшенні витрат CO від 100 до 300 м³/т даний показник збільшується з 1506 / 1504 кг/т до 1645 / 1601 кг/т.

Таким чином, збільшення витрати CO на кожні 10 м³/т призводить до збільшення виходу CO₂ в доменній печі на 0,46% / 0,32%, при постійній / змінній теоретичній температурі відповідно, що еквівалентно збільшенню викидів CO₂ на 7,0 / 4,9 кг/т.

Вплив використання металодобавок на техніко-економічні показники та викиди CO₂ з доменної печі. Збільшення витрати металодобавки позитивно впливає на техніко-економічні показники доменної плавки – дозволяє збільшити продуктивність та зменшити витрату палива у доменній печі (рис. 7).

Збільшення витрати металодобавки в шихті від 0 до 500 кг/т призводить до збільшення продуктивності з ~4695 до ~8235 т/добу (0,81-1,71% на кожні 10 кг/т металодобавки) та зменшення витрати

коксу з ~353 до ~291 кг/т (0,46-0,28% на кожні 10 кг/т металодобавки).

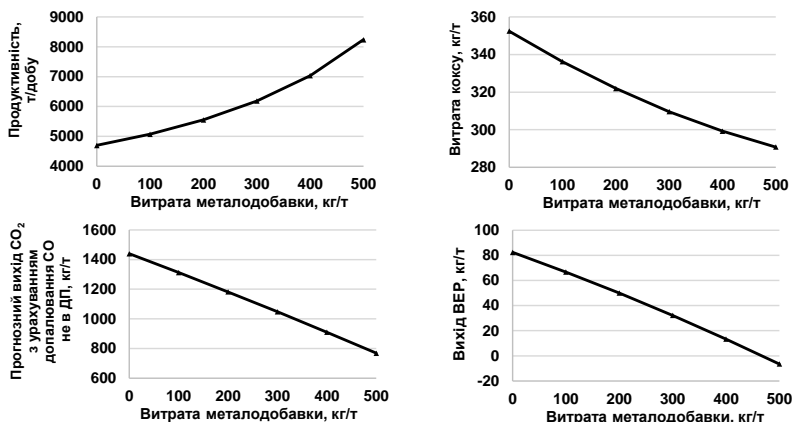


Рисунок 7 – Вплив витрати металодобавки на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО до CO₂ поза доменною піччю

При збільшенні витрати металодобавки в діапазоні від 0 до 500 кг/т продуктивність та витрата коксу змінюються неоднаково. У діапазоні витрати металодобавки від 0 до 100 кг/т спостерігається найменше збільшення виробництва та найбільше зменшення витрати коксу на кожні 10 кг/т металодобавки (+0,81 та -0,46% відповідно), і навпаки, при витраті металодобавки від 400 до 500 кг/т приріст продуктивності максимальний, приріст зменшення витрати коксу – мінімальний (+1,7% та -0,28% відповідно зі збільшенням витрати на кожні 10 кг/т металодобавки).

Ефект від зменшення витрати коксу узгоджується з літературними даними – кожні 10 кг/т металодобавки зменшують витрату коксу на 0,3%. У цьому має місце відмінність з приросту продуктивності: за літературними даними зростання продуктивності менше отриманої – 0,5%, що може бути пов'язані з прийнятими обмеженнями з витрат заліза на 1 т чавуну – 975 кг/т.

Вихід вторинних енергоресурсів зі збільшенням витрати металодобавки з 0 до 500 кг/т зменшується з 82 до -6 кг ум.пал./т (на 1,55-2,0 кг ум.пал. на кожні 10 кг/т металодобавки). Негативна величина ВЕР при витраті металодобавки понад 450 кг/т показує на необхідність використання сторонніх енергоресурсів для заміщення недостатнього доменного газу в інших переділах і для підігріву, стиснення та збагачення киснем дуття (а отже, і додаткові викиди CO₂).

Збільшення витрати металодобавки з 0 до 500 кг/т дозволяє

зменшити прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання поза доменною піччю з ~ 1440 до ~ 770 кг/т, в основному за рахунок зменшення витрати коксу, а, відповідно, і вуглецю, що надходить з ним в плавку.

Таким чином встановлено, що збільшення витрати металодобавки на кожні ~ 10 кг/т при постійних питомих витратах ПВП та природного газу дозволяє зменшити вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю на $\sim 0,90-1,55\%$.

Вплив зміни ступеня використання CO на техніко-економічні показники та викиди CO_2 з доменної печі. Збільшення ступеня використання CO позитивно впливає на техніко-економічні показники доменної плавки. При зміні η_{CO} в межах від 20 до 50% техніко-економічні показники змінюються наступним чином: збільшується продуктивність з ~ 2945 до ~ 4940 т/добу (на $\sim 1,0-3,75\%$ або $\sim 46-111$ т/добу на кожний 1% η_{CO}); зменшується витрата коксу з ~ 726 до ~ 321 кг/т (на $\sim 1,7-4,4\%$ або $\sim 6-32$ кг/т на кожен 1% η_{CO}) (рис. 8).

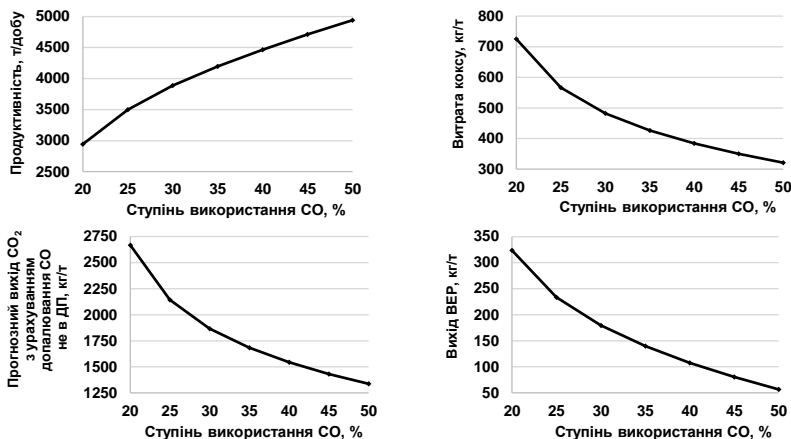


Рисунок 8 – Вплив ступеню використання CO на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO до CO_2 поза доменною піччю

Залежність прогнозного виходу CO_2 та виходу вторинних енергоресурсів від ступеня використання CO (як і для техніко-економічних та теплоенергетичних показників) нелінійна. Зі збільшенням ступеня використання CO ефект від збільшення знижується – наприклад, зі збільшенням ступеня використання CO з 20 до 30% викиди CO_2 зменшуються на ~ 800 кг/т, зі збільшенням ступеня використання CO з 40 до 50% викиди CO_2 зменшуються на ~ 210 кг/т.

Збільшення ступеня використання СО позитивно впливає на прогнозний вихід CO_2 на тонну чавуну з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю. У разі збільшення ступеня використання з 20 до 50% очікується зменшення емісії діоксиду вуглецю на ~ 1335 кг/т (з ~ 2670 до ~ 1335 кг/т), тобто на $\sim 1,3\%$ - $3,9\%$ (~ 19 - 105 кг/т) зі збільшенням η_{CO} на кожен 1%. Причому при зміні ступеня використання СО в межах 40-50% кожен 1% збільшення η_{CO} дозволяє зменшити викиди CO_2 з печі на $\sim 1,35\%$ (на ~ 21 кг/т).

Вплив використання ступеня використання H_2 на техніко-економічні показники та викиди CO_2 з доменної печі. Збільшення ступеня використання H_2 з 20 до 70% дозволяє збільшити виробництво чавуну з ~ 4495 т/добу до ~ 4915 т/добу, зменшити витрату коксу з ~ 380 до ~ 324 кг/т (рис. 9).

Таким чином, збільшення ступеня використання H_2 на кожен 1% призводить до збільшення продуктивності печі на ~ 8 - 9 т/добу та зменшення витрати коксу на $\sim 0,35\%$.

Встановлено, що збільшення ступеня використання H_2 з 20 до 70% призводить до зменшення виходу ВЕР з 103 до 61 кг ум. пал./т (на $\sim 0,82\%$ або $\sim 0,84$ кг ум. пал./т на кожен 1% η_{H_2}).

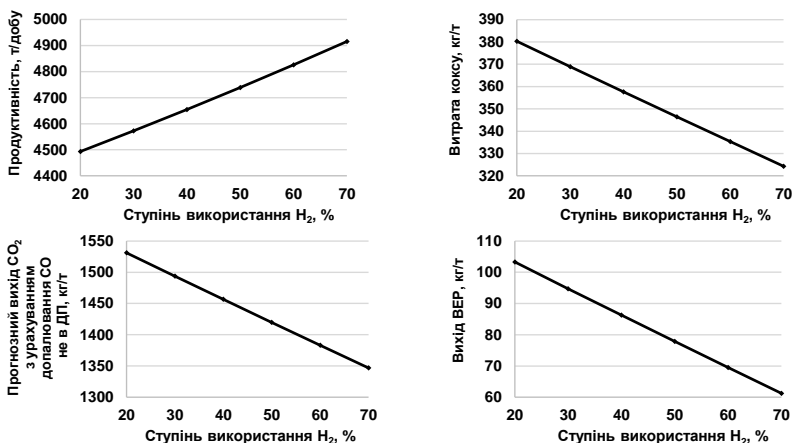


Рисунок 9 – Вплив ступеню використання H_2 на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання СО до CO_2 поза доменною піччю

Збільшення ступеня використання H_2 позитивно впливає на прогнозний вихід CO_2 на тонну чавуну з урахуванням допалювання СО поза доменною піччю – при збільшенні ступеня використання H_2 з 20 до 70% очікується зменшення емісії діоксиду вуглецю на ~ 185 кг/т (з ~ 1530

до ~1345 кг/т).

Таким чином, встановлено, що збільшення ступеня використання H_2 на кожен 1% призводить до зменшення виходу CO_2 з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю на ~0,25% (~3,7 кг/т).

Вплив зміни теплових втрат на техніко-економічні показники та викиди CO_2 з доменної печі. Збільшення теплових втрат негативно впливає на техніко-економічні показники доменної плавки – призводить до зменшення продуктивності та збільшення витрати палива. Збільшення теплових втрат із 5 до 60 МВт призводить до зменшення продуктивності з ~4800 т/добу до ~4050 т/добу (на ~13,6 т/добу / 0,3% на кожен 1 МВт теплових втрат) та збільшення витрати коксу на 42,5 кг/т (на ~0,8 кг/т на кожен 1 МВт теплових втрат – витрата коксу збільшується з 347 до 389 кг/т) (рис. 10).

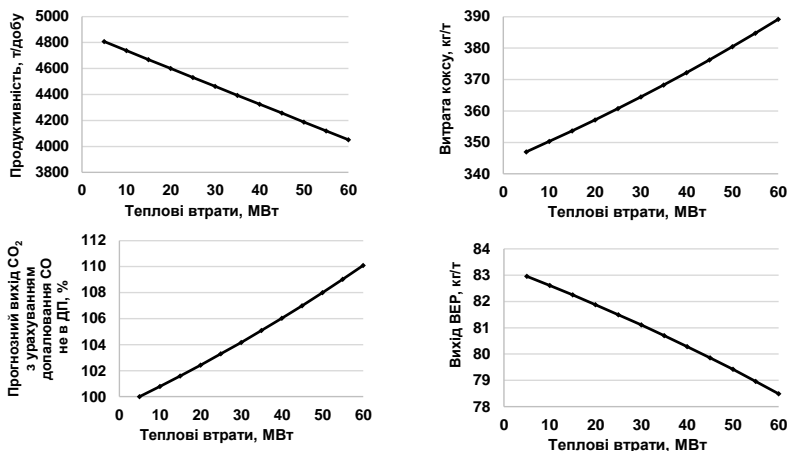


Рисунок 10 – Вплив теплових втрат на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO_2 з урахуванням допалювання CO до CO_2 поза доменною піччю

При збільшенні теплових втрат з 5 до 60 МВт очікується зменшення виходу вторинних енергоресурсів на ~4,5 кг ум. пал./т (з 83 до 78,5 кг ум. пал./т).

Збільшення теплових втрат негативно впливає на прогнозний вихід CO_2 на тону чавуну з урахуванням допалювання CO поза доменною піччю. У разі збільшення теплових втрат із 5 до 60 МВт очікується збільшення емісії діоксиду вуглецю на ~145 кг/т (з ~1420 до ~1565 кг/т), тобто на ~0,16-0,20% (на ~2,2-3,0 кг/т) зі збільшенням теплових втрат на кожен 1 МВт при збереженні інших параметрів постійному рівні.

Вплив зміни температури дуття на техніко-економічні показники та викиди CO₂ з доменної печі. Збільшення температури дуття призводить до надходження додаткового тепла в доменну піч, що позначається на збільшенні продуктивності печі та зменшенні витрати палива в доменній печі, а саме на кожні 100°C збільшення температури дуття дозволяє збільшити продуктивність на ~180 т/добу та зменшити витрату коксу на ~9,9 кг/т (рис. 11).

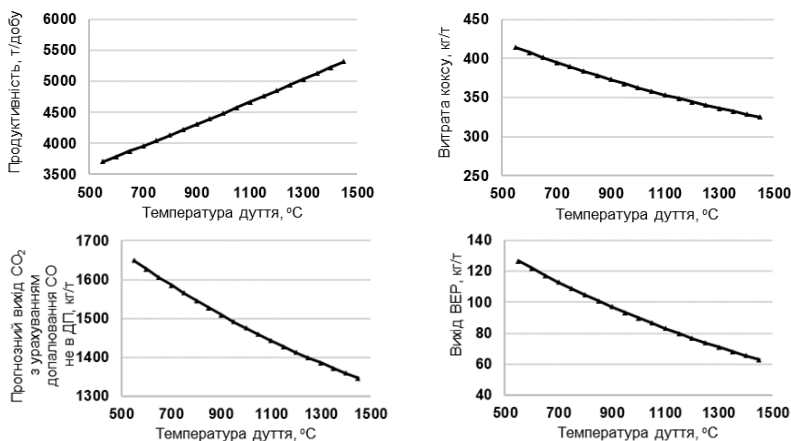


Рисунок 11 – Вплив температури дуття на продуктивність печі, витрату коксу, вихід вторинних енергетичних ресурсів та прогнозний вихід CO₂ з урахуванням допалювання СО до CO₂ поза доменною піччю

Отримані результати щодо покращення техніко-економічних показників узгоджуються з літературними даними, що базуються на практиці роботи доменних печей [18].

Встановлено, що зі збільшенням температури дуття на кожні 100°C очікується зменшення виходу вторинних енергоресурсів на 5,4% (на 7,1 кг ум. пал./т).

Збільшення температури дуття позитивно позначається на прогнозованому виході CO₂ на тону чавуну з врахуванням допалювання СО поза доменною піччю. Це значною мірою пов'язано зі зменшенням спалювання палива в доменній печі шляхом підведення додаткової фізичної енергії з дуттям.

Збільшення температури дуття на кожні 100°C дозволяє зменшити емісію діоксиду вуглецю на ~2%, що еквівалентно зменшенню викидів CO₂ на ~33 кг/т при збереженні інших параметрів роботи печі на постійному рівні.

Таким чином, інвестиції в забезпечення нагріву дуття дозволяють

забезпечити не тільки покращення техніко-економічних показників, а й забезпечити зменшення емісії діоксиду вуглецю з доменної печі.

Спільне застосування водневмісних паливних добавок з ПВП та мазутом. 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.

Також розглянуто спільне вдування водневмісних паливних добавок та мазуту в горно доменної печі. Тенденція зменшення викидів CO_2 така ж сама, як і при застосуванні тільки водневмісної добавки.

В результаті дослідження 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 ступеня прямого відновлення близького до 0% [19-24] (табл. 1).

Таблиця 1 – Витрата палива, при якій все залізо в печі відновлюється непрямым шляхом

Параметр	Витрата ПВП/мазуту, кг/т	Витрата водневмісної паливної добавки, м ³ /т
ПВП+ПГ	200-250	193-180
ПВП+КГ	200-250	300
ПВП+H ₂	200-250	485-450
мазут+ПГ	100-200	190-130
мазут+КГ	100-200	300-230
мазут+H ₂	100-200	480-320

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 [25-28].

Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування різних паливних добавок (природного та

коковского газу) на викиди діоксиду вуглецю, вихід ВЕР та витрату коксу (табл. 2).

Показано, що водень та водневмісні добавки дозволяють більшою мірою забезпечити зменшення викидів CO₂ та збільшити вихід вторинних енергоресурсів у порівнянні з ПВП та мазутом. При цьому ПВП та мазут може забезпечити найбільше зменшення витрати коксу. Використання угарного газу призводить до збільшення викидів CO₂, але дозволяє зменшити витрати коксу та можливість утилізувати CO, при застосуванні технології відмитого від CO₂ будь-якого технологічного газу (колошниковий, конверторний газ тощо).

Таблиця 2 – 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 газ 500 м ³ /т	Мазут 200 кг/т	Угарний газ 300 м ³ /т
Викиди CO ₂	-11% (-0,44%) *	-15% (-0,75%)	-15% (-0,5%)	-30% (-0,6%)	-16% (-0,8%)	+9% (+0,46%)
Вихід ВЕР	-10% (-0,4%)	+74% (+3,7%)	+60% (+2%)	+81% (+1,62%)	+29% (+1,92%)	+7% (+0,24%)
Витрата коксу	-45% (-1,8%)	-35% (-1,75%)	-28% (-0,93%)	-25% (-0,5%)	-45% (-2,3%)	-28,5% (-0,95%)

*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).

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. 3).

Найбільш суттєве зменшення викидів CO₂ 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 H₂ 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

CO₂ (на 1,82%), витрати коксу (на 0,49%) та вторинних енергетичних ресурсів (на 7,6%) надає підвищення температури дуття на кожні 100°C.

Таблиця 3 – 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 витрату 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.

Теплові втрати надають відносно незначний вплив на зменшення викидів CO₂ (до 2,3%), споживання коксу (до 0,6%) та виходу ВЕР (до 0,4%) зі зменшенням теплових втрат в системі охолодження на 15 МВт.

Таким чином, запровадження технологічних заходів щодо підвищення температури дуття, зниження теплових втрат та покращення газодинамічної роботи дозволить зменшити викиди CO₂ на ~20% і більше, без використання водневих технологій в доменній печі.

Висновки

1. Встановлено граничні значення ефективності використання технологій вдування паливних добавок в горн доменної печі на викиди CO₂: при використанні ПВП – зменшення викидів вуглекислого газу до 11%, природного та коксового газу – до 15%, водню – до 30%, мазуту – до 16%, збільшення викидів CO₂ до 9% при застосуванні угарного газу.

2. Встановлено граничні значення зменшення викидів CO₂ 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 H₂ (до 13,2% та 7,2% відповідно).

3. Визначено коефіцієнти заміни коксу воднем та коксовим газом.

Для водню він складає – 0,22-0,25 кг/м³, для коксового газу 0,46-0,49 кг/м³.

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 м³/т.

При цьому очікується скорочення викидів CO₂ до 18%.

- при витраті ПВП ~200-250 кг/т та коксового газу ~300 м³/т. При цьому очікується скорочення викидів CO₂ до 18%.

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

- при витраті мазуту 100-200 кг/т та природного газу – 190-130 м³/т.

При цьому очікується скорочення викидів CO₂ до 12%.

- при витраті мазуту 100-200 кг/т та коксового газу – 300-230 м³/т.

При цьому очікується скорочення викидів CO₂ до 11%.

- при витраті мазуту 100-200 кг/т та водню – 190-130 м³/т. При цьому очікується скорочення викидів CO₂ до 25%.

5. Використання гарячого агломерату може бути перспективним технологічним прийомом, що забезпечить збільшення витрати водню в доменній печі.

6. Запровадження технологічних заходів щодо підвищення температури дуття, зниження теплових втрат та покращення газодинамічної роботи дозволить зменшити викиди CO₂ на ~20% і більше, без використання водневих технологій в доменній печі.

7. 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

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

4. 26-я сессия конференции ООН по изменению климата. Глазго. 2021. URL: <http://surl.li/zpltda>

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. DOI: <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. Сохацький, 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

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., Сущев С. П. *Домна в энергетическом измерении.* Днепродзержинск : ДГДУ, 2006. 542 с.

16. Nathan Barrett, Subhasish Mitra, Hamid Doostmohammadi, Damien O’dea, Paul Zulli, Sheng Chew, Tom Honeyands. Assessment of Blast Furnace Operational Constraints in the Presence of Hydrogen Injection. *ISIJ International.* 2022, Vol. 62 Iss. 6, P. 1168-1177.

17. Martino Guilherme, Marchal Emmanuel. The environmental impacts of hydrogen injection in a blast furnace. *Консалтинговая фирма, Бразилия.* October 07, 2021. <https://www.cassotis.com/insights/environmental-impacts-hydrogen-blast-furnace>. (дата звернення: 26.10.2023).

18. Металлургия чугуна: Учебник для вузов. 3-е изд. перераб. и доп. / Под ред. Ю.С.Юсфина. М. : ИКЦ «Академкнига», 2004, 774 с.

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

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

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

22. 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.

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

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

25. 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.

26. 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.

27. Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Москалина А. О., Меркулов О. С., 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: 10.52150/2522-9117-2022-36-49-66.

28. Prospects for the Use of Hydrogen and Hyd rogen-Containing Additives to Reduce CO₂ Emissions and to Improve the Performance of Blast Furnace Smelting. Chaika O., Kornilov B., Myravyova I., Moskalyna A., Lebid V., Ivancha M. (2024). *Science and Innovation*, 20(5), 35–52. <https://doi.org/10.15407/scine20.05.035>

References

1. Chaika, O. L., Kornilov, B. V., Merkulov, O. Ie., Moskalyna, A. O., Lebid, V. V., & Iziumskiy, M. M. (2022). Analiz tendentsii rozvytku uivlen ta tekhnologii, spriamovanykh na zmeshennia 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). https://unfccc.int/sites/default/files/russian_paris_agreement.pdf

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

4. 26th session of the United Nations Climate Change Conference. Glasgow. (2021). <http://surl.li/zplta>

5. Buergler, T., & Kofler, I. (2017). Direct Reduction Technology as a Flexible Tool to Reduce CO₂ Intensity of Iron and Steelmaking. *Berg Huetttenmaenn 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]. *Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information "Ferrous Metallurgy"*, 2, 3-11 [in Russian]

7. Borodulyn, A. V., Chaika, A. L., Sokhatskyi, A. A., & Moskalyna, A. A. (2017). *Metodyka rascheta. Polnyi enerhetycheskyi balans domennoi plavky* [Method of calculation 'Full energy balance of blast furnace smelting'] (A. s. No. 73905 Ukraine). Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine.

https://ukrpatent.org/atachs/Avt_Pravo_%E2%84%9646_2017.pdf

8. Szargyt, J., Morris, D. R., & Steward, F. R. (1988). *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes*. New York, Toronto.

9. Stepanov, V. S., & Stepanova, T. B. (1990). O metodakh rascheta kumulativnykh zatrat energii i eksergii 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.

11. Stepanov, V. S., & Stepanova, T. B. (1994). *Effektivnost ispolzovaniya energii* [Efficiency of use energy]. Novosibirsk: Nauka [in Russian]

12. Stepanov, V. S. (1984). *Analiz energeticheskogo sovershenstva tehnologicheskikh processov* [Analysis of the energy perfection of technological processes]. Novosibirsk: Nauka [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, No. 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, No. 2, 180-214 [in Russian]

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

16. Barrett, N., Mitra, S., Doostmohammadi, H., O'dea, D., Zulli, P., Chew, S., Honeyands, T. (2022). Assessment of Blast Furnace Operational Constraints in the Presence of Hydrogen Injection. *ISIJ International*, 62(6), 1168-1177.

17. Martino Guilherme, Marchal Emmanuel (2021, October 7). *The environmental impacts of hydrogen injection in a blast furnace*. Cassotis Consulting. <https://www.cassotis.com/insights/environmental-impacts-hydrogen-blast-furnace>

18. Vegman, E. F., Zherebin, B. N., Pohvisnev, A. N. et al. (2004). *Metallurgiya chuguna* [Metallurgy of cast iron] [3rd ed., revised.]. Moskva: Akademkniga [in Russian]

19. Gotlib, A. D. (1958). *Domennyiy protsess* [Blast furnace process]. Moskva: Metallurgiya [in Russian]

20. Ramm, A. N. (1980). *Sovremennyiy domennyiy protsess* [Modern blast furnace process]. Moskva: Metallurgiya [in Russian]

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

22. 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"* (pp. 9-57). Dnepropetrovsk. [in Russian]

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

24. 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]

25. 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>

26. Chaika, O., Kornilov, B., Alter, M., Lebid, V., Izumskyi, 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.

27. Chaika, O. L., Kornilov, B. V., Moskalyna, A. O., Merkulov, O.Ie., Lebid, V.V., & Iziumskyi, M.M. (2022). 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]. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 36, 49-66. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-36-49-66>

28. Chaika, O., Kornilov, B., Myravyova, I., Moskalyna, A., Lebid, V., Ivancha, M. (2024). Prospects for the use of hydrogen and hydrogen-containing additives to reduce CO₂ emissions and to improve the performance of blast furnace smelting. *Science and Innovation*, 20(5), 35-52. <https://doi.org/10.15407/scine20.05.035>

O. L. Chaika¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, Head of the Laboratory of Heat and energy saving technologies, ORCID 0000-0003-1678-2580

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

I. H. Muravyova¹, D. Sc. (Tech.), Leading Researcher, ORCID 0000-0001-5926-7787

L. I. Harmash¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-6873-6685

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

V. V. Lebid¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher

M. M. Izumskyi¹, Ph. D. (Tech.), Junior Researcher, ORCID 0000-0002-5164-4450

M. H. Dzhyhota¹, Leading Engineer, ORCID 0000-0003-3062-5127

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

ANALYSIS OF EXISTING AND PROSPECTIVE BLAST FURNACE SMELTING TECHNOLOGIES PROVIDING REDUCTION OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS FOR CURRENT AND PROSPECTIVE CONDITIONS OF PIG IRON PRODUCTION IN UKRAINE

Abstract. The article discusses the results of heat and power and exergy calculations of the possibilities of new and existing technologies for reducing carbon dioxide emissions and coke consumption, increasing pig iron production by injecting various fuel additives into the furnace – pulverised coal, hydrogen, fuel oil, natural gas, coke oven and carbon monoxide, 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 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 with a wide range of changes in the consumption of fuel additives and their combinations, the use of metal additives and changes in the technological parameters of the blast furnace. 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 influence of low-cost measures to increase blast temperature, use 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 melting is considered. The limit values for the injection of various fuel additives into a blast furnace 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 top gas. 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, decarbonisation, natural gas, coke oven gas, coke consumption.

For citation: Chaika, O. L., Kornilov, B. V., Muravyova, I. H., Harmash, L. I., Moskalyna, A. O., Lebid, V. V., Izumskyi, M. M., Dzhyhota, M. H. (2024). Analysis of existing and prospective blast furnace smelting technologies providing reduction of carbon dioxide emissions for current and prospective conditions of pig iron production in Ukraine. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 120-145. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-120-145>

Стаття надійшла до редакції збірника 01.10.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 15.10.2024 р.)