

КУХАР Володимир Валентинович

доктор технічних наук, професор,
проректор з науково-дослідної роботи, професор кафедри металургії та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
<https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>
e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

ШКРАБАК Ірина Володимирівна

доктор економічних наук, професор,
професор кафедри металургії та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
<https://orcid.org/0009-0004-4854-7838>
e-mail: irina.shkrabak@mipolytech.education

ШАУЛЬСЬКА Лариса Володимирівна

доктор економічних наук, професор,
професор кафедри металургії та організації виробництва
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
професор кафедри економіки підприємства,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
<https://orcid.org/0000-0002-7919-6733>
e-mail: shaulskayalv@gmail.com

ЮЗЕФОВИЧ Олег Анатолійович

здобувач рівня вищої освіти
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
e-mail: oleh.yuzefovych@mipolytech.education

БОЖЕНКО Давід Денисович

здобувач рівня вищої освіти,
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
e-mail: david.bozhenko@mipolytech.education

ГЛОБАЛЬНИЙ РОЗВИТОК ВОДНЕВИХ КЛАСТЕРІВ ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЇ В КОНТЕКСТІ УПРАВЛІННЯ КОНКУРЕНТОСПРОМОЖНІСТЮ ПІДПРИЄМСТВ ГАЛУЗІ

У статті досліджено світовий досвід створення водневих кластерів та обґрунтовано їхню роль у декарбонізації металургійної галузі України. Проведено аналіз зарубіжних практик впровадження водневих технологій у важку промисловість на прикладі Німеччини, Франції, Нідерландів, США, Японії та Австралії, а також визначено ключові підходи до їх адаптації в національних умовах. Визначено основні переваги кластерного підходу, серед яких оптимізація витрат на транспортування водню, зменшення викидів CO₂, інтеграція відновлюваних джерел енергії та підвищення конкурентоспроможності металургійних підприємств. Оцінено економічні та технічні передумови створення водневого кластеру на базі активів Групи Метінвест, а також розглянуто перспективи залучення міжнародних інвестицій і кооперації з іноземними партнерами. Запропоновано модель інтеграції водневих технологій у металургійний комплекс України, що передбачає модернізацію виробничих потужностей, створення водневої логістичної мережі та розбудову дослідницьких центрів для розробки інноваційних рішень. Визначено ключові виклики впровадження водневих кластерів, зокрема високу вартість початкових інвестицій, необхідність створення відповідної інфраструктури та потребу у державній підтримці. Обґрунтовано стратегічні напрямки розвитку водневої економіки в Україні, включаючи розробку державної політики стимулювання, інтеграцію науково-дослідних установ у процес кластеризації та залучення іноземних інвесторів. Результати дослідження свідчать про перспективність водневих технологій для підвищення екологічної ефективності української металургії та її інтеграції в світовий низьковуглецевий ринок сталі. Запропоновані рекомендації можуть бути використані для розробки національної стратегії розвитку водневої промисловості та адаптації передового міжнародного досвіду до українських реалій.

Ключові слова: управління конкурентоспроможністю, водневі кластери, альтернативні енергоносії, декарбонізація металургії, зелений водень, блакитний водень.

KUKHAR Volodymyr, SHKRABAK Iryna

TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC

SHAULSKA Larysa

TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC,
Taras Shevchenko National University of Kyiv

YUZEFOVYCH Oleh, BOZHENKO David

TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC

GLOBAL HYDROGEN CLUSTER DEVELOPMENT FOR METALLURGY DECARBONIZATION AND INDUSTRIAL COMPETITIVENESS MANAGEMENT

The article examines the global experience of creating hydrogen clusters and substantiates their role in decarbonising the metallurgical industry of Ukraine. The article analyses foreign practices of introducing hydrogen technologies into heavy

industry on the example of Germany, France, the Netherlands, the USA, Japan and Australia, and identifies key approaches to their adaptation to national conditions. The main advantages of the cluster approach are identified, including optimisation of hydrogen transportation costs, reduction of CO₂ emissions, integration of renewable energy sources and increase of competitiveness of metallurgical enterprises. The economic and technical prerequisites for the creation of a hydrogen cluster based on Metinvest Group's assets are assessed, and the prospects for attracting international investment and cooperation with foreign partners are considered. A model for the integration of hydrogen technologies into the Ukrainian metallurgical complex is proposed, which includes the modernisation of production facilities, the creation of a hydrogen logistics network and the development of research centres to develop innovative solutions. The key challenges to the implementation of hydrogen clusters are identified, including the high cost of initial investment, the need to create appropriate infrastructure and the need for government support. The article substantiates strategic directions for the development of the hydrogen economy in Ukraine, including a state incentive policy, integration of research institutions into the clustering process, and attraction of foreign investors. The results show the prospects of hydrogen technologies for improving the environmental efficiency of Ukrainian metallurgy and its integration into the global low-carbon steel market. The proposed recommendations can be used to develop a national strategy for the hydrogen industry and adapt international best practices to Ukrainian realities.

Keywords: competitiveness management, hydrogen clusters, alternative energy sources, heavy metallurgy, decarbonization of metallurgy, green hydrogen, blue hydrogen.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Українська металургія в сучасних умовах переживає не кращі часи. До втрати металургійних підприємств на сході країни, руйнівної військової агресії та інших чинників військово-політичної ситуації додаються глобальні тренди, які вимагають нових підходів до управління конкурентоспроможністю вітчизняних металургійних підприємств та їх продукції. Одним з таких трендів є перехід до «зеленої металургії». Проблеми сталого розвитку сучасної промисловості зумовлюють необхідність пошуку альтернативних енергоносіїв для зниження негативного впливу на довкілля. В той же час, пошук повинен ґрунтуватись на існуючому зарубіжному досвіді. Таке зауваження ґрунтується на тому, що: по-перше саме вивчення зарубіжного досвіду є актуальним з огляду на процеси глобалізації України, а по-друге - зарубіжні країни продемонструвати високу результативність в удосконаленні промислових виробництв з урахуванням факторів екологізації, що позитивно позначається на їх конкурентоспроможності. Тому, важливою виявляється проблема вивчення глобального розвитку водневих кластерів в зарубіжних країнах з метою обґрунтування можливостей для декарбонізації металургії в Україні.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Металургійна галузь є однією з найбільш енергоємних та призводить до значних викидів парникових газів, таких як CO₂, SO₂ та NO_x [1, 2]. Викиди від традиційних металургійних процесів, таких як виплавка сталі у кисневих конверторах та мартенівських печах, при виробництві чавуну в доменних печах, не лише забруднюють атмосферу, але й суттєво впливають на здоров'я населення та екологічний стан регіонів з високою концентрацією металургійних підприємств [3, 4]. Впровадження водневої енергетики у металургійні процеси відкриває нові можливості для зниження залежності від викопних видів палива, таких як природний газ та вугілля, та забезпечення екологічної безпеки виробництва [5, 6].

Світовий досвід демонструє, що у країнах Європейського Союзу водневі технології вже активно використовуються у промисловості, зокрема у сталеплавильних виробництвах, що дозволяє знижувати викиди CO₂ до 80% і навіть більше [7–10]. Наприклад, у Німеччині, Франції, Нідерландах активно впроваджуються водневі проекти для декарбонізації металургійної галузі [10–13]. Такі ініціативи підтримуються міжнародними організаціями, зокрема International Energy Agency (IEA) [14] та European Hydrogen Backbone (EHB) [15], що досліджують перспективи використання водню для декарбонізації промислових кластерів та створення єдиної водневої інфраструктури [16–18]. Металургійні підприємства, такі як ThyssenKrupp у Німеччині та HBIS Group у Китаї, вже активно впроваджують водневі технології, що дозволяє їм знижувати викиди CO₂ та забезпечувати конкурентні переваги на світовому ринку сталі [19, 20]. Крім того, міжнародні ініціативи, такі як Green Deal та Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe, сприяють розвитку водневих кластерів у країнах ЄС [21–24].

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ, КОТРИМ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ СТАТТЯ

Поряд із цим, незважаючи на значну кількість напрацювань в сфері окресленої проблематики, існує потреба в проведенні комплексного системного дослідження можливостей запозичення для України зарубіжного досвіду впровадження водневих кластерів. Тому методологія дослідження базується на системному аналізі даних щодо активів Групи Метінвест, впровадження водневих технологій та оптимізації металургійних процесів. Системний аналіз розглядає металургійну галузь як комплексну систему, враховуючи взаємодію її компонентів і зовнішніх факторів, що дозволяє виявити ключові зв'язки, оцінити ефективність рішень та оптимізувати процеси. Основні принципи: цілісність (аналіз галузі як єдиної системи), ієрархічність (розгляд структури та рівнів управління), цілеспрямованість (спрямування на досягнення стратегічних цілей), взаємодія з середовищем (оцінка впливу ринку та екологічних факторів), адаптивність (врахування змінних

умов) та оптимізація (пошук найбільш ефективних рішень). Застосування цього підходу дозволяє оцінити потенціал створення металургійного кластеру з водневими технологіями в Україні та визначити шляхи його ефективного впровадження.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є аналіз розвитку водневих кластерів і обґрунтування можливостей для декарбонізації металургії в Україні як одного із шляхів підвищення конкурентоспроможності вітчизняних металургійних підприємств. Для оцінки можливостей впровадження водневих технологій у металургію на основі активів Групи Метінвест застосовано такі підходи: економічний аналіз (оцінка вартості виробництва, транспортування водню, витрат на модернізацію, розрахунок окупності інвестицій); техніко-економічне обґрунтування (визначення оптимальної потужності, типу електролізерів, логістичних рішень та водневої інфраструктури); аналіз чутливості (оцінка впливу змін вартості електроенергії та сировини на економіку проекту); моделювання сценаріїв (розробка варіантів реалізації з урахуванням геополітичних ризиків та ринкових змін).

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

В процесі управління конкурентоспроможністю металургійних підприємств України виокремилися кілька факторів впливу, які потребують визначення нових шляхів до її забезпечення:

- втрата потужностей гірничо-металургійного комплексу призвела до переходу на покупку сировини і втрату частини високомаржинальних продуктів;
- світовий тренд контролю викидів прийнятий до поетапного впровадження, і ключові гравці металургійного ринку ЄС намагаються завершити проекти по переходу на нові екологічні вимоги вже у 2025-2027 роках;
- розвиток ринків вимагає зростаючого рівня якості продукції для високої маржі та утримання частки ринків;
- розвиток нових технологій надає нові можливості, впровадження яких забезпечує конкурентоспроможність підприємства.

Зазначене потребує вивчення досвіду інших країн щодо забезпечення конкурентоспроможності металургійного підприємства, заснованого на засадах екологізації виробництва у галузі. Так, світовий досвід впровадження водневих кластерів демонструє їхню ефективність у декарбонізації важкої промисловості, зокрема металургії та хімічного виробництва. У країнах Європейського Союзу, таких як Німеччина, Нідерланди та Франція, водневі кластери стали ключовим елементом у стратегічних програмах досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Згідно з дослідженнями, водневі кластери в Німеччині об'єднують виробників сталі, постачальників водню, енергетичні компанії та дослідницькі установи, що дозволяє зменшити викиди CO₂ до 80% порівняно з традиційними технологіями виробництва сталі [28]. Прикладом є промисловий регіон Рур, де створено кілька водневих кластерів, зокрема «HySteel» та «Hydrogen Valley», які об'єднують великі металургійні компанії та виробників водню [29]. Ці кластери підтримуються державою, зокрема через програми фінансування розвитку зеленої енергетики та інновацій.

У Нідерландах функціонує водневий кластер «H-Vision», який зосереджується на використанні синтетичного водню для зниження викидів вуглецю у важкій промисловості. Учасники цього кластеру планують впровадити технології виробництва «блакитного» водню з подальшим переходом на «зелений» водень із відновлюваних джерел [30]. Одним з ключових досягнень проекту є побудова інфраструктури для зберігання та транспортування водню, що охоплює морські порти та основні промислові райони країни. Це рішення дозволяє зменшити логістичні витрати та забезпечити стабільність постачання водню до металургійних підприємств.

Франція також активно розвиває водневі технології у металургії через проєкт «HYDROGENE Plan», який передбачає створення інтегрованих водневих кластерів у регіонах з високою концентрацією важкої промисловості. У рамках цього проєкту державне фінансування виділяється на дослідження ефективності використання водню у виробництві сталі, а також на розробку спеціальних турбін та паливних елементів для зниження енерговитрат [16]. За оцінками французьких дослідників, впровадження водневих технологій дозволить зменшити викиди CO₂ на 70% та створити до 50 000 нових робочих місць у сфері водневої енергетики до 2030 року [31].

У Північній Америці також активно впроваджуються водневі кластери для підтримки важкої промисловості. У США ініціатива «Hydrogen Economy» передбачає створення водневих кластерів на базі металургійних підприємств у штатах Огайо та Пенсільванія, де водень використовується як енергоносіє для плавлення сталі та зменшення викидів вуглецю. Дослідження показали, що інтеграція водню в існуючі виробничі ланцюги може знизити викиди на 65%, а також збільшити продуктивність підприємств [32].

Позитивний досвід впровадження водневих кластерів демонструє також Японія, яка активно інвестує у розвиток водневої інфраструктури для підтримки важкої промисловості та зменшення викидів. Проєкт «Fukushima Hydrogen Energy Research Field» є прикладом створення водневого кластеру на базі інноваційного дослідницького центру, де водень виробляється з використанням відновлюваної енергії сонця та вітру. Цей кластер націлений на розвиток технологій зберігання та транспортування водню, що має сприяти розвитку екологічної промисловості та підвищенню енергоефективності підприємств [33].

Таблиця 1

Порівняння основних характеристик водневих кластерів у Європі, Північній Америці, Азії, Австралії та Африці

Характеристика	Європа	Північна Америка	Азія	Австралія	Африка
Основні регіони впровадження	Німеччина, Нідерланди, Франція, Норвегія	США (штати Огайо, Пенсільванія), Канада (Альберта)	Китай, Японія, Південна Корея, Індія	Західна Австралія, Квінсленд, Вікторія	Південна Африка, Марокко, Єгипет
Цілі створення	Декарбонізація важкої промисловості, зниження викидів CO ₂ , підтримка сталого розвитку	Декарбонізація металургійної та хімічної промисловості, зменшення залежності від викопного палива	Забезпечення енергетичної незалежності, зниження викидів CO ₂ , підтримка розвитку водневої економіки	Створення водневої економіки, зменшення залежності від викопного палива, розвиток експортного потенціалу	Декарбонізація енергетичного сектору, розвиток зеленої енергетики, зменшення залежності від імпорту викопного палива
Тип водню	Зелений водень (отриманий з відновлюваних джерел енергії)	Блакитний водень (отриманий з природного газу з використанням CCS технологій), зелений водень	Зелений водень, блакитний водень, водень з біомаси	Зелений водень, аміак як енергоносії	Зелений водень (сонячна та вітрова енергетика)
Основні учасники	Виробники сталі, водневі компанії, науково-дослідні установи, урядові організації	Металургійні компанії, енергетичні компанії, урядові агентства	Металургійні та хімічні компанії, урядові організації, дослідницькі центри	Великі енергетичні компанії, дослідницькі інститути, міжнародні інвестори	Енергетичні компанії, уряди країн, міжнародні інвестори
Фінансування	Переважно державні програми, гранти ЄС, інвестиції приватних компаній	Державні програми, інвестиції великих компаній (Shell, BP)	Державні інвестиції, інвестиції від приватних компаній (Toyota, Hyundai), міжнародні гранти	Державні гранти, інвестиції від міжнародних компаній (Shell, BP), фінансування від приватного сектору	Міжнародні гранти, державні програми, інвестиції від міжнародних організацій (WB, IMF)
Інфраструктура	Розвинена інфраструктура для транспортування водню, трубопроводи, морські порти	Трубопроводи, морські термінали для експорту	Трубопроводи, морські термінали, розвинена внутрішня інфраструктура	Порти для експорту, трубопроводи, плани на будівництво водневих центрів	Розвиток нових інфраструктурних об'єктів для виробництва та експорту водню
Технології зберігання	Кріогенні технології, високотемпературне зберігання	Використання глибоких сховищ для зберігання водню	Кріогенні технології, використання глибоких сховищ, зберігання у гідридних сполуках	Кріогенні технології, перетворення водню в аміак для зберігання та транспортування	Використання сонячної енергії для виробництва, розробка нових технологій зберігання
Економічний ефект	Зниження викидів CO ₂ на 60-80%, підвищення конкурентоспроможності продукції на світових ринках	Зниження викидів CO ₂ на 50-70%, збільшення обсягів виробництва сталі з низькими викидами	Зниження викидів CO ₂ на 50-75%, розвиток внутрішнього ринку водню, збільшення експорту продукції	Збільшення експорту, зниження викидів CO ₂ на 70%, створення водневих центрів для виробництва та експорту	Зниження викидів CO ₂ на 60-80%, розвиток зеленої енергетики, можливість експорту на європейські ринки
Соціальний ефект	Створення нових робочих місць, розвиток регіонів з важкою промисловістю	Збереження робочих місць у традиційній металургійній галузі, перекваліфікація працівників	Створення нових робочих місць, розвиток регіонів, підтримка традиційної промисловості	Збільшення зайнятості у віддалених регіонах, розвиток інфраструктури	Покращення економічної ситуації, створення нових робочих місць, зменшення енергозалежності
Основні виклики	Висока вартість впровадження, необхідність модернізації існуючої інфраструктури	Відсутність розвиненої інфраструктури, необхідність великих інвестицій у модернізацію	Недостатня інтеграція регіональних ринків, необхідність адаптації до різних екологічних стандартів	Віддалене розташування від основних ринків збуту, необхідність розвитку морських шляхів	Проблеми з інфраструктурою, політична нестабільність, залежність від міжнародної підтримки

В Україні створення водневих кластерів є актуальним з огляду на необхідність модернізації металургійної галузі та інтеграції в європейський ринок [34]. Сучасні виклики для української економіки, зокрема необхідність зниження викидів парникових газів, забезпечення енергетичної незалежності та підвищення конкурентоспроможності продукції, вимагають впровадження новітніх технологій, серед яких водневі технології відіграють ключову роль [35]. Водночас, у вітчизняній науковій літературі недостатньо досліджено питання інтеграції кластерного підходу в контексті створення водневої інфраструктури для металургійних підприємств. Це визначає необхідність поглибленого дослідження даної теми з урахуванням специфіки української економіки та промислових активів [36].

Створення водневих кластерів в Україні на основі активів Групи Метінвест може стати стратегічним кроком на шляху досягнення кліматичної нейтральності та декарбонізації металургійної галузі. Підприємства Групи Метінвест, такі як Запоріжсталь та «Камет-Сталь», мають потужну виробничу базу та кваліфіковані кадри, що дозволяє реалізувати проекти з використання водню у виробничих процесах [37]. Інтеграція водневих технологій у виробництво не лише підвищить екологічні стандарти підприємств, але й створить нові можливості для експорту продукції на ринки Європейського Союзу, де існує високий попит на зелену сталь [38].

Отже, за результатами літературного огляду можна зробити висновок про наявність великої кількості аналітичних досліджень в сфері застосування кластерів в процесі удосконалення металургійної промисловості. При цьому в кожній країні використання водневих кластерів має власні характеристики та особливості застосування, що узагальнено в таблиці 1.

Як видно з таблиці 1, водневі кластери мають широке розповсюдження в країнах Європи, Північної Америки, Азії та Африки з метою декарбонізації важкої промисловості.

При цьому всі, окрім країн Північної Америки, використовують зелений водень. Фінансування таких проектів здійснюється в основному за рахунок державних грантів. В той же час, на шляху розповсюдження таких технологій стоїть значна кількість викликів: починаючи із високої вартості впровадження та закінчуючи недостатньою розвиненістю інфраструктури для забезпечення необхідних процесів.

За результатами проведеного дослідження можна узагальнити наступні рекомендації для належного рівня адаптації зарубіжного досвіду використання водневих кластерів до національного середовища:

1. Розробка державної стратегії підтримки водневої економіки. Запровадження комплексної державної політики, що включає податкові пільги, субсидії на створення інфраструктури та підтримку дослідницьких проектів, сприятиме прискоренню впровадження водневих технологій.

2. Інтеграція науково-дослідних установ у процес кластеризації. Створення спільних науково-виробничих центрів з дослідження водневих технологій дозволить оптимізувати процеси впровадження новітніх розробок у виробництво.

3. Залучення міжнародних інвесторів. Співпраця з міжнародними організаціями, такими як Європейський банк реконструкції та розвитку, Світовий банк та інші, може забезпечити необхідне фінансування для розвитку водневих кластерів.

4. Впровадження інноваційних логістичних рішень. Використання нових методів транспортування та зберігання водню, включаючи криогенні технології, дозволить знизити витрати на логістику та підвищити безпеку постачання.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Таким чином, міжнародний досвід демонструє, що впровадження водневих кластерів у металургійній галузі є ефективним інструментом для декарбонізації промисловості, підвищення конкурентоспроможності та зниження енергетичних витрат. Для України важливо розробити власну стратегію впровадження водневих кластерів, враховуючи специфіку національної економіки та географічне розташування промислових об'єктів, що стане запорукою успішної модернізації металургійної галузі та інтеграції у світовий ринок зелених технологій [39].

З урахуванням зазначеного, можна констатувати, що перспективи для декарбонізації металургії в Україні існують, але можуть бути ефективно реалізовані на основі розробленого інструментарію стратегічного планування.

При цьому в якості напрямку подальших досліджень доцільно зазначити необхідність удосконалення методичного підґрунтя державного регулювання процесів впровадження водневих кластерів в важку металургію.

Література

1. Koolen, D., Vidovic, D. Greenhouse Gas Intensities of the EU Steel Industry and its Trading Partners. EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2022. ISBN 978-92-76-53417-4. DOI: 10.2760/170198. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/>.

2. Pandit, J., Watson, M., Qader, A. Reduction of Greenhouse Gas Emission in Steel Production Final Report. CO2CRC Ltd, Melbourne, Australia, CO2CRC Publication Number RPT20-6205, March 2020. URL:

<http://www.co2crc.com.au/>.

3. Kharytonov, M., Bensehoub, A., Kryvakovska, R., Klimkina, I., Bouhedja, A., Bouabdallah, S., Chaabia, R., & Vasylyeva, T. (2017). Risk assessment of aerotechnogenic pollution generated by industrial enterprises in Algeria and Ukraine. *Studia Universitatis “Vasile Goldiș”, Seria Științele Vieții*, no. 27(2), pp. 99-104. URL: <https://www.studiauniversitatis.ro/2014/11/17/risk-assessment-of-aerotechnogenic-pollution-generated-by-industrial-enterprises-in-algeria-and-ukraine/>.

4. Alimbaev, T., Mazhitova, Z., Beksultanova, C., & TentigulKyzy, N. Activities of mining and metallurgical industry enterprises of the Republic of Kazakhstan: Environmental problems and possible solutions. *E3S Web of Conferences*, 2020, no. 175, Article 14019. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017514019>.

5. 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., & Pan, S. Industrial status, technological progress, challenges, and prospects of hydrogen energy. *Natural Gas Industry B*, 2022, no. 9(5), pp. 427-447. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.04.006>.

6. Okolie, J. A., Patra, B. R., Mukherjee, A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. no. 46(13), pp. 8885-8905. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.014>.

7. Rolo, I., Costa, V. A. F., & Brito, F. P. Hydrogen-based energy systems: Current technology development status, opportunities and challenges. *Energies*, 2024. no. 17(1), pp. 180. URL: <https://doi.org/10.3390/en17010180>.

8. Rodríguez Diez, J., Tomé-Torquemada, S., Vicente, A., Reyes, J., & Orcajo, G. A. Decarbonization pathways, strategies, and use cases to achieve net-zero CO₂ emissions in the steelmaking industry. *Energies*, 2023. no. 16(21), Article 7360. URL: <https://doi.org/10.3390/en16217360>.

9. Wan, F., Li, J., Han, Y., & Yao, X. Research of the impact of hydrogen metallurgy technology on the reduction of the Chinese steel industry's carbon dioxide emissions. *Sustainability*, 2024. no. 16(5), Article 1814. URL: <https://doi.org/10.3390/su16051814>.

10. European Commission. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) Impact Assessment Report. 2020. URL: https://commission.europa.eu/law/law-topic/environmental-law_en.

11. Carmona-Martínez, A. A., Rontogianni, A., Zeneli, M., Grammelis, P., Birgi, O., Janssen, R., Di Costanzo, B., Vis, M., Davidis, B., Reumerman, P., et al. Charting the course: Navigating decarbonisation pathways in Greece, Germany, The Netherlands, and Spain's industrial sectors. *Sustainability*, 2024, no. 16, Article 6176. URL: <https://doi.org/10.3390/su16146176>.

12. Serrano, J. Decarbonizing energy intensive industries: Country study France. Final report for the European Trade Union Institute (ETUI). 2021. URL: <https://www.etui.org/sites/default/files/2022-08/Decarbonizing%20energy%20intensive%20industries%20-%20France%20-%20Serrano.pdf>.

13. Schneider, C. Steel manufacturing clusters in a hydrogen economy – Simulation of changes in location and vertical integration of steel production in Northwestern Europe. *Journal of Cleaner Production*, 2022, no. 341, Article 130913. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130913>.

14. International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023#overview>.

15. European Hydrogen Backbone (EHB) Initiative. (n.d.). The European Hydrogen Backbone. URL: <https://ehb.eu/>.

16. Trofymenko, O., Voitko, S., Moki, A., Ilyash, O., Kuzminska, N. Cluster analysis of decarbonisation of the regional economy in the context of the potential of united territorial communities. *SHS Web of Conferences*, 2021, no. 129, Article 08020. URL: <https://doi.org/10.1051/shsconf/202112908020>.

17. Al Qahtani, H., Sankar, J. P. The cluster analysis in the aluminium industry with K-means method: an application for Bahrain. *Cogent Business & Management*, 2024, no. 11(1), Article 2361475. URL: <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2361475>.

18. Rattle, I., & Taylor, P. G. Factors driving the decarbonisation of industrial clusters: A rapid evidence assessment of international experience. *Energy Research & Social Science*, 2023. no. 105, Article 103265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103265>.

19. Lechtenböhrer, S., Schneider, C., Yetano Roche, M., & Höller, S. Re-Industrialisation and Low-Carbon Economy—Can They Go Together? Results from Stakeholder-Based Scenarios for Energy-Intensive Industries in the German State of North Rhine Westphalia. *Energies*, 2015. no. 8, pp. 11404-11429. URL: <https://doi.org/10.3390/en81011404>.

20. Lin, Y., Yang, H., Ma, L., Li, Z., & Ni, W. Low-Carbon Development for the Iron and Steel Industry in China and the World: Status Quo, Future Vision, and Key Actions. *Sustainability*, 2021. no. 13, Article 12548. URL: <https://doi.org/10.3390/su132212548>.

21. Włodarczyk, R., & Kaleja, P. Modern Hydrogen Technologies in the Face of Climate Change—Analysis of Strategy and Development in Polish Conditions. *Sustainability*, 2023. no. 15(17), Article 12891. URL: <https://doi.org/10.3390/su151712891>.

22. Stoicescu, V., Vrabie, C., & Bitoiu, T. Energy ecosystems layered over hydrogen valleys for sustainable smart communities. Strategic framework for the Green Deal Industrial Plan implementation in Romania. *Smart Cities*

International Conference (SCIC) Proceedings, 2024. no. 11, pp. 443–498. URL: <https://www.scrd.eu/index.php/scic/article/view/513>.

23. Firoiu, D., Pirvu, R., Jianu, E., Cismaș, L. M., Tudor, S., & Lățeș, G. Digital Performance in EU Member States in the Context of the Transition to a Climate Neutral Economy. *Sustainability*, 2022. no. 14, pp. 3343. URL: <https://doi.org/10.3390/su14063343>.

24. Ulpiani, G., & Vetter, N. On the risks associated with transitioning to climate neutrality in Europe: A city perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023. no. 183, Article 113448. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113448>.

25. European Clusters Panorama 2021: Towards a Resilient Economy. European Commission. 2021. 38 p. URL: https://eisma.ec.europa.eu/news/european-clusters-panorama-2021-towards-resilient-economy-2021-12-16_en

26. Eco-Clusters for a Green Economy. Greenovate! Europe. Brussels: Greenovate! Europe, 2020. 28 p. URL: https://greenovate-europe.eu/wp-content/uploads/2020/08/Ecoclup_booklet.pdf.

27. International Renewable Energy Agency (IRENA). Green hydrogen: A guide to policy making. Abu Dhabi: IRENA, 2020. 52 p. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf

28. Al Qahtani, H., Sankar, J. P. The cluster analysis in the aluminium industry with K-means method: an application for Bahrain. *Cogent Business & Management*, 2022. no. 11(1), Article 2361475. URL: <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2361475>.

29. Kosfeld, R., Mitze, T. (2020) Research and development intensive clusters and regional competitiveness. *Growth and Change*, 2020. no. 54(4), pp. 885-911. URL: <https://doi.org/10.1111/grow.12676>.

30. Schneider, C. Steel manufacturing clusters in a hydrogen economy – Simulation of changes in location and vertical integration of steel production in Northwestern Europe. *Journal of Cleaner Production*, 2022. no. 341, Article 130913. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130913>.

31. Мазур В. Металургія України: стан, конкурентоспроможність, перспективи. 2010. URL: https://zn.ua/ukr/energy_market/metalurgiya_ukrayini_stan_konkurentospromozhnist_perspektivi.html.

32. Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. Hydrogen: A renewable energy perspective. International Renewable Energy Agency, 2019.

33. Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M. R., Aggarwal, S. The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: the pivotal role of electricity. *Science*, 2018. no. 356(6331).

34. Bataille, C., Waisman, H., Colombier, M., Segafredo, L. J. The Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP): Insights and Emerging Issues. *Climate Policy*, 2018. no. 18(8).

35. Eurofer. A steel roadmap for a low carbon Europe 2050. European Steel Association, 2019.

36. International Energy Agency (IEA). Iron and Steel Technology Roadmap. IEA, 2020.

37. Valenzuela, A., Pontes, M., Sharman, H., Kirschner, M. Green hydrogen and steel production: Industrial decarbonization strategies. *Energy Reports*, 2021, no. 7.

38. Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Breyer, C. Global Energy System Based on 100% Renewable Energy: Power Sector. Lappeenranta University of Technology, 2018.

39. Vogl, V., Åhman, M., Nilsson, L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 2018. no. 203, pp. 736-745.

References

1. Koolen, D., Vidovic, D. (2022) Greenhouse Gas Intensities of the EU Steel Industry and its Trading Partners. EUR 31112 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, available at URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu>.

2. Pandit, J., Watson, M., Qader, A. (2020) Reduction of Greenhouse Gas Emission in Steel Production Final Report. CO2CRC Ltd, Melbourne, Australia, CO2CRC Publication Number RPT20-6205, available at URL: <http://www.co2crc.com.au>.

3. Kharytonov, M., Benselhou, A., Kryvakovska, R., Klimkina, I., Bouhedja, A., Bouabdallah, S., Chaabia, R., & Vasylyeva, T. (2017). Risk assessment of aerotechnogenic pollution generated by industrial enterprises in Algeria and Ukraine. *Studia Universitatis "Vasile Goldiș"*, Seria Științele Vieții, no. 27(2), pp. 99-104, available at URL: <https://www.studiauniversitatis.ro/2014/11/17/risk-assessment-of-aerotechnogenic-pollution-generated-by-industrial-enterprises-in-algeria-and-ukraine>.

4. Alimbaev, T., Mazhitova, Z., Beksultanova, C., & Tentigulkyzy, N. (2020). Activities of mining and metallurgical industry enterprises of the Republic of Kazakhstan: Environmental problems and possible solutions. *E3S Web of Conferences*, no.175, Article 14019. available at URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017514019>.

5. 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., & Pan, S. (2022). Industrial status, technological progress, challenges, and prospects of hydrogen energy. *Natural Gas Industry B*, no.9(5), pp.427-447, available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2022.04.006>.

6. Okolie, J. A., Patra, B. R., Mukherjee, A., Nanda, S., Dalai, A. K., & Kozinski, J. A. (2021). Futuristic applications of hydrogen in energy, biorefining, aerospace, pharmaceuticals and metallurgy. *International Journal of Hydrogen Energy*, no.46(13), pp.8885-8905, available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.014>.

7. Rolo, I., Costa, V. A. F., & Brito, F. P. (2024). Hydrogen-based energy systems: Current technology development status, opportunities and challenges. *Energies*, no. 17(1), pp. 180, available at URL: <https://doi.org/10.3390/en17010180>.

8. Rodríguez Diez, J., Tomé-Torquemada, S., Vicente, A., Reyes, J., & Orcajo, G. A. (2023). Decarbonization pathways, strategies, and use cases to achieve net-zero CO2 emissions in the steelmaking industry. *Energies*, no. 16(21), Article 7360, available at URL: <https://doi.org/10.3390/en16217360>.

9. Wan, F., Li, J., Han, Y., & Yao, X. (2024). Research of the impact of hydrogen metallurgy technology on the reduction of the Chinese steel industry's carbon dioxide emissions. *Sustainability*, no. 16(5), pp. 1814, available at URL: <https://doi.org/10.3390/su16051814>.

10. European Commission. Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) Impact Assessment Report. 2020, available at URL:

https://commission.europa.eu/law/law-topic/environmental-law_en.

11. Carmona-Martínez, A. A., Rontogianni, A., Zeneli, M., Grammelis, P., Birgi, O., Janssen, R., Di Costanzo, B., Vis, M., Davidis, B., Reumerman, P., et al. (2024). Charting the course: Navigating decarbonisation pathways in Greece, Germany, The Netherlands, and Spain's industrial sectors. *Sustainability*, no. 16, Article 6176, available at URL: <https://doi.org/10.3390/su16146176>.

12. Serrano, J. (2021). Decarbonizing energy intensive industries: Country study France. Final report for the European Trade Union Institute (ETUI), available at URL: <https://www.etui.org/sites/default/files/2022-08/Decarbonizing%20energy%20intensive%20industries%20-%20France%20-%20Serrano.pdf>.

13. Schneider, C. (2022) Steel manufacturing clusters in a hydrogen economy – Simulation of changes in location and vertical integration of steel production in Northwestern Europe. *Journal of Cleaner Production*, no. 341, Article 130913, available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130913>.

14. International Energy Agency. (2023). Global Hydrogen Review 2023, available at URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023#overview>.

15. European Hydrogen Backbone (EHB) Initiative. (n.d.). The European Hydrogen Backbone, available at URL: <https://ehb.eu/>

16. Trofymenko, O., Voitko, S., Mokiy, A., Ilyash, O., Kuzminska, N. (2021) Cluster analysis of decarbonisation of the regional economy in the context of the potential of united territorial communities. *SHS Web of Conferences* no. 129, Article 08020, available at URL: <https://doi.org/10.1051/shsconf/202112908020>.

17. Al Qahtani, H., Sankar, J. P. (2024) The cluster analysis in the aluminium industry with K-means method: an application for Bahrain. *Cogent Business & Management*, no. 11(1), Article 2361475, available at URL: <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2361475>.

18. Rattle, I., & Taylor, P. G. (2023). Factors driving the decarbonisation of industrial clusters: A rapid evidence assessment of international experience. *Energy Research & Social Science*, no.105, Article 103265, available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103265>

19. Lechtenböhrer, S., Schneider, C., Yetano Roche, M., & Höller, S. (2015). Re-Industrialisation and Low-Carbon Economy—Can They Go Together? Results from Stakeholder-Based Scenarios for Energy-Intensive Industries in the German State of North Rhine Westphalia. *Energies*, no.8, pp. 11404–11429, available at URL: <https://doi.org/10.3390/en8101404>.

20. Lin, Y., Yang, H., Ma, L., Li, Z., & Ni, W. (2021). Low-Carbon Development for the Iron and Steel Industry in China and the World: Status Quo, Future Vision, and Key Actions. *Sustainability*, no. 13, pp. 12548, available at URL: <https://doi.org/10.3390/su132212548>

21. Włodarczyk, R., & Kaleja, P. (2023). Modern Hydrogen Technologies in the Face of Climate Change—Analysis of Strategy and Development in Polish Conditions. *Sustainability*, no. 15(17), Article 12891, available at URL: <https://doi.org/10.3390/su151712891>.

22. Stoicescu, V., Vrabie, C., & Bitoiu, T. (2024). Energy ecosystems layered over hydrogen valleys for sustainable smart communities. Strategic framework for the Green Deal Industrial Plan implementation in Romania. *Smart Cities International Conference (SCIC) Proceedings*, no.11, pp. 443–498, available at URL: <https://www.scrd.eu/index.php/scic/article/view/513>.

23. Firoiu, D., Pirvu, R., Jianu, E., Cismaş, L. M., Tudor, S., & Lăţea, G. (2022). Digital Performance in EU Member States in the Context of the Transition to a Climate Neutral Economy. *Sustainability*, no. 14, Article 3343, available at URL: <https://doi.org/10.3390/su14063343>

24. Ulpiani, G., & Vettors, N. (2023). On the risks associated with transitioning to climate neutrality in Europe: A city perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, no. 183, Article 113448, available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113448>.

40. 25. European Clusters Panorama 2021: Towards a Resilient Economy. European Commission. 38 p., available at URL: https://eismaec.europa.eu/news/european-clusters-panorama-2021-towards-resilient-economy-2021-12-16_en.

26. Eco-Clusters for a Green Economy. Greenovate! Europe. Brussels: Greenovate! Europe, 2020. 28 p., available at URL: https://greenovate-europe.eu/wp-content/uploads/2020/08/Ecoclup_booklet.pdf.

27. International Renewable Energy Agency (IRENA). Green hydrogen: A guide to policy making. Abu Dhabi: IRENA, 2020. 52 p., available at URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf.

28. Al Qahtani, H., Sankar, J. P. (2022) The cluster analysis in the aluminium industry with K-means method: an application for Bahrain. *Cogent Business & Management*, no.11(1), Article 2361475, available at URL: <https://doi.org/10.1080/23311975.2024.2361475>.

29. Kosfeld, R., Mitze, T. (2020) Research and development intensive clusters and regional competitiveness. *Growth and Change*, no. 54(4), pp.885–911, available at URL: <https://doi.org/10.1111/grow.12676>.

30. Schneider, C. (2022) Steel manufacturing clusters in a hydrogen economy – Simulation of changes in location and vertical integration of steel production in Northwestern Europe. *Journal of Cleaner Production*, no.341, Article 130913, available at URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130913>.

31. Mazur V. (2010) Metalurhiia Ukrainy: stan, konkurentospromozhnist, perspektyvy [Metallurgy of Ukraine: status, competitiveness, prospects], available at URL: https://zn.ua/ukr/energy_market/metalurhiya_ukrayini_stan_konkurentospromozhnist_perspektivi.html.

32. Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. (2019) Hydrogen: A renewable energy perspective. *International Renewable Energy Agency*, 2019.

33. Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M. R., Aggarwal, S. (2018) The technology path to deep greenhouse gas emissions cuts by 2050: the pivotal role of electricity. *Science*, no. 356(6331).

34. Bataille, C., Waisman, H., Colombier, M., Segafredo, L. J. (2018) The Deep Decarbonization Pathways Project (DDPP): Insights and Emerging Issues. *Climate Policy*, no. 18(8).

35. Eurofer. A steel roadmap for a low carbon Europe 2050. European Steel Association, 2019.

36. International Energy Agency (IEA). Iron and Steel Technology Roadmap. IEA, 2020.

37. Valenzuela, A., Pontes, M., Sharman, H., Kirschner, M. (2021) Green hydrogen and steel production: Industrial decarbonization strategies. *Energy Reports*, no. 7.

38. Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Breyer, C. (2018) Global Energy System Based on 100% Renewable Energy: Power Sector. *Lappeenranta University of Technology*.

39. Vogl, V., Åhman, M., Nilsson, L. J. (2018) Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, no. 203, pp. 736–745.