

УДК 504.03:672:628.5

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.20>

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ «ЗЕЛЕНОЇ» МЕТАЛУРГІЇ В КОНТЕКСТІ МІНІМІЗАЦІЇ ВПЛИВУ НА АТМОСФЕРНЕ ПОВІТРЯ

Навольнев І.Ю., Максимова Н.М.

ТОВ «Технічний університет «Метінвест Політехніка»

вул. Південне шосе, 80, 69008, м. Запоріжжя

Ihor.Navolniev@mipolytech.education, natalya.maksimova@mipolytech.education

Аналіз сучасних тенденцій розвитку металургійної промисловості та світової кліматичної політики показав доцільність окреслення подальшого розвитку металургійної промисловості з урахуванням мінімізації впливів на довкілля, зокрема з урахуванням викидів двоокису вуглецю у атмосферне повітря, та виявлення перспективних технологій виробництва металопродукції, на які слід в першу чергу звернути увагу для подальшого впровадження у виробничу діяльність. Для визначення шляхів мінімізації техногенного навантаження виконано аналіз різних методів виробництва сталі, зокрема ряду перспективних технологій H-DR, Midrex, ItMK3. Показано, що при оцінці ефективності враховуються екологічні впливи виробничої діяльності на довкілля, в тому числі прямі та непрямі викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Ці показники також є визначальними для положення виробника сталі у світових рейтингах, таких як рейтинг ризиків у сфері екології, соціальної політики та корпоративного управління (ESG) компаній. Розглянуто як інструмент опосередкованого регулювання викидів парникових газів металургійними підприємствами систему екологічного оподаткування. На підставі нарахування екологічного податку на одну тону металопродукції, отриманої доменно-конверторним способом BF-BOF, за технологіями прямого відновлення заліза EAF (DRI), за електросталеплавильною технологією EAF (брухт), показана економічна доцільність максимального використання вторинної сировини. Порівняння технологій, які використовують викопні копалини у виробничому процесі, показало, що технологія прямого відновлення заліза EAF (DRI) характеризується деякими перевагами за доменно-конверторний спосіб виробництва сталі (BF-BOF). *Ключові слова:* парникові гази, тенденції розвитку металургійної промисловості, безпосереднє виробництво заліза, викиди двоокису вуглецю, екологічне оподаткування.

Analysis of current trends in the development of the metallurgical industry in the context of minimizing the impact on the air.
Navolnyev I., Maksymova N.

An analysis of current trends in the development of the steel industry and global climate policy has shown the expediency of outlining the further development of the steel industry with a view to minimising environmental impacts, in particular, taking into account carbon dioxide emissions into the atmosphere, and identifying promising technologies for the production of steel products that should be considered for further implementation in production activities. To identify ways to minimise the technogenic load, the article analyses various steelmaking methods, including a number of promising technologies such as H-DR, Midrex, and ItMK3. It is shown that the efficiency assessment takes into account the environmental impact of production activities on the environment, including direct and indirect emissions of pollutants into the atmosphere. These indicators are also decisive for the position of a steel producer in global rankings, such as the rating of environmental, social and corporate governance (ESG) risks of companies. The article considers the system of environmental taxation as an instrument of indirect regulation of greenhouse gas emissions by metallurgical enterprises. Based on the calculation of environmental tax per tonne of steel products produced by the BF-BOF process, direct reduction of iron (DRI), and electric arc furnace (EAF) technology (scrap), the economic feasibility of maximising the use of secondary raw materials is shown. A comparison of technologies that use fossil fuels in the production process has shown that the EAF direct reduction iron (DRI) technology has some advantages over the blast furnace-box furnace (BF-BOF) steelmaking process. *Key words:* greenhouse gases, trends in the development of the metallurgical industry, direct iron production, carbon dioxide emissions, environmental taxation.

Постановка проблеми. За новою дорожньою картою Європейської комісії [1] рекомендовано країнам Європейський союзу зменшити викиди парникових газів до 850 млн тонн еквіваленту вуглекислого газу (CO₂e). Одночасно з цим передбачається близько 400 млн тонн CO₂e видалити з атмосфери за допомогою технологій уловлення та зберігання вуглецю (carbon capture and storage (CCS), наприклад, за рахунок озеленення. Загалом ці рішення повинні допомогти досягти зменшення викидів до 450 млн тонн CO₂e в 2040 році, що на 90% нижче за рівень 1990 року та на 86% нижче за відповідні показники 2022 року [2]. Проміжною запланованою ціллю є зменшення викидів парникових газів на

55% CO₂e до 2030 року. Кінцевою ціллю є досягнення нульових викидів у 2050 році.

Наразі Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України спільно з експертами Генеральних директоратів Єврокомісії з кліматичних заходів DG Clima та з питань навколишнього середовища DG ENV, а також представниками Секретаріату міжнародного співтовариства Energy Community обговорюють проект рамкового кліматичного закону «Про основні засади державної кліматичної політики», який має імплементувати регламенти ЄС 2018/1999 та 2021/1119, та Стратегію впровадження Європейської системи торгівлі викидами (СТВ) в Україні [3]. Останнє вже знайшло відображення за рахунок вне-

сення змін до постанов Кабінету Міністрів України з питань моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів [4]. Відповідно до способу технічного функціонування національно-визначених внесків, ініціативи з вуглецевого ціноутворення класифікують як системи торгівлі викидами (СТВ) та вуглецеві податки [5].

Багато країн, попри суперечливі погляди, висловили свою згоду на поступове досягнення амбіційних цілей міжнародної кліматичної політики в рамках Конференції ООН зі зміни клімату 2023 року (COP28) [6]. На другий день заходу було створено «кліматичний клуб» задля розвитку співробітництва між країнами, які намагаються зменшити викиди парникових газів від важкої промисловості, наприклад, виробництва сталі. Однією з ініціатив клубу є створення «платформи для пошуку партнерів», яка дасть змогу учасникам отримати технічну допомогу, а також фінансування для підтримки переходу до низьковуглецевих методів.

Актуальність дослідження. Металургійна промисловість – є одним з «стовпів» розвитку сучасної економічної системи, при цьому залишаючись одним з лідерів-забруднювачів навколишнього середовища [7]. Виходячи з цього, подальший розвиток людства не можливий без трансформації технологічних процесів виробництва металів у більш екологічно безпечнішому напрямку. При цьому використання новітніх технологій повинне не тільки забезпечувати виконання екологічних рекомендацій з мінімізації впливів на довкілля, зокрема щодо викидів парникових газів у атмосферне повітря, а й вийти у зону прибутковості порівняно із «старими» методами виробництва сталі. Тому впровадження у виробництво кращих доступних технологічних рішень завжди є актуальною науково-практичною задачею.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Тематика досліджень відповідає основним напрямкам політики держави в сфері сталого розвитку, а саме Указу Президента «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» (№ 722/2019 від 30.09.2019), Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» (№ 2697-VIII від 28.02.2019), а також Паризькій кліматичній угоді (2015), яка прийнята в рамках Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Насьогодні близько 90 % чавуну піддається подальшій обробці для отримання сталі, яка характеризується більш високими механічними властивостями [8]. Виробництво сталі є значною частиною глобальних викидів CO₂ [9, 10]. За даними [11, 12] на початок XXI ст. виробнича діяльність сталеливарної промисловості обумовлювала близько 5–7% від загальної кількості антропогенних викидів CO₂. За оцінками Carbon Brief, сталеливарна продукція відповідає за 11 % усіх викидів CO₂. Інші джерела, такі

як Our World in Data, оцінюють цей показник ближче до 7,2% [13].

Промислового поширення набуває перехід від виробництва сталі за використанням доменної печі (BF) до киснево-конвертерної печі (BOF) [11]. Задля виробництва сталі можливо використовувати різні шихтові матеріали, наприклад, залізну руду та брукхт, що, як наслідок, впливає на енерговитрати та викиди CO₂.

Вуглецевий слід сталі становить 1,4 тонни на вироблену тонну сталі за даними Міжнародного енергетичного агентства (International Energy Agency, IEA), яке є автономним міжнародним органом в рамках Організації економічного співробітництва та розвитку (ОЕСР). Recycling Today, спираючись на дані міжнародної консалтингової компанії Mckinsey і Всесвітньої асоціації виробників сталі (World Steel Association), показує питомі викиди в розмірі 1,85 тонн CO₂ на вироблену тонну сталі за [13]. Цей середньозважений показник враховує показники викидів за двома основними способами виробництва сталі у світі: доменна піч – киснева піч (Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace (BF-BOF)) та електродугова піч (Electric Arc Furnace (EAF)), які часто називають «первинним» і «вторинним» способами. За даними New Steel Construction, з урахуванням повного життєвого циклу продукту викиди CO₂ за цими двома методами становлять 1,987 та 0,357 тонни CO₂ на тонну виробленої сталі відповідно. За даними Всесвітньої асоціації виробників сталі (World Steel Association) для способу виробництва сталі доменна піч – киснева піч (Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace (BF-BOF)), який є найбільш поширеним у світі, характерна середня кількість викидів CO₂ на метричну тонну виробленої сталі в розмірі 1,85 [13].

Стверджується, що 90% всієї сталі у світі перевозиться морським транспортом [13]. За даними досліджень викидів парникових газів, проведених у 2009 р., Міжнародна палата судноплавства (International Chamber of Shipping (ICS)) зазначає, що вплив транспортування на вуглецевий слід сталі оцінюється в 7,9 грама на тонно-кілометр при транспортуванні вантажів навалом [13].

Слід зважати, що питомі показники залежать від способу виробництва сталі, і, можуть істотно відрізнятися від вище наведених середньозважених показників для двох різних методів виробництва сталі.

Домено-конверторний спосіб отримання сталі є енергетично- та вуглецевоємним процесом. Основними джерелами утворення викидів CO₂ є вугілля та вапняк. Найбільша частина викидів CO₂ пов'язана із виробництвом чавуну.

За даними [14] викиди CO₂ при первинній виплавці сталі доменна піч – киснева піч (BF-BOF) складають за маршрутом: доменна піч – 69%, сталеплавильне виробництво – 11%, огрудкування – 2%, коксові печі – 5%, спікання – 13%.

Спосіб відновлення заліза із залізної руди або котунів виключає доменне виробництво чавуну. Безпосереднє виробництво заліза або пряме одержання заліза також носить й інші менш розповсюджені назви: металізація (часткова металізація) руд, пряме отримання заліза, бездоменна (недоменна) металургія заліза, безкоксова металургія заліза. Продукт процесу називають залізом прямого відновлення (Direct Reduced Iron, DRI). Класифікація процесів DRI за видом одержуваного продукту: отримання частково металізованих (ступінь металізації 30–50%) матеріалів для доменних печей; отримання високометалізованого продукту (ступінь металізації 85–95%) у твердому вигляді (губчастого заліза) для переплавки в сталеплавильних агрегатах з отриманням сталі; одержання металізованого продукту в пластичному стані (кричного заліза) для різних цілей, у тому числі як варіант пірометалургійного збагачення важкозбагачуваних, бідних та комплексних руд; отримання рідкого металу (чавуну чи напівпродукту) для переплаву в сталеплавильних печах.

Процеси DRI можна поділити на групи в залежності від типу реактору, що використовується: шахтні печі (Midrex, Energiron); обертові печі (SL/RN); обертові горнові печі (Fastmet/Fastmelt, ITmk3), реактори з псевдозрідженим шаром (Circored) [14–15].

Однією з найбільш розповсюджених технологій виробництва DRI вважається Midrex від компанії «Midrex Technologies, Inc.», яка є дочірньою компанією японської металургійної компанії «Kobe Steel» [16–18]. Процес Midrex – один з багатьох способів позадоменного, безпосереднього (прямого), одержання заліза з залізної руди.

Виробництво DRI на природному газі характеризується енергоспоживанням в розмірі 10,0–11,4 ГДж/т-DRI, а також викидами CO₂ в обсязі 0,77–0,92 тонни CO₂ на тонну сталі у порівнянні з приблизно 1,9 тонни CO₂ на тонну сталі за способом виробництва доменна піч – киснева піч (BF-BOF) [14].

Процес DRI є більш дорожчим, аніж процес BF, та потребує більш якісної залізородної сировини. Також необхідна доволі велика кількість електроенергії для виготовлення DRI в електродуговій печі (electric arc furnace, EAF). Проте суттєвим потенціалом технології DRI є зменшення викидів CO₂ за рахунок усунення необхідності використання коксових печей (табл. 1) [14].

Окремо необхідно зупинитися на такій технології безпосереднього відновлення заліза, як ITmk3, яка є продовженням технології Midrex від японської компанії Kobe Steel. Процес ITmk3 спрямований на виробництво гранульованого заліза високої чистоти з використанням залізородного концентрату та некоксового вугілля. Процес ITmk3 відрізняється швидким відновленням, науглерожуванням, плавленням і відділенням шлаку за нижчої температури.

Процес ITmk3 повністю відхиляє звичайні концепції виробництва заліза. Kobe Steel розглядає це як третє покоління технології виробництва чавуну після поточного основного процесу доменної кисневої печі (BF-BOF) і процесу прямого відновлення (DRI), представленого процесом Midrex. Процес ITmk3 може забезпечити реакцію відновлення приблизно за 10 хвилин, порівняно з 8 годинами процесу BF-BOF і 6 годинами процесу DR [19]. Ця технологія дозволяє виготовляти залізо методом прямого відновлення із залізородної дрібниці (концентрату) з використанням вугілля, що не коксується, як відновник. Сам процес, що займає часу від 8 до 12 хв, виглядає таким чином. У піч з подом, що обертається, завантажують рудовугільні котуни, отримані окомкуванням суміші концентрату і енергетичного вугілля. Тут котуни нагрівають до 1350–1400°C, що призводить до відновлення і розплаву заліза. Це ж забезпечує ефективне відділення чавуну від низькозалістого шлаку, який утворюється всередині котунів ще до розплавлення металу. На виході виходить гранульований чавун (винахідники назвали свій продукт англійським словом puggets), який містить 96–98% чистого заліза та 2–4% вуглецю [19].

Увагу приділяють як застосуванню поновлюваної, або регенеративної, «зеленої» енергії в країнах ЄС, так й пропонуються пілотні проекти процесів з використанням водню, розробляються положення водневої економіки [9].

Прикладом технології з водневого відновлення заліза H-DR є проект компанії Sunfire, Salzgitter Group та їхніх міжнародних партнерів з побудови парового електролізного заводу для енергоефективного виробництва водню. Salzgitter використовуватиме водень для виробництва сталі [20–21].

Проект GrInHy2.0 був запущений у січні 2022 р. в Salzgitter Flachstahl (SZFG), металургійній дочірній компанії Salzgitter Group, яка буде керувати

Таблиця 1

Огляд поширених технологій прямого відновлення заліза [14]

Технологія	Споживання енергії	Викиди CO ₂
Midrex Process	Разом ~ 10,4 ГДж/т-DRI. Споживання природного газу на високоєфективних установках Midrex ~ 9,6 ГДж/т-DRI.	Деякі заводи з технологіями MIDREX або EAF викидають в атмосферу лише третину CO ₂ , ніж за способом виробництва сталі BF-BOF.
ITmk3 Process	Зменшення споживання енергії на 3 та 10 ГДж/т-НМ порівняно з великими та малими доменними печами. Не використовується електроенергія.	Очікується скорочення викидів на 1 т CO ₂ /т-НМ.

заводом. Це продовження успішного першого етапу «Зеленого промислового водню за допомогою парового електролізу» (GrInHy), який розпочався в березні 2016 року. GrInHy був результатом співпраці SZFG і Sunfire.

Паровий або високотемпературний електроліз Sunfire стане центральним елементом нового проєкту, як і в попередньому. Високотемпературний електролізер вироблятиме водень (99,98%) зі швидкістю 200 м³/год. GrInHy2.0 матиме номінальну споживану потужність 720 кВт, що більше ніж GrInHy, який мав номінальну споживану потужність 150 кВт. За словами Sunfire, збільшення дозволить проєкту «масово випробувати і протестувати інтеграцію «зеленого» водню в сталеливарні процеси». Очікується, що електрична ефективність у новому проєкті буде збільшена порівняно з попереднім приблизно з 78% до принаймні 84%. Загальний бюджет проєкту склав 5,5 млн євро (6,22 млн доларів США) [20–21].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Аналіз сучасних тенденцій розвитку металургійної промисловості та світової кліматичної політики показав доцільність окреслення подальшого розвитку металургійної промисловості з урахуванням мінімізації впливів на довкілля, зокрема з урахуванням мінімізації викидів двоокису вуглецю у атмосферне повітря, та виявлення перспективних технологій виробництва металопродукції, на які слід в першу чергу звернути увагу для подальшого впровадження у виробничу діяльність.

Метою досліджень є аналіз перспектив використання новітніх технологій у порівнянні з класичними методами виробництва чорних металів з ухилом на більш раціональне використання ресурсної бази з урахуванням зменшення навантаження на атмосферне повітря в районах дислокації.

Виклад основного матеріалу. Впровадження інноваційних рішень у металургії сприяють досягненню стратегічних цілей сталого розвитку, серед яких виділяють зменшення викидів парникових газів у атмосферне повітря та енергоємність металевої продукції, які, як правило, взаємопов'язані. Наразі більшої уваги приділяють механізму регулювання кордонів викидів вуглецю (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) як інструмент контролю металургії як однієї з галузей економіки, виробничу діяльність якої утворює екологічний тиск на атмосферне повітря [22–23]. При оцінці ефективності технологій враховуються всі екологічні впливи від виробництва, в тому числі прямі і непрямі енерговитрати та викиди забруднюючих речовин. Енергетичні та екологічні показники також є визначальними для положення виробника сталі у світових рейтингах, таких як рейтинг ризику ESG компаній.

Не дивлячись на значне зростання ставки екологічного податку за викиди в атмосферне повітря двоокису вуглецю від 01.01.2022 р. з 10 гривень за

1 тону CO₂ до 30 гривень за тону CO₂, цей фіскальний платіж залишається одним з найнижчих аналогічних фіскальних платежів в Європі. До прикладу у Швеції ставка (є найвищою) становить \$137/т CO₂, в Швейцарії – \$101/т CO₂, Фінляндії – \$62/т CO₂, Норвегії – \$69/т CO₂, Франції – \$52/т CO₂, Нідерландах – \$35/т CO₂, Португалії – \$28/т CO₂, в Україні ж, відповідно, – \$0,79/т CO₂ [24]. Вуглецевий слід виробничої діяльності впливає на ціноутворення продукції.

На підставі нарахування екологічного податку на одну тону металопродукції розглянемо економічну доцільність максимального використання вторинної сировини. За даними GMK.Center станом на 2021 р., значення питомих викидів двоокису вуглецю на тону сталі у розрізі таких основних технологій, як: 2,2 т CO₂/т сталі – доменно-конверторний спосіб BF-BOF, 1,0 т CO₂/т сталі – технології прямого відновлення заліза EAF (DRI), 0,3 т CO₂/т сталі – електросталеплавильна технологія EAF (брухт). Такі низькі показники викиду двоокису вуглецю за технологією EAF пояснюються вторинною переробкою сировини (брухту) без участі вугільних та вапнякових компонентів. При цьому, викиди все ж такі присутні, так як пояснюються необхідністю генерування електричної енергії для плавлення лому.

Ставка податку на викиди CO₂ в різних країнах Європи різна, а для його узгодженості наразі відбувається впровадження механізму CBAM, тому для порівняння візьмемо ставки оподаткування України та Швеції. Чому Швеції – тому, що у Швеції одна з максимальних ставок податку (137 євро/т) на викид двоокису вуглецю, а так як з 2024 р. CBAM [22–23] вже вступає в дію, то припускаємо, що його ставка також буде досить відчутною (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння ставок оподаткування за викиди двоокису вуглецю в атмосферне повітря, грн./євро на 1 т сталі

Країна	Спосіб виробництва сталі		
	BF-BOF	EAF (DRI)	EAF
Україна	66/1,74	30/0,79	9/0,24
Швеція	11453,2/301,4	5206/137	1561,8/41,1

За результатами порівняння технологій, які використовують викопні копалини у виробничому процесі, вважається, що EAF (DRI) є оптимальнішою за BF-BOF. При цьому треба зазначити, що впровадження технології BF-BOF в теперішній час дешевше і навіть з такими показниками рентабельність вища за технологію EAF (DRI).

Головні висновки. Одним з інструментів відображення політики вуглецевої нейтральності країн-членів Європейського Союзу є механізм регулювання кордонів викидів вуглецю, який слід розглядати додатковим чинником сталого розвитку чорної металургії за рахунок впровадження у виробничу

діяльність сучасних технологій, зокрема технологій прямого відновлення.

На підставі аналізу екологічного оподаткування за викиди в атмосферне повітря двоокису вуглецю

стаціонарними джерелами забруднення в Україні та за кордоном, підкреслена доцільність пошуку інноваційних технологій виготовлення металопродукції та модернізації вже існуючих виробничих потужностей.

Література

1. Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions. Securing our future Europe's 2040 climate target and path to climate neutrality by 2050 building a sustainable, just and prosperous society. EUROPEAN COMMISSION. Strasbourg, 6.2.2024 COM(2024) 63 final. 60 pp. URL: https://climate.ec.europa.eu/document/download/2ccd7710-5fc3-420f-aeb8-9a3af271f970_en?filename=2040%20Climate%20Target%20Communication_en_0.pdf (дата звернення: 13.02.2024).
2. Q&A: European Commission calls for 90% cut in EU emissions by 2040. *Carbon Brief*. URL: <https://www.carbonbrief.org/qa-european-commission-calls-for-90-cut-in-eu-emissions-by-2040/> (date of access: 13.02.2024).
3. В Міндовкілія говорили про ключові аспекти кліматичної політики України. Новини від 12.02.2024. Урядовий портал. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/v-mindovkiliya-hovoryly-pro-kluchovi-aspekty-klimatychnoi-polityky-ukrainy> (дата звернення: 13.02.2024).
4. Про внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України з питань моніторингу, звітності та верифікації викидів парникових газів: Постанова Кабінету Міністрів України від 14 листопада 2023 р. № 1203. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/KP231203?an=1> (дата звернення: 13.02.2024).
5. Costantino F. Звіт про міжнародні добровільні та обов'язкові вуглецеві ринки з особливим акцентом на механізми, які застосовуються у випадку низьковуглецевого сільського господарства та потенційні можливості для українських виробників. United Nations Development Programme. 2022. 217 с. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/publications/zvit-pro-mizhnarodni-dobrovilni-ta-obovyazkovi-vuhletsevi-rynky-z-osoblyvym-aktseptom-na-mekhanizmy-yaki-zastosovuyutsya-u> (дата звернення: 13.02.2024).
6. COP28: Key outcomes agreed at the UN climate talks in Dubai. *Carbon Brief*. URL: <https://www.carbonbrief.org/cop28-key-outcomes-agreed-at-the-un-climate-talks-in-dubai/> (дата звернення: 13.02.2024).
7. Фещенко О.Л., Каменева Н.В. Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України. *Інвестиції: практика та досвід*. 2016. № 2. С. 28-32. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ipd_2016_2_8 (дата звернення: 26.12.2023 р.).
8. Sohn H.Y. Energy Consumption and CO₂ Emissions in Ironmaking and Development of a Novel Flash Technology. *Metals*. 2020; 10(1):54. <https://doi.org/10.3390/met10010054>.
9. Мельник С.Г. «Зелена» металургія на етапі переходу до вуглецевої нейтральності. *Met. lit'e Ukr.*, vol. 30, 2022, № 1 (328), 16-27. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.016>.
10. Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production. *Publications Office of the European Union*. URL: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ea047e8-644c-4149-bdcb-9dde79c64a12> (дата звернення: 26.12.2023 р.).
11. Wang C., Ryman C., Dahl J. Potential CO₂ emission reduction for BF-BOF steelmaking based on optimised use of ferrous burden materials, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, Volume 3, Issue 1, 2009, Pages 29-38, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2008.06.005>.
12. OECD Annual Report 2001, *OECD Publishing*, Paris. 2001. 136 pp. <https://doi.org/10.1787/annrep-2001-en>.
13. What is the carbon footprint of steel? *Sustainable Ships*. URL: <https://www.sustainable-ships.org/stories/2022/carbon-footprint-steel> (дата звернення: 12.02.2024).
14. Sohn H.Y., Mohassab Y. Greenhouse Gas Emissions and Energy Consumption of Ironmaking Processes. 2016. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39529-6>.
15. Duarte P.E., Vecerra J., Lizcano C., Martinis A. ENERGIIRON direct reduction technology-economical, flexible, environmentally friendly. *Acero Latino Americano*, 2008, 6, 52-58. URL: <https://www.energiron.com/wp-content/uploads/2019/05/2008-Environmental-Emissions-Compliance-And-Reduction-Of-Greenhouse-Gases-In-A-DR-EAF-Steel-Plant-2.pdf> (дата звернення: 13.02.2024).
16. Direct Reduction Plant. *KOBELCO*. URL: <https://www.kobelco.co.jp/english/products/ironunit/dri/index.html> (date of access: 23.12.2023).
17. 2022 World direct reduction statistics. MIDREX. Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.: Midrex Technologies, Inc. 2023. 16 pp. URL: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2022.pdf> (date of access: 23.12.2023).
18. MIDREX Plants. *Midrex Technologies, Inc.* URL: <https://www.midrex.com/about-midrex/midrex-plants-map/> (date of access: 23.12.2023).
19. ITmk3® Process. *KOBELCO*. URL: <https://www.kobelco.co.jp/english/products/ironunit/itm3.html> (date of access: 23.12.2023).
20. Jasi A. Sunfire and Salzgitter to build world's most powerful steam electrolysis plant. *The Chemical Engineer*. 2019. URL: <https://www.thechemicalengineer.com/news/sunfire-and-salzgitter-to-build-world-s-most-powerful-steam-electrolysis-plant/> (дата звернення: 26.12.2023 р.).
21. GrInHy2.0. SALCOS. *Salzgitter AG*. URL: <https://salcos.salzgitter-ag.com/de/grinhy-20.html> (дата звернення: 26.12.2023 р.).
22. Навольнев І.Ю., Максимова Н.М. Деякі питання нормативно-правового забезпечення захисту довкілля в Україні. *MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education: International scientific conference, Riga, the Republic of Latvia, 29–30 November 2023. Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, 2023. Vol. 2. 207-210 pages. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-147>.*
23. Carbon Border Adjustment Mechanism. Taxation and Customs Union. *European Commission*. URL: https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en (дата звернення: 26.12.2023 р.).
24. Єременко І.О. Ціна вуглецю в Україні та практики використання надходжень від податку на CO₂. *Екодія*, 2021. 38 с. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/12/cina-vyhleciyu-v-ukrainiv-2.pdf> (дата звернення: 16.12.2023 р.).