

УДК 669.1: 658.26

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-8>

ПОРІВНЯННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ ЗАСТАРИЛИМИ АГЛОДОМЕННИМ ТА МАРТЕНІВСЬКИМ ПЕРЕДІЛАМИ ІЗ СУЧАСНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ ПРЯМОГО ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗА MIDREX H2 ТА ВИПЛАВКОЮ В ДУГОВІЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНІЙ ПЕЧІ

Тимошенко Данііл Олегович,

здобувач другого (магістерського) рівня вищої освіти
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0009-0001-2477-3310

Кухар Володимир Валентинович,

доктор технічних наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи,
професор кафедри металургії, матеріалознавства і організації виробництва
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-4863-7233

Воловненко Іван Володимирович,

провідний технолог інженерно-технологічного відділу
ТОВ «Метінвест Січсталь»
ORCID ID: 0009-0008-6145-7799

На основі твердження про те, що металургія є однією з найважливіших галузей, яка повинна перейти на більш екологічно чисті методи виробництва, показана актуальність переходу від застарілих технологій виробництва сталі, які використовують в Україні (зокрема, на «Запоріжсталі»), до більш сучасних. З'ясовано, що впровадження сучасних технологій, як-от пряме відновлення на основі Midrex H2 з подальшою виплавною окатишів у дугових сталеплавильних печах (далі – ДСП), стане важливим кроком у напрямі зниження викидів і підвищення енергоефективності технологій виробництва сталі. Дослідження порівнює енергоспоживання різних методів виробництва сталі, включаючи аглофабрику з аспіраційною системою, мартенівську піч, технологію Midrex H2 та дугову сталеплавильну піч. Було виявлено, що питомі витрати енергоспоживання аглофабрики становлять приблизно 33 кВт*ч/т, доменної печі – 3,3 кВт*ч/т, мартенівської печі – 4 кВт*ч/т, Midrex H2 – кВт*ч/т, а дугової сталеплавильної печі – 340 кВт*ч/т. Технологія Midrex H2, хоча і має вище енергоспоживання порівняно із традиційними методами, пропонує значні екологічні переваги завдяки нижчим викидам CO₂. Дугова сталеплавильна піч забезпечує гнучкість і ефективність у переробці сталевих брухту, попри найвище енергоспоживання. Оцінювання різних типів виробництва також ураховує витрати на обслуговування, інвестиції в інфраструктуру й екологічний вплив. Порівняння цих технологій дозволяє визначити найефективніші й економічно доцільні методи виробництва сталі для сучасних умов. Методологія дослідження включала проведення вимірювань на місці, обробку й аналіз отриманих даних, а також порівняльний аналіз. Результати показують, що аглодоменний процес у поєднанні з мартенівською піччю генерує значні викиди CO₂ порівняно з технологією Midrex H2 + ДСП. Агломераційний процес є одним із найбільш енергоємних, тоді як доменна піч потребує менше енергії. Мартенівська піч споживає відносно мало енергії, але її неефективність робить її менш привабливою. Midrex H2 демонструє високу енергоефективність та екологічну чистоту. ДСП, попри високі енергозатрати, є гнучкою у використанні вторинної сировини. Висновки дослідження підкреслюють різну енергоефективність різних технологій. Дослідження підкреслює важливість розвитку та впровадження сучасних технологій для майбутнього галузі.

Ключові слова: енергоефективність технологій, викиди CO₂, аглодоменне виробництво, мартенівська піч, технологія Midrex H2, дугова сталеплавильна піч, перехід на сучасні технології.

Tymoshenko Daniil, Kukhar Volodymyr, Volovnenko Ivan. Comparison of energy consumption in steel production by outdated sinter-blast furnace and open-hearth processes with Midrex H2 modern technology of direct iron reduction and smelting in an arc furnace

Based on the assertion that metallurgy is one of the most crucial industries needing to transition to more environmentally friendly production methods, the importance of moving from outdated steel production technologies used in Ukraine (particularly at "Zaporizhstal") to more modern ones is highlighted. It has been found that the implementation of modern technologies, such as direct reduction using Midrex H2 followed by pellet smelting in electric arc furnaces (EAF), will be an important step towards reducing emissions and improving the energy efficiency of steel production technologies. The study compares the energy consumption of different steel

production methods, including a sintering plant with an aspiration system, an open-hearth furnace, Midrex H2 technology, and EAF. It was found that the energy BSFC consumption of the sintering plant is approximately 33 kWh/t, the blast furnace – 3,3 kWh/t, the open-hearth furnace – 4 kWh/t, Midrex H2 – 85 kWh/t, and EAF – 340 kWh/t. Although Midrex H2 technology has higher energy consumption compared to traditional methods, it offers significant environmental benefits due to lower CO₂ emissions. EAF provides flexibility and efficiency in recycling steel scrap, despite the highest energy consumption. The evaluation of different production types also considers maintenance costs, infrastructure investments, and environmental impact. Comparing these technologies allows for identifying the most efficient and economically viable steel production methods for modern conditions. The research methodology included on-site measurements, data processing and analysis, as well as a comparative analysis. The results show that the sinter-blast furnace process combined with the open-hearth furnace generates significant CO₂ emissions compared to the Midrex H2 + EAF technology. The sintering process is one of the most energy-intensive, while the blast furnace requires less energy. The open-hearth furnace consumes relatively little energy, but its inefficiency makes it less attractive. Midrex H2 demonstrates high energy efficiency and environmental cleanliness. EAF, despite high energy costs, is flexible in using secondary raw materials. The study's conclusions emphasize the varying energy efficiency of different technologies. The research underscores the importance of developing and implementing modern technologies for the future of the industry.

Key words: Energy efficiency of technologies, CO₂ emissions, sinter-blast furnace production, open-hearth furnace, Midrex H2 technology, electric arc furnace (EAF), transition to modern technologies.

Вступ. У світі є гостра необхідність переходити на зелене виробництво з низьким карбоновим слідом. Це стосується металургії, яка є вуглецево місткою, тому розглядаються глобальні тренди з переходу на зелені методи виробництва сталі. Це стосуватиметься України, яку теж це торкнеться із 2025–2050 рр. [1]. Особливо це актуально для «Запоріжсталі», де використовується застарілий спосіб аглодоменного виробництва та мартенівська піч. Особливо актуальним буде проєкт будівництва нового виробництва на базі Midrex H2 та дугової сталеплавильної печі (далі – ДСП). Металургійна промисловість є різноманітною й енергоємною, з різними технологіями, що використовуються для виробництва сталі. Серед них виділяються агломераційний процес у поєднанні з доменною піччю, мартенівська піч, технологія прямого відновлення заліза Midrex H2 та дугова сталеплавильна піч, які мають свої методи та профілі споживання енергії.

Мета роботи – порівняти ці технології, зосередившись на їхній енергоефективності й експлуатаційних параметрах.

Агломераційний процес, включаючи агломераційні фабрики з аспіраційними системами, та доменні печі є традиційними та широко використовуваними методами. Споживання енергії для агломерації становить приблизно 33 кВт*ч /т, тоді як доменна піч потребує приблизно 3,3 кВт*ч/т. З іншого боку, мартенівська піч, яка нині менш поширена через високе енергоспоживання та тривалий процес, потребує приблизно 4 кВт*ч/т виробленої сталі.

Сучасні технології, як-от процес Midrex H2, який використовує водень як відновник, пропонують більш екологічно чисту альтернативу. Споживання енергії для Midrex H2 становить приблизно 85 кВт*ч /т. Дугова сталеплавильна піч, відома своєю високою ефективністю та

гнучкістю, споживає приблизно 340 кВт*ч /т. Окрім того, сучасні технології дозволяють знизити викиди CO₂, що є важливим чинником в умовах посилення екологічних норм і вимог до сталого розвитку. Оцінка різних методів виробництва сталі також ураховує такі аспекти, як витрати на обслуговування, інвестиції в інфраструктуру та вплив на навколишнє середовище.

Отже, порівняння цих технологій дозволить визначити найефективніші та найбільш економічно доцільні методи для сучасного виробництва сталі.

Агломераційний процес і доменна піч, хоч і давно використовуються, постійно розвиваються для підвищення енергоефективності та зниження викидів. Дослідження [2; 3] показали, що оптимізація процесу спікання та підвищення ефективності доменних печей можуть значно вплинути на загальне енергоспоживання та викиди. Наприклад, застосування нових технологій контролю температури та складу шихти дозволяє знизити витрати енергії та покращити якість кінцевого продукту. Упровадження систем рекуперації тепла та вдосконалення аспіраційних систем також сприяє зниженню викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Дослідження технології мартенівської плавки підкреслює неефективність її використання порівняно із сучасними технологіями, але вона все ще використовується в деяких регіонах через існуючу інфраструктуру. Мартенівські печі потребують значних витрат на підтримку і модернізацію, їхнє енергоспоживання значно перевищує сучасні альтернативи, якщо врахувати споживання вуглеводнів як енергоносіїв. Проте в деяких країнах, де модернізація промисловості проходить повільніше, ці печі все ще залишаються важливою частиною металургійного комплексу.

Процес Midrex, особливо з інтеграцією водню (Midrex H2), є значним проривом у зниженні викидів CO₂. Дані літератури [4; 5] свідчать, що використання водню у процесі відновлення може зменшити вуглецевий слід під час виробництва сталі. Використання водню як відновника замість традиційного природного газу дозволяє значно скоротити викиди парникових газів. Окрім того, технологія Midrex H2 активно досліджується в контексті зростання попиту на екологічно чисті технології та відновлювані джерела енергії. Однак економічна ефективність цієї технології залежить від доступності та вартості водню, а також від інфраструктурних інвестицій.

Дугова сталеплавильна піч, попри високе енергоспоживання, також виграє від вдосконалення енергетичних технологій і процесів [6; 7], що робить її конкурентоспроможною в регіонах із великою кількістю електроенергії.

Матеріали та методи. У цьому дослідженні ми використовували комплексний підхід для аналізу енергоспоживання й ефективності різних технологій виробництва сталі. Для досягнення цієї мети були виконані такі етапи та застосовані нижчезазначені методи:

а) проведення вимірювань на місці. Для отримання точних даних про енергоспоживання й ефективність різних технологій були проведені вимірювання на місці виробництва сталі. Ці вимірювання включали аналіз електроенергії, споживаної різними обладнаннями та процесами, а також вимірювання викидів газів та інших показників ефективності;

б) обробка й аналіз отриманих даних. Отримані в результаті вимірювань дані були оброблені та проаналізовані з метою визначення енергетичної ефективності й екологічного впливу кожного методу виробництва сталі;

в) порівняльний аналіз. На основі отриманих даних був проведений порівняльний аналіз різних методів виробництва сталі з погляду їхньої енергоефективності, екологічного впливу й економічної доцільності.

Результати показують (табл. 1), що аглодомений процес у поєднанні з мартенівською піччю генерує значно більші викиди CO₂ [6] порівняно з технологією Midrex H2 + ДСП. Зокрема, аглодомений процес і мартенівська піч створюють 2 430 кг/т викидів на тону сталі, тоді як Midrex H2 + ДСП генерує лише 613 кг/т викидів на тону сталі [6–8]. Це свідчить про те, що технологія Midrex H2 + ДСП є значно більш екологічно чистою та сприяє зменшенню вуглецевого сліду виробництва сталі [9; 10]. Досліди були проведені в реальних умовах,

що підтверджує практичну значущість отриманих результатів. Ці дані демонструють важливість упровадження сучасних технологій, як-от Midrex H2, для зменшення екологічного впливу сталеплавильних процесів.

Різні технології виробництва сталі мають значні відмінності в енергоспоживанні. Агломераційний процес з аспіраційними системами є одним із найбільш енергоємних, споживає приблизно 33 кВт*ч/т сталі (табл. 2). Це пов'язано з високими витратами на підготовку сировини та підтримання процесу спікання. Доменна піч, яка зазвичай використовується разом з агломераційним процесом, потребує 3,3 кВт*ч/т сталі. Хоча це значно менше, ніж агломерація, загальні витрати енергії залишаються високими. Мартенівська піч, хоча і менш поширена нині, потребує відносно мало енергії – 4 кВт*ч/т сталі. Проте її неефективність і тривалий процес роблять її менш привабливою для сучасного виробництва.

Таблиця 1
Розрахунок викидів на тону сталі

Тип виробництва	Викиди, кг/т
Аглодомений процес + Мартенівська піч	2 430
Midrex H2 + ДСП	613

Таблиця 2
Енергоемність різних технологій виробництва сталі та чавуну

Переділ	Кількість витрат питомої електроенергії на тону сталі/чавуну/агломерату, кВт*ч/т
Агломераційний	33
Доменний	3,3
Мартенівська піч	4
Midrex H2	85
ДСП	340

Сучасна технологія Midrex H2, що використовує водень як відновник, демонструє високу енергоефективність із споживанням питомої електроенергії 85 кВт*ч/т сталі. Це робить її привабливою з погляду екологічної чистоти та зниження викидів. Дугова сталеплавильна піч споживає 340 кВт*ч/т сталі. Незважаючи на вищі енергозатрати порівняно з деякими іншими технологіями, ДСП є гнучкою у використанні вторинної сировини, що сприяє циркулярній економіці.

Результати. Під час дослідження аглодоменого процесу та технології виплавки в мартенівській печі (рис. 1) було виявлено, що такий застарілий спосіб має великі викиди CO₂ та значне споживання енергії (табл. 3), цей метод має

негативний екологічний вплив через велику кількість викидів CO₂. Midrex H2 (рис. 2) та дугова сталеплавильна піч (ДСП) (рис. 3) – з іншого боку, сучасні технології, демонструють низькі викиди CO₂, але високе енергоспоживання (табл. 4). Ці методи мають більш високе енергоспоживання та менший екологічний вплив, що робить їх привабливими для сучасних виробничих умов. Практичні застосування – дослідження проводилися в реальних умовах виробництва сталі, що надає їм практичного значення.

Порівняння вказує на відмінності в енергоспоживанні (рис. 4), але кожен метод має свої переваги та недоліки. Ці результати дослідження можуть бути використані для ухвалення рішень щодо вибору оптимального методу

Таблиця 3

Основні споживачі енергії на аглодоменному та мартенівському переділах

Переділ / Продукт	Споживачі	Витрати енергії, кВт*ч/т продукту
Агломерація / окатиші	Подрібнення та сортування руди	4,3
	Сушіння руди	5
	Механічні змішувачі	3
	Конвеєри та транспортери	2,7
	Агломераційні стрічки	8
	Пиловловлювачі – очисники газів	10
Доменне виробництво / чавун	Вдування повітря та кисню	0,6
	Подача палива	0,55
	Системи нагріву	0,5
	Підйомники та конвеєри для подачі сировини	0,4
	Системи охолодження	0,375
	Системи контролю й автоматизації	0,475
	Системи очистки й утилізації газів	0,4
Мартен / сталь	Системи подачі повітря та газу	0,3
	Механічне обладнання для завантаження та вивантаження матеріалів	1,3
	Системи охолодження	0,8
	Системи очищення та рециркуляції газів	0,6
	Системи контролю й автоматизації	1

виробництва сталі для конкретного підприємства з урахуванням енергоефективності й екологічних вимог. Потенційні переваги – зважаючи на зростання вимог до зменшення викидів CO₂ й оптимізації використання енергії (табл. 5), сучасні технології, як-от Midrex H2 та ДСП, можуть мати значний потенціал для підвищення конкурентоспроможності та сталості виробництва сталі.

Таблиця 4

Основні споживачі електроенергії в технології Midrex H2

Споживачі	Витрати енергії, кВт*ч/т DRI
Електролізери водню	3 000
Повітронаддувки та компресори	12
Системи підігріву	15
Системи очищення та рециркуляції газів	7
Системи контролю й автоматизації	2
Системи транспортування сировини	4

Таблиця 5

Основні споживачі електроенергії ДСП

Споживачі	Витрати енергії, кВт*ч/т сталі
Основний електричний дуговий процес	300
Подача та регулювання електродів	10
Очищення газів	10
Охолоджувальні системи	5
Механізми завантаження та вивантаження	10
Системи моніторингу й управління	5

Отже, ми бачимо, що в застарілому способі агломераційний процес (рис. 4-а), який використовується для підготовки рудних матеріалів до доменної плавки, має лівову частку енергоспоживання в металургійній промисловості. За представленими даними, його частка становить

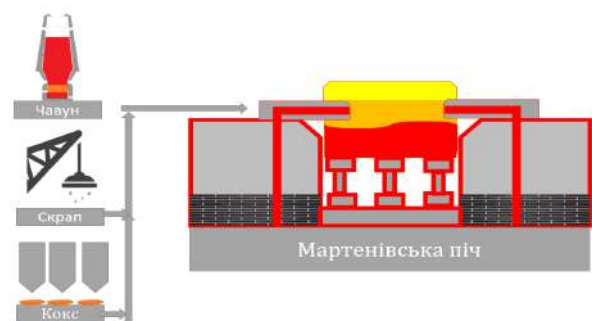


Рис. 1. Схема мартенівського виробництва сталі

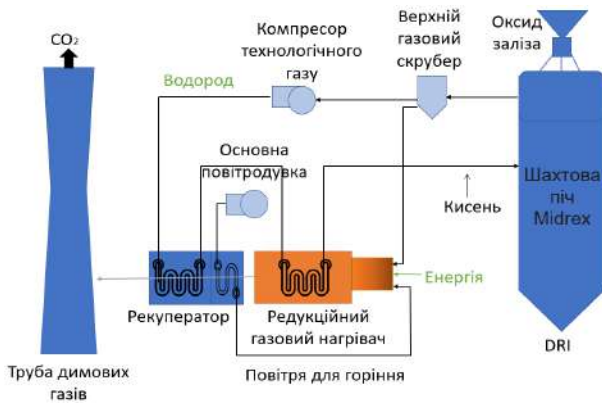


Рис. 2. Схема процесу Midrex H2

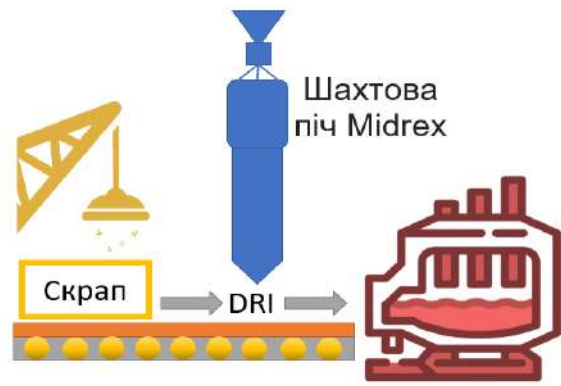


Рис. 3. Схема завантаження ДСП



Рис. 4. Порівняльна діаграма витрат електроенергії

83%, 7% доменний і 10% мартенівський процес. Це означає, що значна частина ресурсів і енергії витрачається саме на цей процес. У новітньому (рис. 4-б) процесі основним споживачем є ДСП, яка становить 80% від енергоспоживання комплексу. Бенчмарк (рис. 4-в) вказує на те, що новітній спосіб має 90% від споживання, на відміну від застарілого способу, що свідчить про те, що новітній спосіб у 9 разів більш енергозатратний.

Висновки. Порівняння цих методів виробництва сталі показало значні відмінності в енергоспоживанні. Мартенівський процес, застарілий і менш ефективний, ніж ДСП, але залишається актуальним у виробництві деяких марок сталі. Процес Midrex H2, зі своїм високим

енергоспоживанням і зниженими викидами, являє собою перспективну альтернативу, особливо в умовах посилення екологічних норм. Дугова сталеплавильна піч, попри високе енергоспоживання, має переваги у вигляді гнучкості й ефективності в переробці брухту сталі. Дослідження підкреслює різну енергоефективність різних технологій. Показано, що порівняння методів виробництва сталі застарілого процесу аглодоменоного виробництва з мартенівською піччю і Midrex H2 з ДСП виявляє значні відмінності в енергоспоживанні. Упровадження сучасних технологій, як-от Midrex H2 і ДСП, є ключовим для зменшення вуглецевого сліду та підвищення енергоефективності, що важливо для майбутнього галузі.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Каленков О. Запуск СВAM може погіршити позиції української металургії у світі. *gmk.center*. URL: <https://gmk.center/ua/opinion/zapusk-cbam-mozhe-pogirshiti-pozicii-ukrainskoi-metallurgii-u-sviti/>.
2. Аналіз скорочення викидів вуглекислого газу з доменної печі в умовах використання перспективних та існуючих технологій доменної плавки / О. Чайка та ін. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Т. 37. С. 158–174. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-158-174>.
3. Перспективи розвитку металургійного виробництва в Україні за рахунок використання нових технологій / Л. Тубольцев та ін. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Т. 37. С. 4–25. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25>.

4. Modeling MIDREX based process configurations for energy and emission analysis / S. Sarkar et al. *Steel research international*. 2017. Vol. 89. Issue 2. P. 1700248. <https://doi.org/10.1002/srin.201700248>.
5. Kazalski P., Yoong K. A Study on the Patented MIDREX Reformer and Its Adaptability to the H₂ Economy. *AISTech 2024*. 6–9 May, 2024. <https://doi.org/10.33313/388/028>.
6. H₂ Emission from CRL618 / F. Herpin et al. *Molecular Hydrogen in Space*. Cambridge Univ. Press, 2000. P. 151–154. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511564635.022>.
7. MIDREX H₂ – The Road to CO₂-Free Iron and Steelmaking / R. Millner et al. *AISTech 2021*. 1 June 2021. <https://doi.org/10.33313/382/125-20514-049>.
8. Європейська комісія: Інтегроване запобігання та контроль забруднення. Довідковий документ щодо найкращих доступних технологій та методів управління (ДД НДТМ) у ковальській та ливарній промисловості. Травень 2020 р. *mepr.gov.ua*. URL: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/sf_bref_0505_1_ukr_ed_final.pdf.
9. Biomass and Carbon Fuels in Metallurgy / J. Legemza et al. CRC Press, 2020. 292 p. <https://doi.org/10.1201/9780429274039>.
10. Habashi F. Pollution problems in the metallurgical industry : A review. *Journal of Mining & Environment*. 2011. Vol. 2. Issue 1. P. 17–26. <https://doi.org/10.22044/jme.2012.16>.

REFERENCES:

1. Kalenkov, O. (2024). Zapusk CBAM mozhe pohirshyty pozytsii ukrainskoi metalurhii u sviti [The launch of CBAM may worsen the position of Ukrainian metallurgy in the world]. *gmk.center*. Retrieved from: <https://gmk.center/ua/opinion/zapusk-cbam-mozhe-pogirshiti-pozicii-ukrainskoi-metalurgii-u-sviti> [in Ukrainian].
2. Chaika, O., Kornilov, B., Moskalyina, A., Lebid, V., Izyumsky, M., & Dzhigota, M. (2023). Analiz skorochennia vykydiv vuhlekysloho hazu z domennoi pechi v umovakh vykorystannia perspektyvnykh ta isnuichykh tekhnolohii domennoi plavky [Analysis of CO₂ emission reduction from the blast furnace in the conditions of using promising and existing blast furnace technologies]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 37, 158–174. Retrieved from: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-158-174> [in Ukrainian].
3. Tuboltsev, L., Chaika, O., & Babachenko, O. (2023). Perspektyvy rozvytku metalurhiinoho vyrobnytstva v Ukraini za rakhunok vykorystannia novykh tekhnolohii [Prospects for the development of metallurgical production in Ukraine through the use of new technologies]. *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, 37, 4–25. Retrieved from: <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-37-4-25> [in Ukrainian].
4. Sarkar, S., Bhattacharya, R., Gopal, R., & Kumar Sen, P. (2017). Modeling MIDREX based process configurations for energy and emission analysis. *Steel Research International*, 89 (2), 1700248. Retrieved from: <https://doi.org/10.1002/srin.201700248>.
5. Kazalski, P., & Yoong, K. (2024). A study on the patented MIDREX reformer and its adaptability to the H₂ economy. *AISTech 2024*, 6–9 May 2024. Retrieved from: <https://doi.org/10.33313/388/028>.
6. Herpin, F., Cernicharo, J., & Heras, A. (2000). H₂ emission from CRL618 in Molecular Hydrogen in Space. Cambridge University Press, 151–154. Retrieved from: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511564635.022>.
7. Millner, R., Rothburger, J., Rammer, B., Boehm, C., Sterrer W., Ofner H., & Chevrier V. (2021). MIDREX H₂ – The road to CO₂-free iron and steelmaking. *AISTech 2021*. 1 June 2021. Retrieved from: <https://doi.org/10.33313/382/125-20514-049>.
8. European Commission (2020). Intehrovane zapobihannia ta kontrol zabrudnennia. Dovidkovyi dokument shchodo naikrashchykh dostupnykh tekhnolohii ta metodiv upravlinnia (DD NDTM) u kovalskii ta lyvarnii promyslovosti [Integrated pollution prevention and control. Reference document on best available techniques and management methods in the forging and foundry industries]. *mepr.gov.ua*. Retrieved from: https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/sf_bref_0505_1_ukr_ed_final.pdf [in Ukrainian].
9. Legemza, J., Fröhlichová, M., & Findorák, R. (2020). Biomass and carbon fuels in metallurgy. CRC Press. 292 p. Retrieved from: <https://doi.org/10.1201/9780429274039>.
10. Habashi, F. (2011). Pollution problems in the metallurgical industry: A review. *Journal of Mining & Environment*, 2 (1), 17–26. Retrieved from: <https://doi.org/10.22044/jme.2012.16>.