

**УПРАВЛІННЯ ВИКИДАМИ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ  
В УМОВАХ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ,  
ШЛЯХИ ДОСЯГНЕННЯ ВУГЛЕЦЕВОЇ НЕЙТРАЛЬНОСТІ  
ТА ЗАСТОСУВАННЯ ІНСТРУМЕНТІВ МЕНЕДЖМЕНТУ**

**Володимир Кухар**

доктор технічних наук, професор, проректор з науково-дослідної роботи,  
професор кафедри металургії та організації виробництва  
ТОВ «Технічний університет “Метінвест політехніка”», вул. Південне шосе, 80, Запоріжжя,  
Україна, 69008, [kvv.mariupol@gmail.com](mailto:kvv.mariupol@gmail.com)  
**ORCID: 0000-0002-4863-7233**

**Едуард Грибков**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металургії та організації виробництва  
ТОВ «Технічний університет “Метінвест політехніка”», вул. Південне шосе, 80, Запоріжжя,  
Україна, 69008, [eduard.gribkov@mipolytech.education](mailto:eduard.gribkov@mipolytech.education)  
**ORCID: 0000-0002-1565-6294**

**Христина Малій**

кандидат технічних наук, доцент, керівник науково-дослідного департаменту,  
доцент кафедри металургії та організації виробництва  
ТОВ «Технічний університет “Метінвест політехніка”», вул. Південне шосе, 80, Запоріжжя,  
Україна, 69008, [kristina.maliy@mipolytech.education](mailto:kristina.maliy@mipolytech.education)  
**ORCID: 0000-0002-9046-4268**

**Руслан Крюков**

магістрант кафедри металургії та організації виробництва  
ТОВ «Технічний університет “Метінвест політехніка”», вул. Південне шосе, 80, Запоріжжя,  
Україна, 69008, [ruslan.kryukov@mipolytech.education](mailto:ruslan.kryukov@mipolytech.education)

**Даніїл Тимошенко**

магістрант кафедри металургії та організації виробництва  
ТОВ «Технічний університет “Метінвест політехніка”», вул. Південне шосе, 80, Запоріжжя,  
Україна, 69008, [daniil.tymoshenko@mipolytech.education](mailto:daniil.tymoshenko@mipolytech.education)

Стаття присвячена розробці та обґрунтуванню шляхів досягнення вуглецевої нейтральності та застосування інструментів менеджменту в контексті управління викидами в металургійній галузі України в умовах декарбонізації. Встановлено, що для України, яка має потужний гірничо-металургійний комплекс (ГМК), перехід на використання зеленого водню є важливим кроком у напрямку декарбонізації промисловості та інтеграції в європейські ланцюги постачання зелених технологій. Проаналізовано динаміку викидів парникових газів у металургії України та можливе зниження темпів викидів завдяки впровадженню водневих технологій. Розроблено комплексний підхід до створення водневих кластерів на основі активів. Запропонований підхід враховує географічні, економічні та соціальні особливості регіонів, у яких розташовані підприємства, та передбачає використання новітніх технічних рішень для забезпечення ефективного та сталого функціонування таких кластерів. Результати дослідження обґрунтовані з урахуванням глобальних трендів переходу до низьковуглецевої економіки та викликів, пов'язаних з необхідністю адаптації промисловості до нових екологічних стандартів.

**Ключові слова:** декарбонізація, водневі кластери, зелена енергетика, низьковуглецева економіка, металургійна промисловість.

**Актуальність роботи.** Металургійна галузь України є однією з ключових складових національної економіки, однак її традиційні виробничі процеси супроводжуються високими рівнями

викидів парникових газів. У зв'язку з глобальними екологічними тенденціями та посиленням регулювання викидів вуглецю, зокрема через впровадження механізму прикордонного вугле-

цевого коригування (Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM) Європейським Союзом, питання декарбонізації металургії набуває критичного значення.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю сталого розвитку металургійної галузі України шляхом впровадження інноваційних технологій, таких як використання зеленого водню як енергоносія. Зелений водень, отриманий шляхом електролізу води з використанням відновлюваних джерел енергії, є перспективною альтернативою викопним видам палива, що дозволяє суттєво знизити викиди парникових газів у виробничих процесах [1–4]. За оцінками експертів, заміна традиційних енергоносіїв на водень може зменшити викиди CO<sub>2</sub> у металургії на 60–90 % залежно від технології виробництва [5, 6].

Однак впровадження водневих технологій потребує значних капіталовкладень та модернізації інфраструктури, що актуалізує необхідність створення інноваційних кластерів на основі діючих промислових активів, таких як активи Групи Метінвест [7, 8]. Додатково, з 2025 року CBAM передбачає запровадження вуглецевого мита на імпорт продукції з країн із високим рівнем викидів CO<sub>2</sub>, що може суттєво знизити конкурентоспроможність української металургії на європейському ринку та стимулює необхідність прискореної декарбонізації виробництва.

Для України, яка має потужний гірничо-металургійний комплекс (ГМК), перехід на використання зеленого водню є важливим кроком у напрямку декарбонізації промисловості та інтеграції в європейські ланцюги постачання зелених технологій [9]. Таким чином, актуальність дослідження визначається необхідністю розробки нових підходів до модернізації металургійної галузі України із застосуванням водневих технологій, а також потребою інтеграції національної промисловості у глобальні екологічні ініціативи та ланцюги постачання зеленої енергії.

**Мета а завдання дослідження.** Метою роботи є обґрунтування шляхів досягнення вуглецевої нейтральності в металургійній галузі України через управління викидами CO<sub>2</sub> та впровадження водневих технологій, з урахуванням впливу міжнародних екологічних регуляторних механізмів (зокрема CBAM) та сучасних підходів до декарбонізації виробництва сталі.

Для досягнення цієї мети було розв'язано декілька важливих завдань:

1. Проведено аналіз викидів CO<sub>2</sub> у металургійній галузі України та оцінка впливу еко-

логічних регуляторних механізмів (CBAM) на подальшу декарбонізацію виробництва.

2. Виконано оцінку ефективності водневих технологій як альтернативи традиційним відновникам у процесах виплавки сталі та їх потенційного впливу на скорочення викидів парникових газів.

3. Проведено дослідження економічних і технологічних бар'єрів впровадження водневих технологій у металургії України, включаючи потребу в модернізації інфраструктури.

4. Розроблено рекомендації щодо зниження вуглецевого сліду металургійних підприємств України шляхом оптимізації виробничих процесів та впровадження інструментів управління викидами.

**Матеріал і результати досліджень.** Металургійні підприємства Групи Метінвест, в тому числі ті, що розташовані у Запорізькій та Дніпропетровській областях, мають стратегічно важливе значення для національної економіки та можуть стати основою для створення водневих кластерів в Україні. Створення таких кластерів дозволить не лише модернізувати існуючі виробничі потужності, але й підвищити конкурентоспроможність української металургійної продукції на світових ринках [10–13]. Про необхідність впровадження водневих кластерів в Україні свідчать також офіційні статистичні дані.

Для оцінки майбутнього впливу водневих технологій на викиди CO<sub>2</sub> у металургійній галузі використано сценарний підхід. Він дозволяє врахувати як історичну динаміку скорочення викидів, так і перспективи, пов'язані з впровадженням новітніх технологій та регуляторних змін, зокрема CBAM. На основі цього підходу побудовано сценарій впливу водневих технологій на металургійну галузь України (CBAM), який враховує технологічні, економічні та регуляторні фактори.

Методика побудови сценарію впливу водневих технологій на викиди CO<sub>2</sub> у металургії України (CBAM) базується на аналізі історичних даних, прогнозних трендів та технологічних коефіцієнтів декарбонізації.

1. Збір та аналіз вихідних даних. Для моделювання використано статистичні дані про викиди CO<sub>2</sub> у металургії України за 2010–2025 рр., взяті з офіційних джерел та міжнародних аналітичних платформ (IEA, World Steel Association). Помаранчева лінія графіка відображає фактичну динаміку викидів у традиційній металургії, що зменшувалася через часткову модернізацію під-

приємств, зниження виробництва та економічні чинники.

2. Розрахунок ефекту впровадження водневих технологій. Зелена лінія прогнозує скорочення викидів CO<sub>2</sub> при переході на водневі технології, виходячи з емпіричних коефіцієнтів впливу водню як відновника. Основні параметри включають:

– Повний перехід на водневі технології → потенційно нульові викиди (враховуючи, що водень отримано з ВДЕ).

– Технологічні втрати та супутні процеси → мінімальний рівень викидів через транспортування, виробництво та енергоспоживання.

3. Врахування тимчасових піків викидів у 2025 році. Невеликий сплеск у 2025 р. пояснюється регламентованими роботами: перехідними етапами модернізації, запуском водневих агрегатів, налаштуванням виробничих процесів. У цей період можливі додаткові викиди через одночасне функціонування старих та нових технологій до повного переходу на водневі технології.

4. Формування прогнозного сценарію до 2030 року. Для традиційної металургії (помаранчева лінія) збережено тренд поступового зниження викидів за рахунок регуляторного тиску (СВАМ, квоти, екологічні податки). Для водневих технологій (зелена лінія) враховано поступове масштабування, що до 2030 року забезпечує майже повну декарбонізацію процесу.

На рис. 1 продемонстровано динаміку викидів парникових газів у металургії України та можливе

зниження темпів викидів завдяки впровадженню водневих технологій. Впровадження у 2025 році СВАМ змінить динаміку викидів CO<sub>2</sub> у металургії України, оскільки підприємства, які експортують продукцію до ЄС, змушені будуть або знижувати викиди, або сплачувати високі вуглецеві мита. На основі цього механізму, введення водневих технологій стане ключовим фактором для зниження викидів та уникнення вуглецевих тарифів.

Обмеження методики: Варто зазначити, що прогноз не враховує можливі корективи, пов'язані з наслідками військової агресії, які можуть суттєво вплинути на темпи модернізації, доступність інвестицій та логістичні процеси у металургійній галузі України. У майбутніх дослідженнях необхідно враховувати ці фактори для підвищення точності прогнозів.

Таким чином, застосування методики прогнозування (СВАМ) дозволяє оцінити потенційний ефект впровадження водневих технологій на скорочення викидів CO<sub>2</sub> у металургії України. Однак, для досягнення цільових показників декарбонізації необхідне комплексне поєднання технологічних, регуляторних та економічних інструментів управління викидами. Саме ці інструменти визначають практичні шляхи реалізації водневого переходу та мінімізації екологічного впливу металургійного виробництва.

Управління викидами CO<sub>2</sub> у металургійній галузі базується на поєднанні технологічних, регуляторних та економічних інструментів. Основними методами скорочення викидів є:

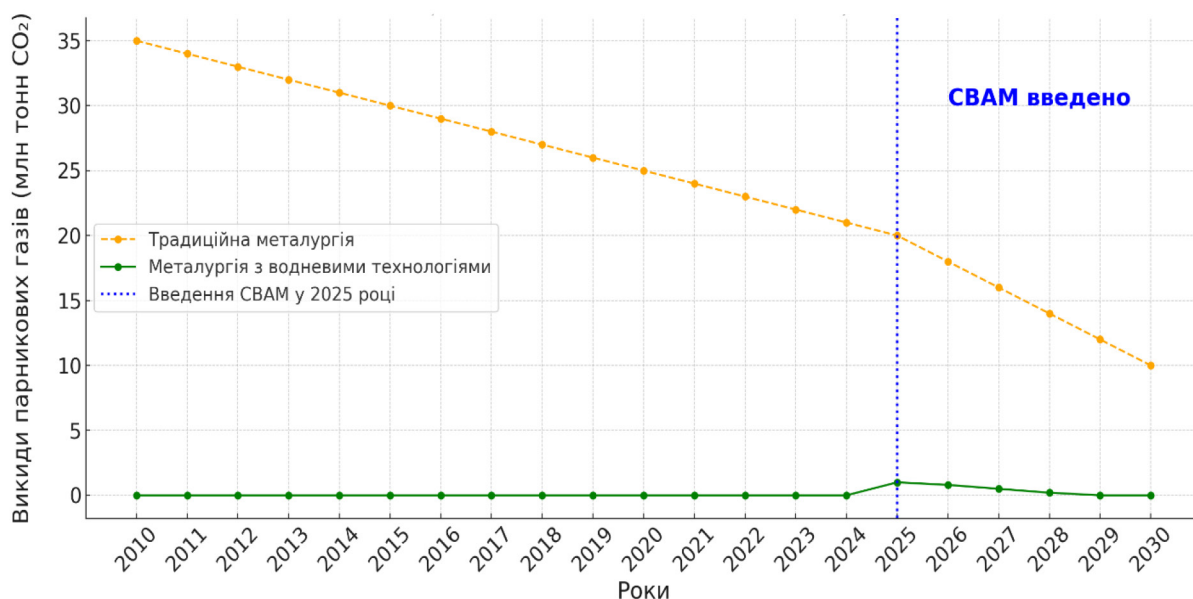


Рис. 1. Динаміка викидів парникових газів у металургії України та можливе зниження завдяки водневим технологіям (з урахуванням введення СВАМ у 2025 році)

## 1. Технологічні інструменти:

– Модернізація виробничих процесів (перехід від доменного виробництва до електросталеплавильних технологій, зокрема електродугових печей).

– Впровадження водневих технологій як заміни традиційних вуглецевих відновників у процесах виплавки сталі.

– Поліпшення енергоефективності шляхом використання вторинного тепла, удосконалення технологічних ланцюгів та автоматизації виробництва.

## 2. Регуляторні інструменти:

– Виконання вимог СВАМ для мінімізації вуглецевих тарифів на експортовану продукцію.

– Дотримання міжнародних стандартів екологічного моніторингу та впровадження системи квотування викидів за аналогією з ЄС.

## 3. Економічні та ринкові механізми:

– Інвестиційні стимули та державно-приватні партнерства для впровадження екологічно чистих технологій.

– Торгівля вуглецевими квотами та інтеграція у міжнародні механізми декарбонізації (наприклад, Європейську систему торгівлі викидами, EU ETS).

Таким чином, для успішного зниження викидів CO<sub>2</sub> у металургійній галузі необхідне комплексне поєднання технологічних, регуляторних та економічних інструментів, реалізація яких безпосередньо залежить від регіональних особливостей розміщення металургійних підприємств

Запорізька та Дніпропетровська області є ключовими центрами металургії України, що робить їх стратегічно важливими для впровадження водневих технологій. Кластерний підхід сприяє оптимізації виробництва водню, зниженню його собівартості та підвищенню технологічної ефективності. У регіонах зосереджені провідні підприємства галузі: ПАТ «ЗАПОРІЖСТАЛЬ», ПРАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», ТОВ «ЗАПОРІЗЬКИЙ ЛИВАРНО-МЕХАНІЧНИЙ ЗАВОД» (Група Метінвест), «Енергомашспецсталь» та Група «Інтерпайп» («Інтерпайп Сталь», «Інтерпайп НТЗ», «Інтерпайп НМТЗ»). «Інтерпайп» використовує електродугові печі, що скорочують викиди CO<sub>2</sub>, а перехід на відновлювані джерела енергії може зробити виробництво майже вуглецево-нейтральним.

Регіони мають значний науковий потенціал, зокрема завдяки Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова та іншим НДІ. Транспортна інфраструктура включає залізничні та річкові шляхи, що забезпечують ефективну логістику, однак воєн-

ний стан та окупація ускладнюють постачання, вимагаючи адаптації логістичних маршрутів.

Соціальний аспект є важливим: у двох областях проживає близько 5 млн осіб, і металургія залишається ключовим сектором зайнятості. Розвиток водневих кластерів сприятиме економічному зростанню та підвищенню якості життя населення.

Щодо розрахунків зміни викидів, європейські аналітичні центри [14] надають оцінки впливу СВАМ на металургійну галузь. За даними цих досліджень, очікується, що введення СВАМ знизить викиди CO<sub>2</sub> на 10–15 % у перші 5 років після впровадження механізму, що пояснюється як модернізацією підприємств, так і зниженням обсягів експорту продукції з високим вуглецевим слідом.

Для побудови графіка (див. рис. 1) динаміки викидів у металургії України з урахуванням попередніх даних було проаналізовано інформацію щодо статистичних викидів CO<sub>2</sub>. Загальні викиди в Україні у 2010–2020 роках демонстрували тенденцію до зниження [15], хоча темпи падіння залежали від економічних умов та змін у виробництві. За даними ІЕА [16], зниження викидів у металургійній галузі відбувалося завдяки модернізації деяких підприємств та впровадженню енергоефективних технологій. У той же час, зростання виробничих обсягів і збільшення споживання вугілля сповільнювало темпи скорочення викидів.

З урахуванням цих даних, скориговані графіки будуть включати динаміку викидів у традиційній металургії з 2010 до 2025 року, а також зміну після введення СВАМ з 2025 року. Це означатиме посилене зниження після 2025 року, враховуючи очікувані заходи щодо декарбонізації для відповідності європейським стандартам.

Доречно зазначити, що до 2019–2020 року водневі технології в металургії не застосовувалися на промисловому рівні. Перші напівпромислові проєкти з'явилися у 2019 році в Німеччині (Thyssenkrupp) [17, 18] та Японії (Nippon Steel) [19, 20] для тестування водню як відновлювального агента замість коксу та вугілля. Наведемо деякі приклади:

– Thyssenkrupp Steel (Німеччина): У 2019 році компанія Thyssenkrupp стала першою, яка здійснила ін'єкцію водню у доменну піч під час промислової експлуатації. Цей проєкт був частиною ширшої ініціативи «H2Stahl» для декарбонізації сталеплавильного виробництва. Водень замінював вугілля як додатковий відновлювальний агент, що дозволило знизити викиди CO<sub>2</sub>. Однак, цей проєкт був експериментальним, і масове

## Ключові відмінності традиційної та водневої металургії в умовах декарбонізації

Параметр	Традиційна металургія	Перехідний період (2025–2030 рр.)	Воднева металургія
Технології виробництва	Доменне виробництво, коксохімія	Поетапна модернізація, перехід на комбіновані технології	Електродугові печі, пряме відновлення заліза (DRI) на водні
Регуляторний вплив (СВАМ)	Високі вуглецеві тарифи, ризик втрати ринків ЄС	Вимушене впровадження низьковуглецевих технологій	Мінімальні вуглецеві тарифи, відповідність європейським стандартам
Економічні виклики	Високі витрати на енергоносії, екологічні платежі	Капіталовкладення у модернізацію, залежність від держпідтримки	Зниження операційних витрат, але високі стартові інвестиції
Соціально-економічний вплив	Робочі місця в традиційному виробництві	Тимчасові зміни в структурі зайнятості	Створення нових робочих місць у сфері ВДЕ та водневої інфраструктури

використання водню на промисловому рівні було заплановано на наступні роки після 2019 року, з подальшим розширенням до 2025 року [21].

– HBIS Group (Китай): У 2023 році HBIS Group оголосила про успішне виробництво прямих відновленого заліза (DRI) із використанням водню. Цей проєкт продемонстрував можливість переходу на водневу металургію, але до 2020 року подібні ініціативи не існували на промисловому рівні. Використання водню в цьому проєкті стало можливим завдяки наявності великих обсягів коксівного газу з високим вмістом водню [22].

В той же час, впровадження водневих технологій у промисловість металургії стало можливим лише після розробки відповідних технологічних процесів і запуску національних та міжнародних програм, таких як стратегія ЄС «Hydrogen Strategy» у 2020 році. Це підтверджується звітами Європейської асоціації сталі, які вказують, що масштабне впровадження водню можливе лише в найближчі десятиліття [23].

Результати порівняльного аналізу традиційної та водневої металургії наведені в табл. 1.

Крім того, дослідження [24] показують, що воднева металургія може суттєво знизити викиди CO<sub>2</sub>, якщо водень виробляється з відновлюваних джерел («зелений водень»). Основним побічним продуктом цього процесу є вода (H<sub>2</sub>O). Проте, якщо використовується водень з природного газу чи вугілля («блакитний водень»), то його виробництво супроводжується значними викидами CO<sub>2</sub>. Перехід на водневу металургію до 2050 року

може суттєво скоротити викиди, однак на початкових етапах можливе їхнє зростання через виробництво, транспортування та зберігання водню. Остаточний рівень викидів залежатиме від технологій отримання водню та джерел електроенергії. Якщо використовуються лише «чисті» технології, викиди після 2025 року мають стабільно знижуватися або залишатися на нульовому рівні.

**Висновки.** Таким чином, проведено дослідження, спрямоване на розробку комплексного підходу до створення водневих металургійних кластерів на основі активів Групи Метінвест в Україні. Запропонований підхід враховує географічні, економічні та соціальні особливості регіонів, у яких розташовані підприємства, та передбачає використання новітніх технічних рішень для забезпечення ефективного та сталого функціонування таких кластерів. Розроблена методика оцінки впливу водневих технологій (СВАМ) дозволяє прогнозувати динаміку викидів CO<sub>2</sub> з урахуванням регуляторних змін, зокрема СВАМ. Дослідження підтвердило, що використання «зеленого» водню здатне скоротити викиди CO<sub>2</sub> у металургії на 60–90 %, що робить цей напрям ключовим для декарбонізації галузі. Наукова новизна роботи полягає у застосуванні сценарного підходу до оцінки впливу водневих технологій на металургійне виробництво України. Подальші дослідження доцільно спрямувати на деталізацію технічних та економічних аспектів впровадження водневих кластерів, а також на оцінку їхньої інтеграції у європейські ринки низьковуглецевої продукції.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Лопушанська М. Р., Іванов Є. А. Воднева енергетика в Україні: проблеми і перспективи розвитку. 6-й Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване

природокористування»: збірник матеріалів. Львів : Західно-Український Консалтинг Центр (ЗУКЦ), ТзОВ, 2021. С. 72.

2. Шрайбер О. А., Дубровський В. В., Тесленко О. І. Сучасний стан і перспективи розвитку водневої енерге-

тики у світі. *Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Т. 32. № 71. С. 199–209.

3. Кудря С.О., Іванченко І.В., Петренко К.В., Кармазін О.О., Антон А.О., Репкін О.О. Вартість виробництва водню за допомогою електролізу. *Матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»*. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2021. С. 329–334.

4. Карпчук Г.Л., Будько В.І. Порівняльний аналіз технологій генерації «зеленого» водню методом електролізу. *Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції (20–21 травня 2021 р.)*. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2021. С. 380–384.

5. Wang H.-f., Qiu J., Ping X.-d., Wang F., Lu L.-j., Zhou J.-c., Li X.-p. Roadmap, current situation, and prospects of low-carbon development technologies in Chinese steel industry. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2024. Vol. 31. P. 2879–2892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01359-3>

6. Cormos A.-M., Dragan S., Petrescu L., Chisalita D.-A., Szima S., Sandu V.-C., Cormos C.-C. Reducing Carbon Footprint of Energy-Intensive Applications by CO<sub>2</sub> Capture Technologies: An Integrated Technical and Environmental Assessment. *Chemical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 76. P. 1033–1038. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1976173>

7. Kurylo M., Plotnikov O. Quality Parameters of Ukrainian Iron Ore Deposits and Their Compliance with Modern Technological Processes. *SGEM 2020*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.1/s01.033>

8. Levchenko N., Shyshkanova G., Abuselidze G., Zelenin Y., Prykhodko V., Kovalskyi M. Global Trends of Decarbonisation as a Determining Factor for the Development of External Economic Activity of Metallurgical Enterprises. *Rural Sustainability Research*. 2022. Vol. 47 (342). P. 74–75. DOI: <https://doi.org/10.2478/plua-2022-0008>

9. Рябчин О., Кулага Д., Андрусевич А., Андрущенко С., Дячук О. Зелене відновлення України: керівні принципи та інструменти для тих, хто ухвалює рішення. ППРООН, 2023. URL: <https://undp-ua-green-recovery-ukr.pdf>

10. Хорольський К.Д. Технологічно-інноваційна стратегія розвитку гірничо-металургійного кластеру регіону. *Інвестиції: практика та досвід*. 2014. № 7. С. 135–143.

11. Пуліна Т.В., Христенко О.В. Оцінка передумов створення кластеру на базі металургійного комплексу регіону. *Ефективна економіка: електронне фахове видання*. 2015. № 5. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4810>

12. Курило М.М., Віршило І.В., Кошарна С.К. Індекси доступності критичної мінеральної сировини для «зеленої» енергетики. *Мінеральні ресурси України*. 2021. № 4. С. 16–20. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2021.4.16-20>

13. Борисяк О.В. Перехід до кліматично-нейтральних інновацій підприємств на енергетичному ринку. *Інфраструктура ринку*. 2022. № 67. С. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.32843/infrastruct67-17>

14. European Commission. CBAM Impact Assessment. URL: <https://ec.europa.eu/>

15. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Як змінювалась кількість викидів парникових газів в Україні упродовж 30 років? URL: <https://mepr.gov.ua/yak-zminyuvalas-kilkist-vykydiv-parnykovykh-gaziv-v-ukrayini-uprodovzh-30-rokiv/>

16. International Energy Agency. Direct CO<sub>2</sub> intensity in iron and steel, 2000–2018. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-intensity-in-iron-and-steel-2000-2018>

17. Sun M., Pang K., Barati M., Meng X. Hydrogen-Based Reduction Technologies in Low-Carbon Sustainable Ironmaking and Steelmaking: A Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*. 2024. Vol. 10. P. 10–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00772-4>

18. Bode A., Agar D. W., Büker K., Göke V., Hensmann M., Janhsen U., Klingler D., Schlichting J., Schunk S.A. Research cooperation develops innovative technology for environmentally sustainable syngas production from carbon dioxide and hydrogen. *Proceedings of the World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2014)*. 2014. URL: <https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/media/press-releases/research-cooperation-develops-innovative-technology-for-environmentally-sustainable-syngas-production-from-carbon-dioxide-and-hydrogen-405.html>

19. Tang J., Chu M.S., Li F., et al. Development and progress on hydrogen metallurgy. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2020. Vol. 27. P. 713–723. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>

20. Majumder A., Phani M.K. Green Steel Technology: A Viable Approach for Sustainable World. *Proceedings of the International Conference on Metallurgical Engineering and Centenary Celebration (METCENT 2023)*. In: Patra S., Sinha S., Mahobia G.S., Kamble D. (eds). Springer, Singapore, 2024. P. 366–374. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-6863-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-981-99-6863-3_36)

21. Thyssenkrupp Steel. H2Stahl: A Hydrogen Revolution in Steelmaking. *Thyssenkrupp Official Website*. 2019. URL: <https://www.thyssenkrupp.com/>

22. Dokso A. HBIS Group Pioneers Hydrogen Metallurgy, Transforming Steel Industry. *Green Hydrogen News*. 29 травня 2023. URL: <https://energynews.biz/>

23. European Commission. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) Impact Assessment Report. 2020. URL: <https://ec.europa.eu/>, вільний.

24. Wan F., Li J. Exploring hydrogen metallurgy to CO<sub>2</sub> emissions reduction in China's iron and steel production: An analysis based on the life cycle CO<sub>2</sub> emissions – LEAP model. *Energy Reports*. 2024. Vol. 11. P. 4552–4563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.04.028>

**EMISSION MANAGEMENT IN UKRAINE'S METALLURGICAL INDUSTRY  
UNDER DECARBONIZATION, PATHWAYS  
TO ACHIEVING CARBON NEUTRALITY,  
AND THE APPLICATION OF MANAGEMENT TOOLS**

**Volodymyr Kukhar**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice-Rector for Research,  
Professor at the Department of Metallurgy and Production Organization  
LTD "Metinvest Polytechnic Technical University", 80 Pivdenne Highway, Zaporizhzhia, Ukraine,  
69008, kvv.mariupol@gmail.com  
**ORCID: 0000-0002-4863-7233**

**Eduard Gribkov**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Metallurgy  
and Production Organization  
LTD "Metinvest Polytechnic Technical University", 80 Pivdenne Highway, Zaporizhzhia, Ukraine,  
69008, eduard.gribkov@mipolytech.education  
**ORCID: 0000-0002-1565-6294**

**Kristina Maliy**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of the Research, Associate  
Professor at the Department of Metallurgy and Production Organization  
LTD "Metinvest Polytechnic Technical University", 80 Pivdenne Highway, Zaporizhzhia, Ukraine,  
69008, kristina.maliy@mipolytech.education  
**ORCID: 0000-0002-9046-4268**

**Ruslan Kriukov**

Master's Student at the Department of Metallurgy and Production Organization  
LTD "Metinvest Polytechnic Technical University", 80 Pivdenne Highway, Zaporizhzhia, Ukraine,  
69008, ruslan.kryukov@mipolytech.education

**Daniil Tymoshenko**

Master's Student at the Department of Metallurgy and Production Organization LTD  
"Metinvest Polytechnic Technical University", 80 Pivdenne Highway, Zaporizhzhia, Ukraine, 69008,  
daniil.tymoshenko@mipolytech.education

The article is devoted to the development and justification of ways to achieve carbon neutrality and the application of management tools in the context of emissions management in the metallurgical industry of Ukraine in the context of decarbonization. It is established that for Ukraine, which has a powerful mining and metallurgical complex (MMC), the transition to the use of green hydrogen is an important step towards decarbonization of the industry and integration into European supply chains of green technologies. The dynamics of greenhouse gas emissions in the metallurgy of Ukraine and the possible reduction in emissions rates due to the introduction of hydrogen technologies are analysed. The introduction of CBAM in 2025 will change the dynamics of CO<sub>2</sub> emissions in the metallurgy of Ukraine, since enterprises exporting products to the EU will be forced to either reduce emissions or pay high carbon duties. Based on this mechanism, the introduction of hydrogen technologies will become a key factor in reducing emissions and avoiding carbon tariffs. The transition to hydrogen metallurgy by 2050 could significantly reduce emissions, but in the initial stages their growth is possible due to the production, transportation and storage of hydrogen. The final level of emissions will depend on the technologies for obtaining hydrogen and sources of electricity. If only "clean" technologies are used, emissions after 2025 should steadily decrease or remain at zero. A comprehensive approach to creating asset-based hydrogen clusters is developed. The proposed approach takes into account the geographical, economic and social characteristics of the regions in which the enterprises are located, and involves the use of the latest technical solutions to ensure the effective and sustainable functioning of such clusters. The results of the study are justified taking into account the global trends of the transition to a low-carbon economy and the challenges associated with the need to adapt the industry to new environmental standards. At the same time, as a direction for further research, it is advisable to note the need to develop a methodological approach to assessing the results of decarbonization of the metallurgical industry based on mathematical modeling methods.

**Key words:** decarbonization, hydrogen clusters, green energy, low-carbon economy, metallurgical industry.

## REFERENCES

1. Lopushans'ka, M.R., & Ivanov, YE.A. (2021). Vodneva enerhetyka v Ukraini: problemy ta perspektyvy rozvytku [Hydrogen energy in Ukraine: problems and development prospects]. *6-y Mizhnarodnyy molodizhnyy konhres "Stalyy rozvytok: zakhyst dovkillya. Enerhooshchadnist'". Zbalansovane pryrodokorystuvannya: zbirnyk materialiv*. L'viv: Zakhidno-Ukrayins'kyy Konsal'tynh Tsentr (ZUKTS), TzOV, pp. 72.
2. Shrayber, O.O., Dubrovs'kyi, V.V., & Teslenko, O.I. (2021). Suchasnyy stan i perspektyvy rozvytku vodorodnoyi enerhetyky u sviti. [Current status and prospects for the development of hydrogen energy in the world] *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky*. no. 71, pp. 199–209.
3. Kudrya, S.O., Ivanchenko, I.V., Petrenko, K.V., Karmazin, O.O., Anton, A.O., & Ryepkin, O.O. (2021). Vartist' vyrobnytstva vodorodu za dopomohoyu elektrolizu. [Cost of hydrogen production using electrolysis] *Materialy XXII mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi "Vidnovlyuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist' u XXI stolitti"*. Kyiv: Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NAN Ukrainy, pp. 329–334.
4. Karpchuk, H.L., & Bud'ko, V.I. (2021). Porivnyal'nyy analiz tekhnolohiy heneratsiyi "zelenoho" vodorodu metodom elektrolizu. [Comparative analysis of technologies for generating «green» hydrogen by electrolysis] *Vidnovlyuvana enerhetyka ta enerhoefektyvnist' u XXI stolitti: materialy XXII mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi (20–21 travnya 2021)*. Kyiv : Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NANU, pp. 380–384.
5. Wang, H.-f., Qiu, J., Ping, X.-d., Wang, F., Lu, L.-j., Zhou, J.-c., & Li, X.-p. (2024). Pidpryemstvo, potochna sfera, i aspekty low-carbon development technology in Chinese steel industry. *Journal of Iron and Steel Research International*. no. 31, pp. 2879–2892. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42243-024-01359-3>
6. Cormos, A.-M., Dragan, S., Petrescu, L., Chisalita, D.-A., Szima, S., Sandu, V.-C., & Cormos, C.-C. (2019). Reducing Carbon Footprint of Energy-Intensive Applications by CO<sub>2</sub> Capture Technologies: An Integrated Technical and Environmental Assessment. *Chemical Engineering Transactions*. no. 76, pp. 1033–1038. DOI: <https://doi.org/10.3303/CET1976173>
7. Kurylo, M., & Plotnikov, O. (2020). Quality Parameters of Ukrainian Iron Ore Deposits and Their Compliance with Modern Technological Processes. *SGEM 2020*. DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.1/s01.033>
8. Levchenko, N., Shyshkanova, H., Abuzelidzye, H., Zelenin, Y., Prykhodko, V., & Koval's'kyi, M. (2022). Global Trends of Decarbonisation as Determining Factor for Development of External Economic Activity of Metallurgical Enterprises. *Rural Sustainability Research*. no 47 (342), pp. 74–75. DOI: 10.2478/plua-2022-0008.
9. Ryabchyn, O., Kulaha, D., Andrushevych, O., Andrushchenko, S., & Dyachuk, O. (2023) Zelene vidnovlennya Ukrainy: kerivni pryntsypy ta instrumenty dlya tykh, khto ukhvalyuye rishennya. [Ukraine's Green Recovery: Guiding Principles and Tools for Decision-Makers] PROON. Available at: <https://undp-ua-green-recovery-rus.pdf>
10. Khorol's'kyi, K.D. (2014). Tekhnolohichno-innovatsiyina stratehiya rozvytku hirnycho-metallurhiynoho klasteru rehionu. [Technological and innovative strategy for the development of the mining and metallurgical cluster of the region] *Investytsiyi: praktyka ta dosvid*. no. 7, pp. 135–143.
11. Pulina, T.V., & Khrystenka, O.V. (2015). Otsinka peredumov stvorennya klasteru na bazi metallurhiynoho kompleksu rehionu. [Assessment of the prerequisites for creating a cluster based on the region's metallurgical complex] *Efektivna ekonomika: elektronne profesiynne vydannya*. no 5. Available at: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=4810>.
12. Kurylo, M. M., Stishylo, I.V., & Kosharna, S.K. (2021). Indeksy dostupnosti krytychnoyi mineral'noyi syrovyny dlya "zelenoyi" enerhetyky. [Indices of availability of critical mineral raw materials for "green" energy] *Mineral'ni resursy Ukrainy*. no. 4, pp. 16–20. DOI: <https://doi.org/10.31996/mru.2021.4.16-20>
13. Borysyak, O.V. (2022). Perekhid do klimatychno-neytral'nykh innovatsiy pidpryemstv na enerhetychnomu rynku. [Transition to climate-neutral business innovations in the energy market] *Infrastruktura rynku*. no 67, pp. 92–97. DOI: <https://doi.org/10.32843/infrastruct67-17>
14. European Commission. CBAM Impact Assessment. Available at: <https://ec.europa.eu/>.
15. Ministerstvo zakhystu dovkillya ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. Yak zminyvalosya kil'kist' vykydiv parnykovykh haziv v Ukraini protyhom 30 rokiv? [Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. How have greenhouse gas emissions changed in Ukraine over the past 30 years?] Available at: <https://mepr.gov.ua/yak-zminyvalas-kilkist-vykydiv-parnykovykh-gaziv-v-ukrayini-uprodovzh-30-rokiv/>
16. International Energy Agency. Direct CO<sub>2</sub> intensity in iron and steel, 2000–2018. Available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/direct-co2-intensity-in-iron-and-steel-2000-2018>.
17. Sun, M., Pang, K., Barati, M., & Meng, X. (2024). Hydrogen-Based Reduction Technology in Low-Carbon Sustainable Ironmaking and Steelmaking: A Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*. no. 10, pp. 10–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40831-023-00772-4>
18. Bode, A., Agar, D.W., Bükler, K., Göke, V., Hensmann, M., Janhsen, U., Klingler, D., Schlichting, J., & Schunk, SA. (2014). Proceedings of the World Hydrogen Energy Conference (WHEC 2014). Available at: <https://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com/en/media/press-releases/research-cooperation-develops-innovative-technology-for-environmentally-sustainable-syngas-production-from-carbon-dioxid>.
19. Tang, J., Chu, MS, Li, F., et al. (2020). Rozvytok i prohres na hydrogen metallurgy. *International Journal of*

Minerals, *Metallurgy and Materials*. no. 27, pp. 713–723. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2021-4>

20. Majumder, A., & Phani, M.K. (2024). Green Steel Technology: A Viable Approach dlya Sustainable World. *Protседury mizhnarodnoyi konferentsiyi z metalurhiynoyi arkhitektury ta dennoyi yustytsiyi (METCENT 2023)*. In: Patra S., Sinha S., Mahobia G. S., Kamble D. (eds). Springer, Singapore. pp. 366–374. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-6863-3\\_36](https://doi.org/10.1007/978-981-99-6863-3_36)

21. Thyssenkrupp Steel. H2Stahl: A Hydrogen Revolution in Steelmaking. Thyssenkrupp Official Website. 2019. Available at: <https://www.thyssenkrupp.com/>

22. Dokso, A. HBIS Group Pioneers Hydrogen Metallurgy, Transforming Steel Industry. *Green Hydrogen News*. 29.05.2023. Available at: <https://energynews.biz/>

23. European Commission. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) Impact Assessment Report. 2020. Available at: <https://ec.europa.eu/>

24. Wan, F., & Li, J. (2024). Exploring hydrogen metallurgy to CO<sub>2</sub> emissions reduction in China's iron and steel production: Analysis based on the life cycle CO<sub>2</sub> emissions – LEAP model. *Energy Reports*. no. 11, pp. 4552–4563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egyр.2024.04.028>

*Стаття надійшла 26.01.2025*