

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.3

УДК 669.162.2:620.9

Кухар В.В.¹, доктор технічних наук, професор ORCID: 0000-0002-4863-7233,
email: kvv.mariupol@gmail.com

Тимошенко Д.О.¹, здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти,
ORCID: 0009-0001-2477-3310, e-mail: daniil.tymoshenko@mipolytech.education

Кононюк Д.В.², головний електрик, напрямок інжинірингу та будівництва,
e-mail: d.v.kononyuk@metinvestholding.com

Малій Х.В.¹, кандидат технічних наук, доцент ORCID: 0000-0002-9046-4268,
e-mail: kristina.maliy@mipolytech.education

Навольнєв І.Ю.¹, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої,
email: igor.navolniev@ukr.net

¹ТОВ “Технічний університет “Метінвест Політехніка”, м. Запоріжжя

²ТОВ “Метінвест Січ Сталь”, м. Дніпро

Kukhar Volodymyr¹, Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Metallurgy and Production Organization

Tymoshenko Daniil¹, Master's degree student,

Kononyuk Denys², Chief Electrician, Engineering and Construction Division

Malii Khrystyna¹, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Metallurgy and Production Organization

Navolniev Ihor¹, Postgraduate Student of the Department of Metallurgy and Production Organization

¹LLC "Technical University "Metinvest Polytechnic", Zaporizhzhia

²LLC "Metinvest Sich Stal", Dnipro

ДОМЕННІ ПЕЧІ В ЕПОХУ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ: ПОШУК АЛЬТЕРНАТИВ КОКСУ

Метою роботи є аналіз перспектив використання водню як альтернативи коксу в доменних печах в умовах декарбонізації сталеливарної промисловості, зокрема з урахуванням введення механізму вуглецевого коригування імпорту (СВАМ). Показано, що поширена уява про повну заміну коксу воднем потребує уточнення, оскільки існують технологічні обмеження та економічні виклики. Згідно з результатами аналізу світового досвіду, використання водню в доменних печах дозволяє знизити викиди CO₂ на 10–70 %, що є особливо актуальним в контексті СВАМ, але потребує значних капіталовкладень в модернізацію виробництва та створення інфраструктури для виробництва і транспортування водню. Показано, що ефективність використання водню, а отже і його потенціал для зниження витрат на вуглецеві квоти в рамках СВАМ, залежить від технології його отримання, способу вдування в доменну піч та умов доменної плавки.

Ключові слова: доменні печі; декарбонізація; альтернатива коксу; водень; викиди CO₂; модернізація.

The aim of this work is to analyze the prospects of using hydrogen as an alternative to coke in blast furnaces in the context of decarbonizing the steel industry. It is shown that the widespread notion of a complete replacement of coke with hydrogen needs clarification, as there are technological limitations and economic challenges. According to the analysis of global experience, the use of hydrogen in blast furnaces allows to reduce CO₂ emissions by 10–70 %, but requires significant capital investments in the modernization of production and the creation of infrastructure for the production and transportation of hydrogen. It is shown that the efficiency of hydrogen use depends on the technology of its production, the method of injection into the blast furnace, and the conditions of the blast furnace smelting.

Keywords: blast furnaces; decarbonization; coke alternative; hydrogen; CO₂ emissions; modernization.

Постановка проблеми

Вітчизняна металургійна промисловість — невід’ємна частина світової галузі, і її розвиток відбувається в контексті глобальних тенденцій [1] ця промисловість є одним з найбільших джерел викидів вуглекислого газу (CO_2), що сприяє глобальному потеплінню. Доменні печі, які використовують кокс для відновлення заліза з руди, відповідальні за значну частину цих викидів. В умовах зростаючого тиску на декарбонізацію промисловості, посиленого введенням механізму вуглецевого коригування імпорту (СВАМ), пошук альтернатив коксу стає невідкладним завданням для сталеливарних підприємств, що експортують свою продукцію до Європейського Союзу.

Проблема полягає в тому, що повна заміна коксу в доменних печах [2] стикається з рядом технологічних, економічних та інфраструктурних викликів, які ускладнюють адаптацію до нових умов СВАМ:

1. Технологічні — існуючу альтернативу коксу — водень має свої обмеження за ефективністю, складністю впровадження, що може негативно вплинути на конкурентоспроможність продукції.

2. Економічні — використання альтернативних технологій потребує значних капіталовкладень в модернізацію виробництва та створення нової інфраструктури, що може суттєво збільшити собівартість сталі та знизити прибутковість підприємств.

3. Інфраструктурні — для масштабного застосування альтернатив коксу необхідна розвинена інфраструктура для їх виробництва та транспортування водню, яка на даний момент може бути недостатньо розвинутою.

Таким чином, пошук оптимальних альтернатив коксу для доменних печей в контексті СВАМ [3] є комплексною проблемою, яка вимагає ретельного аналізу різних факторів та розробки інноваційних рішень, спрямованих на забезпечення конкурентоспроможності сталеливарної промисловості в умовах декарбонізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Дискусійним до сьогодні залишається питання про оптимальну долю водню в дутті доменних печей. Раніше дослідження зосереджувались на обмеженні вмісту водню до 5—25 % через побоювання щодо негативного впливу на процес плавки. Проте, останні роботи [4] свідчать про можливість суттєвого збільшення його долі, аж до 50 % і більше [5], для досягнення значного зниження викидів CO_2 і наближення сталеливарної промисловості до вуглецевої нейтральності. При цьому важливо враховувати технологічні обмеження та економічні виклики, пов’язані з використанням високих концентрацій водню, і зосередитись на поступовому збільшенні його долі в дутті з одночасним вдосконаленням технології доменної плавки.

Аналіз останніх досліджень свідчить про значний прогрес у розробці технологій використання водню для декарбонізації доменного виробництва. Зокрема, дослідження демонструють, що впровадження водневих технологій дозволяє значно знизити викиди CO_2 за рахунок заміщення традиційного коксу [6]. Визначено, що використання водню у складі дуття доменної печі може знизити емісію CO_2 на 50 %, що підтверджується термодинамічними та експериментальними дослідженнями [7].

При цьому важливим аспектом є оптимізація процесу з урахуванням фізико-хімічних властивостей водню та його взаємодії з іншими компонентами шихти. Наприклад, дослідження [8] вказує на вплив концентрації водню на температуру плавлення та швидкість відновлення заліза, що є критично важливим для підтримання стабільності процесу. Крім того, роботи [9, 10] свідчать про необхідність ретельного вибору умов для підвищення ефективності водневої технології з точки зору витрат енергії [11].

Відповідно до останніх публікацій, впровадження водню потребує значних інвестицій у модернізацію доменних печей, включаючи зміну системи подачі та зберігання газу [12, 13]. Технологічні та економічні аспекти цього процесу вивчаються в рамках проектів, таких як ULCOS (Ultra-Low CO_2 Steelmaking), що спрямовані на розробку нових, маловуглецевих підходів до виробництва сталі [14, 15]. Згідно з даними з різних досліджень, використання водню дозволить досягти значних результатів у скороченні викидів CO_2 , однак для цього необхідна глибока інтеграція нових технологій з існуючими виробничими процесами [16—18].

Окрім цього, впровадження водневих технологій стикається з інфраструктурними викликами. Важливою проблемою є забезпечення сталого постачання водню та його транспортування до доменних печей. Для цього необхідна модернізація не тільки виробничих потужностей, але й розвиток інфраструктури зберігання та транспортування водню [19, 20].

Загалом, дослідження демонструють, що для успішного впровадження водню у доменному виробництві потрібен системний підхід, що враховує економічні, екологічні та технологічні аспекти. Це допоможе забезпечити відповідність виробничих процесів сучасним екологічним стандартам та підвищити конкурентоспроможність металургійної галузі України на міжнародному рівні [21].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи, викладеної нижче, є вирішення наступних задач:

- проаналізувати поточний стан викидів у аглодоменному процесі;
- проаналізувати потенціал водню як альтернативи коксу в доменних печах з точки зору зниження викидів CO_2 та впливу на техніко-економічні показники доменного процесу;
- з'ясувати, які технологічні обмеження існують для застосування водню в доменних печах та як їх можна подолати;
- визначити оптимальну долю водню в дутті доменних печей з урахуванням технологічних, економічних та екологічних факторів;
- оцінити вплив введення механізму вуглецевого коригування імпорту (СВАМ) на перспективи використання водню в доменних печах.

Виклад основного матеріалу

Дане дослідження спрямоване на обґрунтування необхідності та розробку шляхів реінжинірингу аглодоменного виробництва в Україні для переходу до "зеленої" сталі та забезпечення сталого розвитку галузі. Для досягнення цієї мети застосовано комплексний підхід, який включає в себе декілька взаємопов'язаних напрямків: детальний моніторинг та аналіз фактичних даних про викиди на ПАТ "Запоріжсталь" рис. 1.

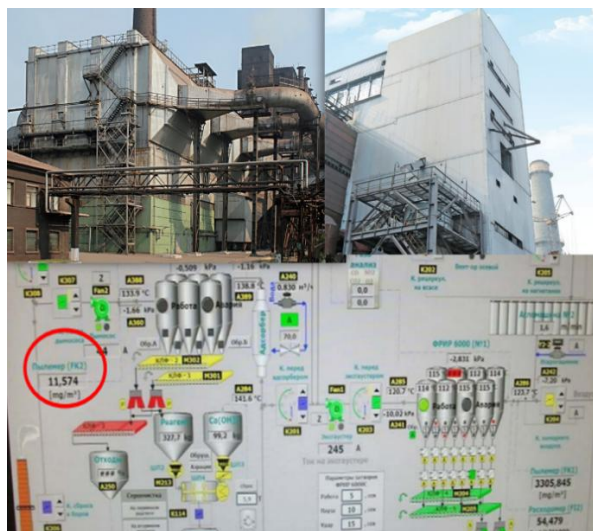


Рис. 1. АСУ система моніторингу викидів

Основою для аналізу та прийняття рішень щодо реінжинірингу є достовірна інформація про поточний стан викидів забруднюючих речовин. Для цього було проведено комплексний експеримент на діючому аглодоменному виробництві ПАТ "Запоріжсталь" з метою детального аналізу викидів та оцінки потенціалу їх зниження. Автоматизована система моніторингу - на підприємстві впроваджено сучасну автоматизовану систему моніторингу викидів, яка охоплює аглофабрику та доменну піч. Система включає в себе мережу високоточних датчиків (D-R 808

фірми Durag, рис. 2; Sintrol S304, рис. 3), які безперервно вимірюють концентрацію пилу, діоксиду сірки, оксидів азоту, монооксиду вуглецю та вуглекислого газу у відхідних газах.



Рис. 2. Прилад датчику Durag, що застосовується у аглодоменному переділі

Крім того, система контролює ключові технологічні параметри, такі як температура, розрідження та витрата газів, що дозволяє відстежувати динаміку процесів та виявляти потенційні відхилення від норми. Дані з датчиків обробляються спеціалізованим програмним забезпеченням, яке дозволяє візуалізувати дані в режимі реального часу, розраховувати валові викиди забруднюючих речовин та формувати звіти за різні періоди часу.



Рис. 3. Датчик Sintrol S304, що застосовується у доменному переділі

Додаткові вимірювання: Для підвищення точності контролю та отримання більш повної картини про викиди забруднюючих речовин проводяться додаткові вимірювання за допомогою переносних газоаналізаторів на різних точках газових трактів аглофабрики та доменної печі. Це дозволяє детально проаналізувати розподіл викидів на різних стадіях технологічного процесу та виявити "гарячі точки", які потребують першочергової уваги при модернізації виробництва.

Аналіз даних: Зібрані дані про викиди піддаються ретельному аналізу з метою виявлення тенденцій, сезонних коливань та кореляцій з технологічними параметрами. Це дозволяє глибше зрозуміти фактори, що впливають на рівень викидів, та розробити ефективні заходи для їх зниження, у табл. 1 наведені викиди в аглодоменному виробництві, які були зняті та обчислені завдяки системі моніторингу викидів, що показують скільки забруднюючих речовин виходить на виробництва 1 т. сталі.

Таблиця 1. Викиди в аглодоменному виробництві, кг/т

Процес	CO ₂	CO	Пил	SO ₂	NO _x
Аглодоменне виробництво					
Аглофабрика					
Процес спікання агломерату	300	15	30	40	10
Доменний процес					
Спалювання коксу	1650	30	20	20	5
Випуск чавуну та шлаку	55	10			
Колошниковий газ	50	10			

Дослідження шляхів реінжинірингу виробництва для переходу до "зеленої" сталі, виходячи з отриманих даних про викиди та аналізу передового досвіду в галузі, було проведено дослідження різних шляхів реінжинірингу виробництва для переходу до "зеленої" сталі. Основні напрямки реінжинірингу включають:

1. Модернізація агломераційного виробництва — вдосконалення технології агломерації шляхом оптимізації складу шихти, режимів спікання, впровадження сучасних систем газоочистки та утилізації тепла відхідних газів. Це дозволить знизити викиди пилу, CO, SO₂ та NO_x на аглофабриці [22]. Для доменного процесу є доцільним застосування водню при умові коли технологія стане більше безпечнішою та економічно доцільнішою для зниження викидів CO₂. На рис. 4 представлені перспективи аглодоменної промисловості при модернізації обладнання.

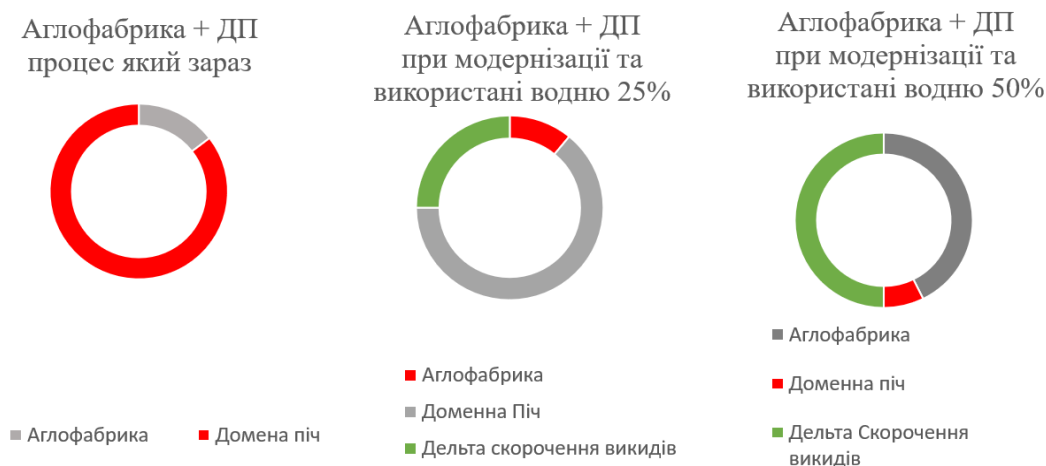


Рис. 4. Діаграма зниження CO₂ при модернізації аглофабрики та доменних печей (ДП)

2. Заміна коксу в доменному процесі: Одним з ключових напрямків декарбонізації є заміна коксу в доменному процесі альтернативними видами палива та відновників. В рамках дослідження було проаналізовано можливості використання водню як часткової або повної заміни коксу. Особлива увага приділяється водню, який в перспективі може забезпечити повну декарбонізацію доменного виробництва. Вдування водню в доменну піч, незважаючи на значний потенціал для декарбонізації, пов'язане з рядом технологічних викликів. По-перше, водень має нижчу щільність порівняно з коксом, що може призвести до зміни газодинаміки в печі та погіршення теплообміну. По-друге, висока дифузійна здатність водню може сприяти утворенню крихкого чавуну, що негативно впливає на його якість. По-третє, використання водню вимагає забезпечення підвищених вимог безпеки через його вибухонебезпечність.

Для подолання цих обмежень необхідні комплексні рішення, які включають модернізацію конструкції доменних печей, оптимізацію параметрів дуття (температури, тиску, складу), а також використання спеціальних добавок до шихти для регулювання властивостей чавуну. Важливу роль відіграють інтенсивні дослідження і розробки в цій області, спрямовані на подальше вдосконалення технології вдування водню та створення нових матеріалів і конструкцій для доменних печей.

3. Вдосконалення систем газоочистки доменної печі, для зниження викидів забруднюючих речовин з доменної печі необхідно впроваджувати сучасні системи газоочистки, такі як системи уловлювання та утилізації колошникового газу, а також системи каталітичного очищення газів для зниження викидів NO_x. Застосування статистичного аналізу та моделювання для оцінки ефективності рішень. Для глибшого розуміння впливу різних факторів на викиди забруднюючих речовин та оцінки ефективності різних природоохоронних заходів застосовуються методи статистичного аналізу та математичного моделювання. Введення механізму вуг-

лецевого коригування імпорту (СВАМ) в ЄС створює додаткові економічні стимули для декарбонізації металургійної промисловості, в тому числі для використання водню в доменних печах. СВАМ передбачає стягнення плати за імпорт продукції з високим вуглецевим слідом, що може суттєво вплинути на конкурентоспроможність української сталі на європейському ринку. Використання водню дозволяє знизити викиди CO₂ і, відповідно, зменшити витрати на вуглецеві квоти в рамках СВАМ. Це може стати важливим фактором, що стимулює впровадження водневих технологій в Україні. Однак, необхідно враховувати, що економічна ефективність використання водню залежить не тільки від СВАМ, а й від інших факторів, таких як вартість водню, капітальні витрати на модернізацію виробництва та державна підтримка розвитку водневої металургії.

Висновки

Проведений комплексний аналіз викидів на ПАТ "Запоріжсталь" дозволив детально оцінити екологічні аспекти аглодоменного виробництва. Встановлено, що основними джерелами викидів є спалювання коксу в доменній печі та процеси на аглофабриці. Показано, що традиційний аглодоменний процес характеризується високим рівнем викидів CO₂, CO, пилю, SO₂ та NO_x, що обумовлено використанням коксу як основного відновника в доменній печі та значною енергоємністю агломераційного виробництва. Виявлено кореляцію між рівнем викидів та технологічними параметрами, що дає змогу глибше зрозуміти фактори, які впливають на забруднення навколишнього середовища. Показано, що такі екологічні показники не відповідають сучасним стандартам, що вимагає реінжинірингу виробничих процесів з переходом до більш екологічно чистих технологій. Визначено, що використання водню в доменних печах є перспективним напрямом декарбонізації виробництва сталі, оскільки дозволяє суттєво знизити викиди CO₂. Однак, встановлено наявність технологічних обмежень, пов'язаних з впливом водню на процес плавки та якість отриманого чавуну. Доведено, що для подолання цих обмежень необхідно продовжити дослідження та розробки нових технологій. Введення механізму СВАМ створює додаткові економічні стимули для декарбонізації металургійної промисловості України та впровадження водневих технологій. Проведено оцінку економічної ефективності використання водню, яка залежить від вартості водню, капітальних витрат на модернізацію виробництва та рівня державної підтримки. Визначено, що для вибору оптимальної стратегії реінжинірингу необхідно враховувати не тільки економічні, але й технологічні та екологічні фактори. Отримані результати можуть стати основою для розробки ефективних заходів щодо модернізації металургійного виробництва в Україні та забезпечення його сталого розвитку в умовах сучасних екологічних викликів.

Список використаної літератури

1. Венгер В., Шумська С. Металургійна промисловість України: динаміка виробництва через призму зовнішніх факторів. *Економічне прогнозування*. 2021. №1. С. 7—31. DOI: 10.15407/eip2021.01.007.
2. Альтер М. А., Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Москалина А. О. Аналіз розвитку технологій задувки доменних печей в 20—21 століттях. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 26—49. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001459818>.
3. Chepeliev M. Possible Implications of the European Carbon Border Adjustment Mechanism for Ukraine and Other EU Trading Partners. *Energy Research Letters*. 2021. Vol. 2. № 1. P. 1—4. DOI: 10.46557/001c.21527.
4. Maurent F., Baniyasi M., Saxen H., Feiterna A., Hojda S. Impact of Hydrogenous Gas Injection on the Blast Furnace Process: A Numerical Investigation. *Metallurgical and Materials Transactions*. 2023. № 54. P. 2137—2158. DOI: 10.1007/s11663-023-02822-4.
5. Okosun T., Nielson S., Zhou C. Blast Furnace Hydrogen Injection: Investigating Impacts and Feasibility with Computational Fluid Dynamics. *JOM*. 2022. Vol. 74. P. 1521—1532. DOI: 10.1007/s11837-022-05177-4.

6. Moral G., Ortiz-Imedio R., Ortiz A., Gorri D., Ortiz I. Hydrogen Recovery from Coke Oven Gas: *Comparative Analysis of Technical Alternatives. Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022. Vol. 61. № 18. P. 6106—6124. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04668.
7. Tang J., Chu M.-s., Li F., Feng C., Liu Z.-g., Zhou Y.-s. Development and progress on hydrogen metallurgy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020. Vol. 27. P. 713—723. DOI: 10.1007/s12613-020-2021-9.
8. Mauret F., Baniyadi M., Saxén H., Feiterna A., Hojda S. Impact of Hydrogenous Gas Injection on the Blast Furnace Process: A Numerical Investigation. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2023. Vol. 54. P. 2137—2158. DOI: 10.1007/s11663-023-02724-3.
9. Lan C., Hao Y., Shao J., Zhang S., Liu R., Lyu Q. Effect of H₂ on Blast Furnace Ironmaking: A Review. *Metals*. 2022. Vol. 12. P. 1864. DOI: 10.3390/met12111864.
10. Shatokha V. Modeling of the effect of hydrogen injection on blast furnace operation and carbon dioxide emissions. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2022. Vol. 29. № 10. P. 1851—1861. DOI: 10.1007/s12613-022-2474-8.
11. Beschkov V., Ganev E. Perspectives on the Development of Technologies for Hydrogen as a Carrier of Sustainable Energy. *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 6108. DOI: 10.3390/en16176108.
12. Goldasz A., Matuszewska D., Olczak P. Technical, economic, and environmental analyses of the modernization of a chamber furnace operating on natural gas or hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. № 27. P. 13213—13225. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.090.
13. Neacsu A., Eparu C.N., Stoica D.B. Hydrogen–Natural Gas Blending in Distribution Systems—An Energy, Economic, and Environmental Assessment. *Energies*. 2022. Vol. 15. № 17. P. 6143. DOI: 10.3390/en15176143.
14. Yan J. Progress and Future of Breakthrough Low-carbon Steelmaking Technology (ULCOS) of EU. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*. 2018. Vol. 3. № 2. P. 15—22. DOI: 10.11648/j.ijmpem.20180302.11.
15. Meijer K., Denys M., Lasar J., Birat J.-P., Still G., Overmaat B. ULCOS: Ultra-low CO₂ steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*. 2009. Vol. 36. № 4. P. 249—251. DOI: 10.1179/174328109X439298.
16. Ishaq H., Dincer I., Crawford C. A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. № 62. P. 26238—26264. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.149.
17. Ahmed S. F., Mofijur M., Nuzhat S., Rafa N., Musharrat A., Lam S. S., Boretti A. Sustainable hydrogen production: *Technological advancements and economic analysis. International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Vol. 47. № 88. P. 37227—37255. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.029.
18. Zou C., Li J., Zhang X., Jin X., Xiong B., Yu H., Liu X., Wang S., Li Y., Zhang L., Miao S., Zheng D., Zhou H., Song J. Industrial status, technological progress, challenges, and prospects of hydrogen energy. *Natural Gas Industry B*. 2022. Vol. 9. № 5. P. 427—447. DOI: 10.1016/j.ngib.2022.04.006.
19. Rampai M. M., Mtshali C. B., Seroka N. S., Khotseng L. Hydrogen production, storage, and transportation: recent advances. *Royal Society of Chemistry Advances*. 2024. Vol. 14. P. 6699-6718. DOI: 10.1039/D3RA08305E.
20. Włodarczyk R., Kaleja P. Modern Hydrogen Technologies in the Face of Climate Change—Analysis of Strategy and Development in Polish Conditions. *Sustainability*. 2023. Vol. 15. P. 12891. DOI: 10.3390/su151712891.
21. Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichuk A., Salmon N., Soldak M. Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production*. 2024. Vol. 466. P. 142675. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142675.
22. Тимошенко Д. О., Кухар В. В., Воловненко І. В. Порівняння енергоспоживання при виробництві сталі застарілими аглодоменим та мартенівським переділами із сучасною технологією прямого відновлення заліза Midrex H₂ та виплавою в дуговій сталеплавильній печі. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2024. № 2. С. 49—54. DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-8>.

BLAST FURNACES IN THE AGE OF DECARBONIZATION: THE SEARCH FOR COKE ALTERNATIVES

Abstract

The aim of this work is to analyze the prospects of using hydrogen as an alternative to coke in blast furnaces in the context of decarbonizing the steel industry, particularly considering the introduction of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). It is shown that the widespread notion of a complete replacement of coke with hydrogen needs clarification, as there are technological limitations and economic challenges. According to the analysis of global experience, the use of hydrogen in blast furnaces allows for a reduction of CO₂ emissions by 10–70 %, which is particularly relevant in the context of CBAM, but requires significant capital investments in the modernization of production and the creation of infrastructure for the production and transportation of hydrogen. It is shown that the efficiency of hydrogen use, and therefore its potential for reducing the cost of carbon quotas within the CBAM framework, depends on the technology of its production, the method of injection into the blast furnace, and the conditions of blast furnace smelting.

References

- [1] Venger V., Shumska S. (2021). Metalurhiina promyslovist Ukrainy: dynamika vyrobnytstva cherez pryzmu zovnishnikh faktoriv [Metallurgical Industry of Ukraine: Production Dynamics through the Prism of External Factors]. *Ekonomichne prohnozuvannia*, 1, 7–31. DOI: 10.15407/eip2021.01.007 [in Ukrainian].
- [2] Alter M. A., Chaika O. L., Kornilov B. V., Moskalyina A. O. (2023). Analiz rozvytku tekhnolohii zaduvky domennykh pechei v 20-21 stolittiyakh [Analysis of the Development of Blast Furnace Technologies in the 20-21st Centuries]. *Fundamentalni ta prykladni problemy chornoj metalurhii*, 37, 26-49. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001459818> [in Ukrainian].
- [3] Chepeliev M. (2021). Possible Implications of the European Carbon Border Adjustment Mechanism for Ukraine and Other EU Trading Partners. *Energy Research Letters*, 2(1), 1–4. DOI: 10.46557/001c.21527.
- [4] Maurent F., Baniyadi M., Saxen H., Feiterna A., Hojda S. (2023). Impact of Hydrogenous Gas Injection on the Blast Furnace Process: A Numerical Investigation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 54, 2137–2158. DOI: 10.1007/s11663-023-02822-4.
- [5] Okosun T., Nielson S., Zhou C. (2022). Blast Furnace Hydrogen Injection: Investigating Impacts and Feasibility with Computational Fluid Dynamics. *JOM*, 74, 1521–1532. DOI: 10.1007/s11837-022-05177-4.
- [6] Moral G., Ortiz-Imedio R., Ortiz A., Gorri D., Ortiz I. (2022). Hydrogen Recovery from Coke Oven Gas: Comparative Analysis of Technical Alternatives. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(18), 6106-6124. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c04668.
- [7] Tang J., Chu M.-s., Li F., Feng C., Liu Z.-g., Zhou Y.-s. (2020). Development and progress on hydrogen metallurgy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27, 713–723. DOI: 10.1007/s12613-020-2021-9.
- [8] Mauret, F., Baniyadi, M., Saxén, H., Feiterna, A., & Hojda, S. (2023). Impact of Hydrogenous Gas Injection on the Blast Furnace Process: A Numerical Investigation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 54, 2137–2158. DOI: 10.1007/s11663-023-02724-3.
- [9] Lan C., Hao Y., Shao J., Zhang S., Liu R., Lyu Q. (2022). Effect of H₂ on Blast Furnace Iron-making: A Review. *Metals*, 12, 1864. DOI: 10.3390/met12111864.
- [10] Shatokha V. (2022). Modeling of the effect of hydrogen injection on blast furnace operation and carbon dioxide emissions. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(10), 1851–1861. DOI: 10.1007/s12613-022-2474-8.
- [11] Beschkov V., Ganev E. (2023). Perspectives on the Development of Technologies for Hydrogen as a Carrier of Sustainable Energy. *Energies*, 16, 6108. DOI: 10.3390/en16176108.
- [12] Goldasz A., Matuszewska D., Olczak P. (2022). Technical, economic, and environmental analyses of the modernization of a chamber furnace operating on natural gas or hydrogen. *Internationa-*

- tional Journal of Hydrogen Energy*, 47(27), 13213–13225. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.02.090.
- [13] Neacsu A., Eparu C.N., Stoica D.B. (2022). Hydrogen–Natural Gas Blending in Distribution Systems—An Energy, Economic, and Environmental Assessment. *Energies*, 15(17), 6143. DOI: 10.3390/en15176143.
- [14] Yan J. (2018). Progress and Future of Breakthrough Low-carbon Steelmaking Technology (ULCOS) of EU. *International Journal of Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 3(2), 15–22. DOI: 10.11648/j.ijmpem.20180302.11.
- [15] Meijer K., Denys M., Lasar J., Birat J.-P., Still G., Overmaat B. (2009). ULCOS: Ultra-low CO₂ steelmaking. *Ironmaking & Steelmaking*, 36(4), 249–251. DOI: 10.1179/174328109X439298.
- [16] Ishaq H., Dincer I., Crawford C. (2022). A review on hydrogen production and utilization: Challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(62), 26238–26264. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.149.
- [17] Ahmed S. F., Mofijur M., Nuzhat S., Rafa N., Musharrat A., Lam S. S., Boretti A. (2022). Sustainable hydrogen production: Technological advancements and economic analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(88), 37227–37255. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.029.
- [18] Zou C., Li J., Zhang X., Jin X., Xiong B., Yu H., Liu X., Wang S., Li Y., Zhang L., Miao S., Zheng D., Zhou H., Song J. (2022). Industrial status, technological progress, challenges, and prospects of hydrogen energy. *Natural Gas Industry B*, 9(5), 427–447. DOI: 10.1016/j.ngib.2022.04.006.
- [19] Rampai M. M., Mtshali C. B., Seroka N. S., Khotseng L. (2024). Hydrogen production, storage, and transportation: Recent advances. *Royal Society of Chemistry Advances*, 14, 6699–6718. DOI: 10.1039/D3RA08305E.
- [20] Włodarczyk R., Kaleja P. (2023). Modern Hydrogen Technologies in the Face of Climate Change—Analysis of Strategy and Development in Polish Conditions. *Sustainability*, 15, 12891. DOI: 10.3390/su151712891.
- [21] Devlin A., Mykhnenko V., Zagoruichyk A., Salmon N., Soldak M. (2024). Techno-economic optimisation of steel supply chains in the clean energy transition: A case study of post-war Ukraine. *Journal of Cleaner Production*, 466, 142675. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.142675.
- [22] Tymoshenko D. O., Kukhar V. V., Volovnenko I. V. (2024). Porivniannia enerhospozhyvannia pry vyrobnytstvi stali zastarilymy ahlodomennym ta martenivskym peredilamy iz suchasnoiu tekhnolohiiu priamoho vidnovlennia zaliza Midrex H2 ta vyplavkoiu v duhovi stalelivalni pechi [Comparison of Energy Consumption in Steel Production by Obsolete Blast Furnace and Open-Hearth Methods with Modern Technology of Direct Reduction of Iron Midrex H2 and Melting in an Electric Arc Furnace]. *Naukovyi Zhurnal Metinvest Politekhniky. Seria: Tekhnichni Nauky*, 2, 49–54. DOI: 10.32782/3041-2080/2024-2-8. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 30.09.2024