

ОРГАНІЗАЦІЙНІ ЗАСАДИ ВПРОВАДЖЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ КЛАСТЕРІВ ТА ВІДНОВЛЕННЯ ПРОМИСЛОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ РОЗВИТКУ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

КУХАР Володимир¹, ШКРАБАК Ірина²,
ШАУЛЬСЬКА Лариса³, ЧУБ Наталія⁴, ПРИХОДКОВ Андрій⁵

¹ ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
<https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>

e-mail: kvv.mariupol@gmail.com

² ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
<https://orcid.org/0009-0004-4854-7838>

e-mail: Irina.Shkrabak@mipolytech.education

³ ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
<https://orcid.org/0000-0002-7919-6733>

e-mail: shaulskayalv@gmail.com

⁴ ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
e-mail: Natalya.Chub@mipolytech.education

⁵ ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
e-mail: andriy.prykhodkov@mipolytech.education

Стаття присвячена обґрунтуванню напрямів відновлення промислового потенціалу України та підвищення конкурентоспроможності металургійного сектору через впровадження водневих технологій. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку водневої економіки, зокрема створення водневих кластерів та їх роль у зниженні собівартості водню завдяки ефекту масштабу та централізованій логістиці. Визначено ключові переваги кластерного підходу для металургії, включаючи скорочення викидів CO₂, підвищення енергоефективності та відповідність міжнародним екологічним стандартам. На основі аналізу технічного стану підприємств запропоновано оптимальні локації для створення водневого кластеру на базі активів Групи Метінвест, що мають необхідну інфраструктуру для інтеграції водневих технологій. Запропоновано три сценарії впровадження водневого кластеру: базовий (мінімальні інвестиції), оптимальний (середній рівень модернізації) та інноваційний (повна трансформація виробництва). Розраховано економічну ефективність проєкту, зокрема очікуваний обсяг інвестицій (2,0–2,5 млрд євро), прогнозовані терміни окупності (8–10 років) та основні фактори, що впливають на фінансову стійкість. Розглянуто питання логістики та транспортування водню, запропоновано використання спеціалізованих трубопроводів для зниження витрат. Особливу увагу приділено воєнним ризикам та необхідності додаткових заходів із безпеки для забезпечення стабільної роботи металургійних підприємств в умовах військової агресії. Розроблено організаційні засади створення металургійних кластерів, представлені у вигляді десятирічної програми. Результати дослідження можуть бути використані для розробки стратегічних програм модернізації української металургії, залучення іноземних інвестицій та формування державної політики підтримки водневої економіки.

Ключові слова: кластерний підхід, водневі кластери, відновлювальні джерела енергії, декарбонізація металургії, організаційні засади.

<https://doi.org/10.31891/mdes/2025-15-14>

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

В сучасних умовах вагомим значення набувають проблеми пошуку альтернативних, найбільш безпечних, технологій в металургійній промисловості. Це пов'язано із вектором розвитку світової економіки на екологізацію виробництва, світовими тенденціями впровадження «зелених» технологій тощо.

В промислових зонах, портах та містах, активно створюються водневі кластери, зокрема у металургії, де вони сприяють інтеграції виробництва та споживання, скорочуючи витрати на транспортування та інфраструктуру. Оскільки головною проблемою водневої економіки залишається висока собівартість водню, кластеризація виробництва, включаючи водневі долини (hydrogen valleys) та хаби (hydrogen hubs), дозволяє знизити витрати завдяки ефекту масштабу, централізованій логістиці та спільному використанню ресурсів [12]. Крім того, такий підхід підвищує інвестиційну привабливість водневих проєктів і сприяє їх фінансуванню, що пришвидшує впровадження технологій у важкій промисловості, включаючи металургійний сектор [12].

Отже, можна констатувати, доцільність впровадження кластерного підходу на основі використання водневих технологій у чорну металургію України з метою нарощення її конкурентоспроможності. З урахуванням зазначеного, напрям даного дослідження можна вважати актуальним.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз досліджень і публікацій з окресленої проблематики показав, що напрям даного дослідження виступає предметом наукових дискусій [1-4], а також ґрунтовних теоретичних досліджень [5-9].

В той же час, доречно підкреслити, наявність вагомих аналітичних здобутків. Так, дослідження в *European Cluster Panorama 2021* [10] аналізує роль кластерів у сприянні економічній стійкості, зеленому та цифровому переходу в Європі, використовуючи такі методології, як статистичне картографування кластерів, типологізацію регіонів і оцінку конкурентоспроможності. Основні результати показують, що кластери відіграють ключову роль у підтримці інновацій, міжнародного співробітництва та адаптації до нових екологічних і цифрових стандартів, особливо для малих і середніх підприємств. Близько 70% членів кластерів – це малі та середні підприємства, які отримують доступ до нових ринків і технологій.

Основні результати, описані у *EcoCluP Booklet* [11], демонструють успішний розвиток міжнародної співпраці екологічних кластерів у Європі. Проект об'єднав понад 30 кластерних організацій, створив понад 500 партнерських зв'язків між компаніями та дослідницькими установами та сприяв інтернаціоналізації понад 300 малих і середніх підприємств у сфері екологічних інновацій. Також було впроваджено інструменти для підтримки інновацій, проведено серію тренінгів із залучення інвестицій та створено міжнародні бізнес-стратегії для кластерів-учасників.

ВИДІЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ, КОТРИМ ПРИСВЯЧУЄТЬСЯ СТАТТЯ

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених питанням підвищення конкурентоспроможності металургійних кластерів на основі розвитку водневих технологій, все ж таки, зазначену проблематику не можна вважати остаточно вирішеною. Таке зауваження ґрунтується на тому, що в існуючих дослідженнях майже відсутня прикладна доказовість та наочне відображення перспектив впровадження водневих технологій в металургійну промисловість.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

Метою статті є визначення стратегічних підходів до впровадження водневих технологій у металургійну галузь України. Дослідження спрямоване на розробку моделей створення водневих кластерів, оцінку їх економічної доцільності та впливу на екологічну стійкість виробництва. Також ставиться завдання окреслити ключові виклики та можливості для реалізації водневих проєктів у контексті військових ризиків та міжнародних тенденцій.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

За останніми даними, частка металургійної продукції у структурі експорту України знижувалась з 35,3% у 2019 році до 14,6% у 2023 році [13] (джерело [14] каже, навіть, про 7,42%). Не дивлячись на це металургійна промисловість України залишається стратегічно важливою галуззю економіки, яка суттєво впливає на експортний потенціал. Основними центрами металургійного виробництва є Запоріжжя, Кам'янське, Кривий Ріг, де зосереджені виробничі потужності Групи Метінвест – найбільшого гравця у цій галузі. Група Метінвест є вертикально інтегрованою компанією, яка об'єднує видобуток руди, виробництво металу та його подальшу реалізацію. Основні активи компанії розташовані у Кривому Розі (гірничозбагачувальні підприємства) та Запоріжжі і Кам'янському (виробництво сталі). З огляду на стратегічне розташування активів та наявність розвинутої логістичної інфраструктури, Метінвест має всі передумови для впровадження водневих технологій у виробництво сталі, а тому саме на базі підприємств Метінвесту пропонується впроваджувати розроблені напрями удосконалення.

При цьому пропозиції щодо відновлення промислового потенціалу України та забезпечення конкурентоспроможності металургійних кластерів на основі розвитку водневих технологій можуть бути систематизовані за наступними, сформульованими нижче, групами [15-17].

Підходи до створення та оптимізації металургійного кластеру. Запропонований кластерний підхід передбачає комплексну модернізацію металургійної галузі через інтеграцію водневих технологій. Дослідження технічного стану виробничих потужностей металургійних підприємств у Запорізькій та Дніпропетровській областях дозволило визначити можливості їх модернізації, зокрема заміну застарілих коксових технологій на водневі процеси виробництва сталі,

що сприятиме значному зниженню викидів CO₂ та підвищенню екологічної ефективності виробництва.

Виробництво зеленого водню. Аналіз регіональних енергетичних ресурсів показав, що найбільш доцільним є виробництво водню методом електролізу з використанням відновлюваної енергії (сонячної та вітрової), що робить південні та південно-східні регіони України оптимальними для розміщення водневих установок. Це відкриває перспективи для створення повноцінної інфраструктури "зеленої" металургії та інтеграції українських підприємств у глобальні низьковуглецеві виробничі ланцюги.

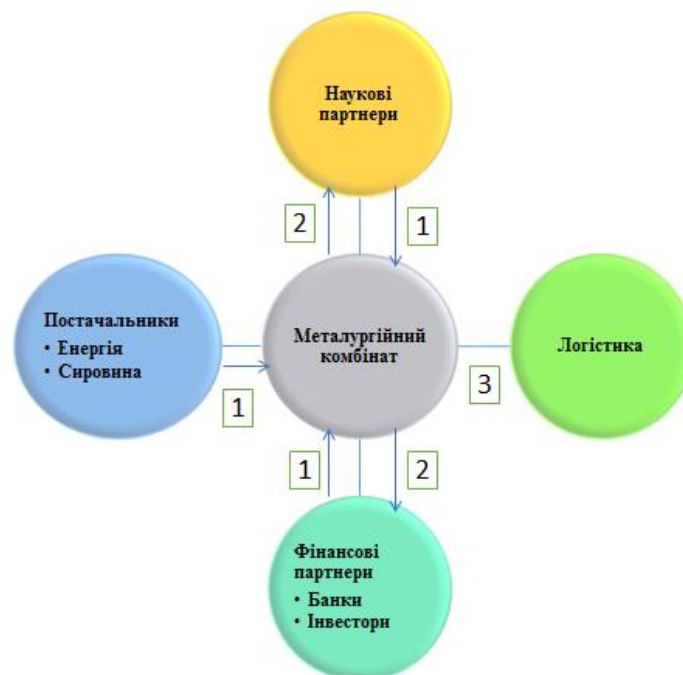
Створення водневої логістичної мережі. Створення водневої логістичної мережі передбачає будівництво спеціалізованих трубопроводів для транспортування водню від локального місця виробництва до основних металургійних центрів (Кривий Ріг, Запоріжжя), що дозволить знизити витрати порівняно з використанням авто- та залізничного транспорту.

Модернізація виробничих потужностей металургійних підприємств. Модернізація виробничих потужностей передбачає перехід від традиційних технологій на базі коксового вугілля до використання водню як відновлювального агента, що значно зменшить викиди CO₂ та підвищить екологічну ефективність виробництва.

Створення науково-дослідних центрів на базі провідних університетів України з включенням ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» для розробки нових технологій та підготовки кваліфікованих кадрів для роботи у водневій промисловості. Це дозволить підвищити рівень кваліфікації працівників та забезпечити галузь висококваліфікованими спеціалістами.

Залучення іноземних інвестицій та кооперація з міжнародними партнерами для спільного розвитку водневої інфраструктури та впровадження передових технологій. Це зменшить фінансове навантаження на українські підприємства та сприятиме швидшому впровадженню нових рішень.

Географічний аналіз розташування активів та їхньої доступності до джерел енергії й транспортної інфраструктури дозволив визначити основні географічні переваги та обмеження території. Дослідження просторового розміщення економічних ресурсів, інфраструктури та виробничих потужностей дало змогу оцінити вплив регіональних факторів на ефективність розміщення підприємств і можливості їхньої інтеграції у виробничі ланцюги. Виявлено, що наявність природних ресурсів, розвинена транспортна мережа та близькість до ринків збуту є ключовими чинниками для формування кластерів. Це забезпечило систематичну оцінку територіальних умов, необхідних для економічного розвитку регіону та стратегічного планування промислових об'єктів (рис.1).



1 – вхідний потік; 2 – вихідний потік; 3 – сталий зв'язок

Рис. 1. Кластер металургійного комбінату

Розроблено три сценарії розвитку кластеру з урахуванням різних рівнів інвестицій та технологічної модернізації (рис. 2):

- **Базовий сценарій:** мінімальні інвестиції, модернізація тільки критичних ділянок виробництва. Орієнтація на локальний ринок з поступовим переходом на часткове використання водню.

- **Оптимальний сценарій:** середній рівень інвестицій, модернізація основних виробничих потужностей, створення інфраструктури для виробництва та транспортування водню. Орієнтація на розширення експортних можливостей за рахунок зниження викидів CO₂.

- **Інноваційний сценарій:** максимальні інвестиції в повну модернізацію підприємств, створення водневих кластерів з інтеграцією новітніх технологій. Орієнтація на міжнародні стандарти екологічної сталості та вихід на нові ринки з конкурентоспроможною продукцією.

Метод моделювання сценаріїв передбачає створення кількох можливих варіантів розвитку подій для прогнозування наслідків певних управлінських рішень та стратегій. Він дозволяє оцінити ризики, ефективність інвестицій та технологічні перспективи для кожного сценарію, враховуючи різні рівні фінансування та модернізації. Використання цього методу допомагає адаптувати стратегії під конкретні умови ринку та зробити найбільш обґрунтований вибір варіанту впровадження кластерного підходу в металургійній галузі.

Економічна оцінка та фінансова ефективність. Розраховано вартість створення водневого кластеру для металургійних підприємств Групи Метінвест у межах 2,0–2,5 млрд євро. Вартість одного електролізера потужністю 100 МВт становить близько 100 млн євро, а загальний термін окупності проекту прогнозується у 8-10 років за умови зростання попиту на "зелену" сталь. Аналіз фінансових ризиків включає оцінку впливу вартості електроенергії, сировини та змін ринкових умов на економічну ефективність проекту. Важливим чинником стало залучення іноземних інвестицій та кооперація з міжнародними партнерами, що зменшить фінансове навантаження на українські підприємства та сприятиме швидшому впровадженню передових технологій.

Сценарій	Рівень інвестицій	Модернізація	Орієнтація
Базовий	Мінімальні 	тільки критичних ділянок виробництва 	на локальний ринок з поступовим переходом на часткове використання водню 
Оптимальний	Середні 	основних виробничих потужностей, створення інфраструктури для виробництва та транспортування водню 	на розширення експортних можливостей за рахунок зниження викидів CO ₂ 
Інноваційний	Максимальні 	створення водневих кластерів з інтеграцією новітніх технологій 	на міжнародні стандарти екологічної сталості та вихід на нові ринки з конкурентоспроможною продукцією 

Рис. 2. Інфографіка можливих сценаріїв

Результати сценарного моделювання дозволили сформулювати організаційні засади впровадження водневого кластеру з використанням активів Групи Метінвест, представлені у вигляді програми, розрахованої на 10 років (рис. 3):

Етап	Роки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Проведення детального техніко-економічного обґрунтування проєкту	■	■								
Розробка проєктної документації	■	■								
Пошук та залучення інвестиційних ресурсів	■	■								
Вибір місця для будівництва водневих виробничих потужностей	■	■								
Будівництво водневих електролізерів			■	■						
Створення мережі для транспортування водню			■	■						
Підготовка кадрів та проведення навчальних програм для співробітників			■	■						
Запуск виробничих потужностей з випуску зеленої сталі					■	■				
Оптимізація логістичних процесів постачання водню					■	■				
Впровадження резервних систем зберігання водню та забезпечення безпеки об'єктів					■	■				
Підключення кластеру до міжнародних ринків та налагодження експорту продукції							■	■	■	■
Оцінка ефективності роботи кластеру та розробка рекомендацій для подальшого розвитку							■	■	■	■

Рис.3. Діаграма Ганта впровадження водневого кластеру в умови підприємства Групи Метінвест

Перший етап (1-2-й роки):

- Проведення детального техніко-економічного обґрунтування проєкту.
- Розробка проєктної документації.
- Пошук та залучення інвестиційних ресурсів.
- Вибір місця для будівництва водневих виробничих потужностей.

Другий етап (3-4-й роки):

- Будівництво водневих електролізерів.
- Створення мережі для транспортування водню.
- Підготовка кадрів та проведення навчальних програм для співробітників.

Третій етап (5-6-й роки):

- Запуск виробничих потужностей з випуску зеленої сталі.
- Оптимізація логістичних процесів постачання водню.
- Впровадження резервних систем зберігання водню та забезпечення безпеки об'єктів.

Четвертий етап (7-10-й роки):

- Підключення кластеру до міжнародних ринків та налагодження експорту продукції.
- Оцінка ефективності роботи кластеру та розробка рекомендацій для подальшого

розвитку.

Запропонований підхід поєднує технологічні, економічні та інфраструктурні аспекти створення водневого кластеру, що сприятиме зниженню викидів CO₂, покращенню конкурентоспроможності української металургії та її інтеграції у світову низьковуглецеву економіку.

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

I ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Отже, за результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Створення водневих кластерів на основі активів Групи Метінвест є перспективним напрямом розвитку зеленої металургії в Україні, що дозволяє скоротити викиди CO₂, зменшити енерговитрати та підвищити конкурентоспроможність на світових ринках.

2. Запровадження водневих технологій сприятиме зниженню залежності від традиційних викопних енергоносіїв, таких як вугілля та природний газ, що особливо важливо в умовах геополітичної нестабільності.

3. Інтеграція водневих кластерів у металургійну галузь України сприятиме збільшенню виробництва зеленої сталі, яка користується попитом на ринках Європи та США, що позитивно вплине на експортний потенціал країни.

4. Реалізація проекту водневого кластеру передбачає значні інвестиції в створення водневої інфраструктури, включаючи виробничі потужності, транспортні мережі та системи зберігання. Проте, згідно з розрахунками, повна окупність може бути досягнута через 8-10 років.

5. Військові ризики та небезпеки в умовах збройної агресії потребують додаткових заходів з безпеки, включаючи створення резервних систем постачання водню, використання підземних сховищ для зберігання та розробку захисних споруд для водневих виробничих об'єктів.

6. Наукова новизна дослідження полягає в комплексному підході до організації водневого кластеру для металургійної галузі України з урахуванням воєнних умов та потенційних ризиків військової агресії. Запропоновано модель, що поєднує використання відновлюваних джерел енергії для виробництва водню та його подальше використання у виробництві сталі.

7. Результати роботи можуть бути використані для розробки стратегічних планів модернізації металургійних підприємств України, а також для створення державної програми підтримки водневої енергетики. Рекомендації з економічної оцінки можуть бути корисними для інвесторів при оцінці потенціалу водневих проєктів.

8. Результати дослідження свідчать про необхідність розробки нових технологічних рішень для ефективного транспортування та зберігання водню. Умови воєнного часу створюють додаткові ризики, що вимагають підвищеної уваги до безпеки інфраструктури та її захисту.

REFERENCES:

1. 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/>.
2. 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>.
3. 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>.
4. 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>.
5. 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>.
6. 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>.
7. 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>.
8. 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>.
9. 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>.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Тарасенко А. Внесок ГМК до ВВП України склав 5,7% у 2023 році. URL: <https://gmk.center/ua/news/vnesok-gmk-do-vvp-ukraini-sklav-5-7-u-2023-roci/>.
14. Експорт чорних металів з України зріс на 17% у 2024 році. URL: <https://minprom.ua/news/319540.html>.
15. Valenzuela, A., Pontes, M., Sharman, H., Kirschner, M. Green hydrogen and steel production: Industrial decarbonization strategies. *Energy Reports*, 2021, no. 7.
16. Ram, M., Bogdanov, D., Aghahosseini, A., Breyer, C. Global Energy System Based on 100% Renewable Energy: Power Sector. Lappeenranta University of Technology, 2018.
17. 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.

ORGANISATIONAL FRAMEWORK FOR THE IMPLEMENTATION OF METALLURGICAL CLUSTERS
AND RESTORATION OF UKRAINE'S INDUSTRIAL POTENTIAL BASED ON THE DEVELOPMENT
OF HYDROGEN TECHNOLOGIES

KUKHAR Volodymyr, SHKRABAK Iryna, SHAULSKA Larysa, CHUB Nataliia, PRYKHODKOV Andrii
TECHNICAL UNIVERSITY "METINVEST POLYTECHNIC" LLC

The article is devoted to substantiating the directions of restoring the industrial potential of Ukraine and increasing the competitiveness of the metallurgical sector through the introduction of hydrogen technologies. The article analyses current trends in the development of the hydrogen economy, in particular, the creation of hydrogen clusters and their role in reducing the cost of hydrogen due to economies of scale and centralised logistics. The key advantages of the cluster approach for metallurgy are identified, including reduction of CO₂ emissions, energy efficiency and compliance with international environmental standards. Based on the analysis of the technical condition of enterprises, the article suggests optimal locations for the creation of a hydrogen cluster based on Metinvest Group's assets that have the necessary infrastructure for the integration of hydrogen technologies. Three scenarios for the implementation of the hydrogen cluster are proposed: basic (minimal investment), optimal (medium level of modernisation) and innovative (complete transformation of production). The economic efficiency of the project is calculated, including the expected amount of investment (EUR 2.0-2.5 billion), the projected payback period (8-10 years), and the main factors affecting financial sustainability. The article also considers the issues of hydrogen logistics and transportation, and suggests the use of specialised pipelines to reduce costs. Particular attention is paid to military risks and the need for additional security measures to ensure the stable operation of metallurgical enterprises in the context of military aggression. The organisational framework for the creation of metallurgical clusters was developed and presented in the form of a ten-year programme. The results of the study can be used to develop strategic programmes for the modernisation of Ukrainian metallurgy, attract foreign investment, and formulate state policy to support the hydrogen economy.

Keywords: cluster approach, hydrogen clusters, renewable energy sources, decarbonization of metallurgy, organisational principles.