

УДК 620.9:662.769(477)

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202508-16>

ПЕРСПЕКТИВИ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Коцюбинський А. О., Линник Д. О., Грицуляк Г. М.,
Запухляк Н. М., Качала С. В., Фомічова О. В.
Івано-Франківський національний
університет нафти і газу

Збільшення обсягів викидів парникових газів у світі спричиняє посилення кліматичних змін і формує глобальний запит на декарбонізацію економіки. Промисловий сектор залишається одним із головних джерел антропогенного навантаження на атмосферу, що зумовлює необхідність впровадження низьковуглецевих технологій виробництва. Для України, яка характеризується високою енергоємністю економіки та значною часткою промислових викидів, перехід до декарбонізованих моделей розвитку є не лише екологічною вимогою, а й стратегічною умовою інтеграції у європейський економічний простір. Водночас наявність потужного потенціалу відновлюваної енергетики, вигідне географічне положення та розвинена інфраструктура створюють перспективи для формування в Україні конкурентоспроможного водневого сектору як складової енергетичної трансформації.

У статті досліджено перспективи розвитку водневої енергетики як ключового інструменту декарбонізації промисловості. Проаналізовано потенціал України щодо виробництва «зеленого» водню з використанням відновлюваних джерел енергії та можливості інтеграції у європейський водневий ринок.

Проведено SWOT-аналіз впровадження водневих технологій у промисловому секторі, що дозволило визначити основні конкурентні переваги, обмеження, ризики та можливості формування національного водневого сектору. Встановлено, що впровадження водневих технологій забезпечує значний потенціал скорочення викидів CO₂ та може бути економічно доцільним для окремих галузей.

Ключові слова: викиди, воднева енергетика, зелений водень, декарбонізація, промисловість, оцінка.

PROSPECTS FOR HYDROGEN ENERGY IN THE DECARBONIZATION OF UKRAINE'S INDUSTRY

Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O., Hrytsulyak G. M.,
Zapukhliak N. M, Kachala S. V., Fomichova O. V.

Ivano-Frankivsk National
University of Oil and Gas

The increase in global greenhouse gas emissions is causing climate change to intensify and creating a global demand for the decarbonization of the economy. The industrial sector remains one of the main sources of anthropogenic pressure on the atmosphere, which necessitates the introduction of low-carbon production technologies. For Ukraine, which is characterized by a highly energy-intensive economy and a significant share of industrial emissions, the transition to decarbonized development models is not only an environmental requirement but also a strategic condition for integration into the European economic space. At the same time, the availability of powerful renewable energy potential, a favorable geographical location, and developed infrastructure create prospects for the formation of a competitive hydrogen sector in Ukraine as part of the energy transformation. The article explores the prospects for the development of hydrogen energy as a key tool for decarbonizing industry. It analyzes Ukraine's potential for producing «green» hydrogen using renewable energy sources and the possibilities for integration into the European hydrogen market. A SWOT analysis of the implementation of hydrogen technologies in the industrial sector was conducted, which made it possible to identify the main competitive advantages, limitations, risks, and opportunities for the formation of a national hydrogen sector. It has been established that the introduction of hydrogen technologies offers significant potential for reducing CO₂ emissions and may be economically viable for certain industries.

Keywords: emissions, hydrogen energy, green hydrogen, decarbonization, industry, assessment.

Постановка проблеми

Глобальна енергетична система перебуває на етапі фундаментальної трансформації, зумовленої необхідністю досягнення кліматичної нейтральності та радикального скорочення викидів парникових газів. Промисловий сектор, що генерує значну частку світових викидів CO₂, потребує глибокої декарбонізації, особливо в галузях, які важко піддаються електрифікації. У цьому контексті водень розглядається як один із ключових енергоносіїв майбутнього, здатний забезпечити перехід важкої промисловості на низьковуглецеві технології. Європейський Союз визначив розбудову водневої економіки як стратегічний пріоритет у рамках реалізації Європейського зеленого курсу. Україна володіє унікальним поєднанням факторів, що створюють сприятливі передумови для становлення потужного водневого сектору: значний потенціал відновлювальної енергетики, розвинута газотранспортна інфраструктура для транспортування водню, та наявність великих промислових споживачів у металургійному, хімічному та нафтопереробному секторах. Водночас українська промисловість залишається однією з найбільш енергоємних та вуглецевомістких в Європі. Прийняття Україною кліматичних зобов'язань та впровадження механізму транскордонного вуглецевого коригування створюють необхідність системної трансформації промислового виробництва. Модернізація застарілих технологій з впровадженням водневих альтернатив дозволить не лише виконати кліматичні зобов'язання, а й забезпечити технологіч-

ний прорив та залучення інвестицій у рамках повоєнного відновлення економіки. За цих умов набуває актуальності комплексна наукова оцінка перспектив використання водневої енергетики для декарбонізації різних секторів української промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Глобальна зміна клімату, спричинена масштабними викидами парникових газів, визначає критичну необхідність декарбонізації та трансформації енергетичних систем.

Стратегічний курс на відмову від викопних енергоносіїв стає пріоритетом національних кліматичних політик, спрямованих на досягнення сталого розвитку. Європейський Союз та Україна імплементують комплексні стратегії зі скорочення емісій парникових газів, у яких водневі технології розглядаються як ключовий інструмент енергетичної трансформації. [3].

Водневі паливні елементи характеризуються екологічною чистотою та високими показниками енергоефективності, проте їх широкомасштабне впровадження обмежується викликами технологічного масштабування та розбудови відповідної інфраструктури. Критичним фактором розвитку водневої енергетики є забезпечення безпеки на всіх етапах життєвого циклу, що охоплює контроль займистості, системи детектування витоків та розробку протоколів аварійного реагування. Водень як енергоносіє знаходить різноманітне застосування в економіці: від довгострокового зберігання надлишкової енергії та зниження промислових викидів до стабілізації електричних мереж [6].

Водень посів ключове місце у світових стратегіях досягнення вуглецевої нейтральності завдяки своїй багатофункціональності, можливості масштабування та здатності інтегруватися в різні енергетичні системи. Як екологічно чистий енергоносіє, він дає змогу розмежувати генерацію енергії з відновлюваних джерел і її споживання, може використовуватися в складних для декарбонізації галузях – зокрема у важкій промисловості та авіації – а також виступає ефективним засобом довготривалого накопичення енергії [4,5]. Прогнозується суттєве зростання обсягів виробництва водню в найближчі десятиліття: до 2030

року вони перевищать 30 млн т, а до 2050 року сягнуть понад 100 млн т в обох розглянутих сценаріях. Водночас підтверджується багатофункціональна роль водню у процесах декарбонізації європейської енергетичної системи, зокрема для секторів транспорту й промисловості, що важко піддаються зниженню викидів. Виробництво водню в Європі ґрунтуватиметься на різноманітному технологічному поєднанні, яке охоплює як відновлювані, так і низьковуглецеві рішення [7]. Наразі в Україні виробляється близько 360 тис. тонн водню на рік, який переважно використовується для синтезу аміаку. Це становить лише приблизно 0,5 % від світового попиту. Водночас за умови технологічного розвитку та залучення інвестицій Україна має потенціал суттєво наростити обсяги виробництва водню. [1].

Центральні директиви Європи, зокрема «Енергетична системна інтеграція. Водень» Європейської комісії та «Зелений водень для Європейської зеленої угоди: Ініціатива 2x40 ГВт», визначають Україну як стратегічного партнера в розвитку відновлюваного водню. Ці стратегічні документи передбачають будівництво до 10 ГВт електролізних потужностей в Україні до 2030 р., що призначені для виробництва відновлюваного водню. Близько 1,8 ГВт цієї потужності припадає на внутрішній ринок, переважно для виробництва зеленого аміаку, критичного товару для агропромислового комплексу У цих документах [30, 31] Україна вважається пріоритетним партнером. Дорожня карта передбачає будівництво до 2030 року електролізерних потужностей на 40 ГВт у країнах Північної Африки, зокрема в Україні [9,31].

Вона пропонує створити 7,5 ГВт потужностей для внутрішнього ринку, в основному призначених для виробництва зеленого аміаку, та 32,5 ГВт для експортного ринку – переважно для трубопровідного експорту до країн Європейського Союзу, близько 3 млн тонн або 118 ТВт·год водню у 2030 році, що становить 17% від загального ринку водню в ЄС у 2030 році.

У зазначених вище документах [30, 31] підкреслюється та висвітлюється роль України у досягненні цілей Європейського зеленого курсу. У них згадується можливість побудови до 10 ГВт встановленої потужності електролізерів для виробництва відновлюваного водню, з яких 1,8 ГВт

призначені для внутрішнього ринку України, зокрема для виробництва зеленого аміаку [2].

Пріоритетні напрямки технологічного розвитку зеленого водню охоплюють чотири ключові сфери: вдосконалення електролізних методів виробництва (лужний, мембранний PEM, твердооксидний) з акцентом на підвищення ефективності конверсії та зниження капітальних витрат; дослідження альтернативних виробничих технологій, включаючи термохімічну деструкцію, фотокаталітичні процеси, біологічну ферментацію та низькоемісійний піроліз метану; розробку інноваційних рішень для акумулювання та логістики через компресійні системи, криогенне скраплення та хімічні носії типу аміаку або рідких органічних сполук; диверсифікацію кінцевого застосування у важкій індустрії, хімічному синтезі, транспортному секторі та розподіленій генерації. [8].

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Мета дослідження – оцінити перспективи впровадження водневих технологій у ключових секторах промисловості України.

Завдання дослідження:

1) проаналізувати потенціал розвитку водневої енергетики в Україні в контексті європейських ініціатив;

2) виконати SWOT-аналіз конкурентних переваг та бар'єрів для становлення водневого сектору;

3) здійснити порівняльну економічну оцінку собівартості виробництва в основних галузях промисловості при використанні традиційних та водневих технологій.

Виклад основного матеріалу дослідження

Реалізація водневого потенціалу України як інструменту декарбонізації промисловості вимагає комплексного наукового обґрунтування, що охоплює як стратегічні передумови, так і конкретні техніко-економічні параметри трансформації окремих виробничих секторів.

Україна володіє унікальним поєднанням природних, географічних та інфраструктурних передумов для становлення потужного водневого сектору та інтеграції у європейську водневу економіку.

Впровадження зеленого водню в промисловості України має значний потенціал для скорочення викидів вуглекислого газу, що є критичним для досягнення національних кліматичних зобов'язань та інтеграції у європейський екологічний простір. Заміщення традиційних викопних енергоносіїв зеленим воднем у ключових промислових секторах дозволить скоротити сумарні викиди CO₂ на понад 65 млн тонн на рік, що становить близько 83% від поточного рівня емісій досліджуваних галузей (Рис.1).

Горизонтальний стовпчиковий графік візуалізує абсолютний потенціал скорочення викидів

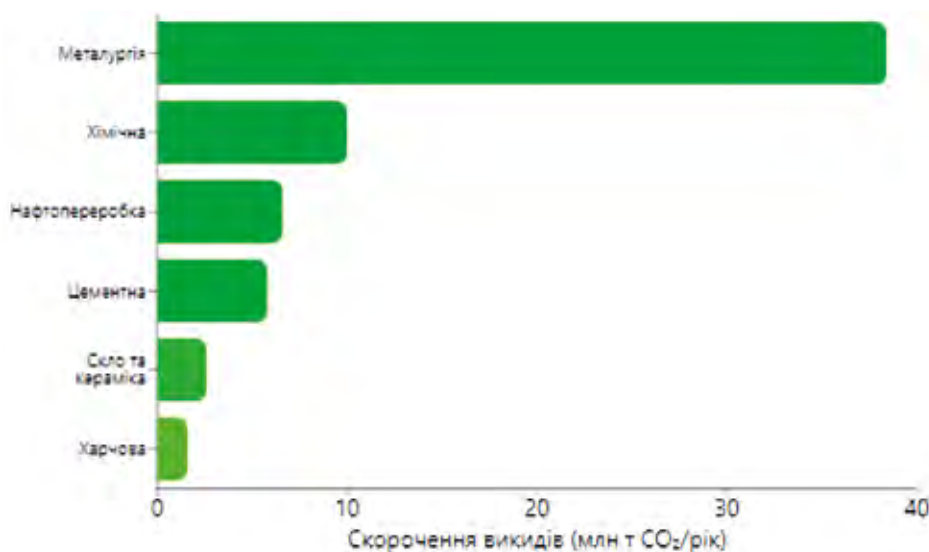


Рисунок 1. Скорочення викидів CO₂ при впровадженні технологій зеленого водню

*Джерело: розроблено авторами

CO₂ (млн т/рік) у шести ключових галузях промисловості України при впровадженні водневих технологій. Металургія демонструє найбільший потенціал декарбонізації на рівні близько 38-39 млн т CO₂/рік, що становить понад 60% від сумарного ефекту всіх представлених секторів, тоді як хімічна промисловість (10 млн т), нафтопереробка (6-7 млн т) та цементна галузь (5-6 млн т) займають наступні позиції. Виробництво скла та кераміки (2-3 млн т) і харчова промисловість (1-2 млн т) мають найменші абсолютні показники скорочення.

Стратегічне розташування України на перехідній енергетичних коридорів між Європою та Азією, поєднане зі значним потенціалом відновлювальної енергетики, створює сприятливі умови для розвитку водневого виробництва та транзиту. Україна має всі необхідні передумови для трансформації від імпортера енергоресурсів до експортера "зеленого" водню, що відкриває можливості для технологічної модернізації економіки та зміцнення енергетичної незалежності. Поєднання потужного відновлювального потенціалу, існуючої індустріальної бази та європейської інтеграційної перспективи робить Україну природним кандидатом на роль регіонального водневого хабу у Східній Європі. На рисунку 2 відображено структуру відновлюваної енергетики України.

Станом на 2023-2024 рік відновлювальні джерела енергії складають приблизно 12-15% від

загальної встановленої потужності електроенергетики України. Сонячна енергетика (СЕС) домінує у структурі відновлювальної енергетики України, займаючи 52-55% від загальної потужності ВДЕ, тоді як вітрова енергетика (ВЕС) посідає друге місце з часткою 30-33%, переважно зосереджена у прибережних та степових регіонах. Гідроенергетика (10-12%) та біомаса (3-5%) представлені значно меншими частками, що відображає їх обмежений розвиток порівняно з сонячною та вітровою генерацією.

Водночас реалізація водневого потенціалу України стримується комплексом внутрішніх обмежень та зовнішніх викликів, що вимагають системного підходу до їх подолання. У таблиці 1 наведено SWOT-аналіз перспективи впровадження водневих технологій та використання зеленого водню у промисловості України.

SWOT-аналіз виявляє, що Україна володіє суттєвими конкурентними перевагами для становлення водневої економіки завдяки природним умовам для генерації відновлювальної електроенергії, наявності транспортних магістралей та промислових споживачів, а також вигідному географічному розташуванню щодо європейських ринків збуту; водночас країна стикається з критичною залежністю від імпортних технологій, значним розривом у собівартості порівняно з традиційними методами та необхідністю масштабної модернізації виробничих потужностей; перспективи пов'язані з можливістю інтеграції у

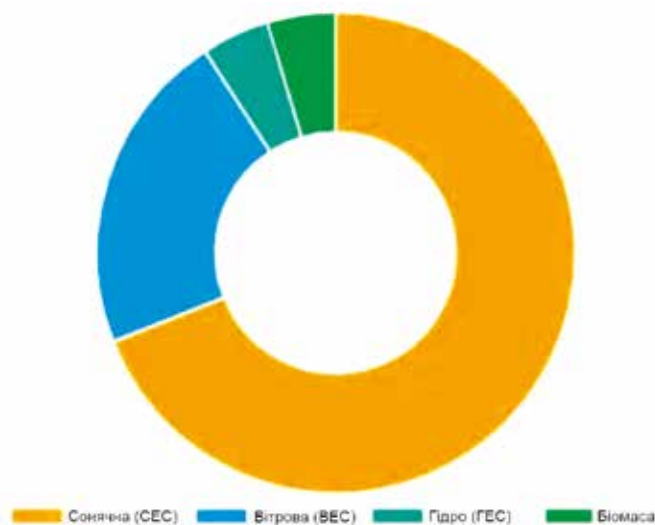


Рисунок 2. Структура відновлюваної енергетики України

*Джерело: розроблено авторами

SWOT-аналіз зеленого водню у промисловості України

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Значний потенціал відновлювальної енергетики для виробництва "зеленого" водню методом електролізу; 2. Промисловий потенціал та існуюче споживання водню; 3. Розвинута газотранспортна система 4. Прямий доступ доєвропейського ринку; 5. Уникнення вуглецевого податка 6. Зменшення викидів CO₂. 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Відсутність власного виробництва обладнання; 2. Висока вартість 3. Потреба адаптації інфраструктури 4. Застаріла промислова база
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ринкові перспективи; 2. Декарбонізація промисловості 3. Енергетична незалежність 4. Технологічний розвиток. 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Зруйнована інфраструктура; 2. Швидке застарівання обладнання; 3. Повільне прийняття законодавства; 4. Потреба значного фінансування по початкових етапах.

*Джерело: розроблено авторами

європейський енергетичний простір, трансформацією важкої індустрії та формуванням нового високотехнологічного сектору економіки; ключові ризики зумовлені воєнними обставинами, що руйнують базову інфраструктуру, недосконалістю правового середовища та глобальною конкуренцією за інвестиційні ресурси й технологічне лідерство.

Для визначення економічної доцільності впровадження водневих технологій було здійснено порівняльний аналіз собівартості виробництва в основних галузях промисловості України при використанні традиційних енергоносіїв та зеленого водню з урахуванням відповідних екологічних платежів та вуглецевого оподаткування (Рис. 3).

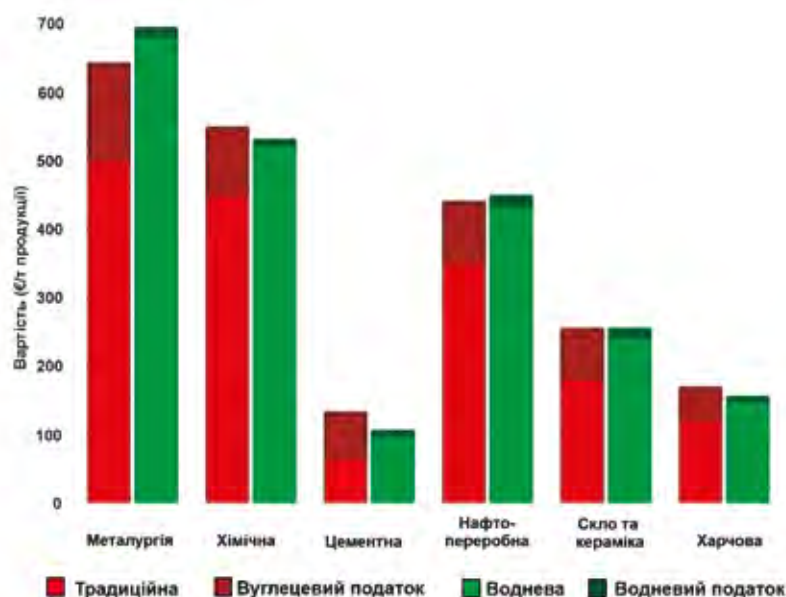


Рисунок 3. Собівартість виробництва промисловості України

*Джерело: розроблено авторами

На графіку представлено порівняльний аналіз собівартості виробництва в основних галузях промисловості України при використанні традиційних технологій та водневих альтернатив з урахуванням відповідних податків. Найбільші витрати спостерігаються в металургійному секторі, де собівартість традиційного виробництва становить близько 640 млн євро на рік, а з урахуванням вуглецевого податку зростає до 680 млн євро. При переході на воднеї технології вартість дещо збільшується до 700 млн євро включно з водневим податком. Хімічна промисловість демонструє другий за величиною показник із собівартістю близько 560 млн євро для традиційних технологій та 540 млн євро для водневих, що свідчить про певну економічну привабливість водневої альтернативи. Найбільший економічний потенціал для декарбонізації виявляється в цементній промисловості, де перехід на водневі технології дозволяє знизити собівартість зі 130 млн до 110 млн євро на рік. Нафтопереробна галузь показує приблизно однакові показники для обох технологій на рівні 450-460 млн євро, тоді як виробництво скла та кераміки (260-250 млн євро) і харчова промисловість (170-160 млн євро) також демонструють незначну економічну перевагу водневих технологій.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Проведене дослідження підтверджує значний потенціал країни для розвитку водневої економіки та інтеграції у європейський водневий простір. Україна володіє унікальним поєднанням сприятливих факторів, що створюють основу для становлення потужного водневого сектору: значний технічний потенціал відновлювальної енергетики, розвинена газотранспортна інфраструктура, існуюче промислове споживання водню та стратегічне географічне розташування. SWOT-аналіз виявив, що конкурентні переваги країни дозволяють розглядати Україну як потенційного регіонального водневого хабу, здатного забезпечити значну частку європейського попиту на «зелений» водень.

Економічний аналіз собівартості виробництва в ключових галузях промисловості демонструє диференційовану, але загалом позитивну карти-

ну доцільності впровадження водневих технологій з урахуванням вуглецевого оподаткування.

Оцінка екологічного ефекту виявляє значний потенціал скорочення викидів парникових газів через впровадження водневих технологій у промисловості. Металургія забезпечує найбільший абсолютний внесок у декарбонізацію, що підкреслює критичну важливість цього сектору для досягнення національних кліматичних цілей. Високий та стабільний відсоток можливого скорочення викидів у всіх досліджуваних галузях підтверджує універсальну ефективність водневих технологій як інструменту промислової трансформації. Водночас реалізація водневого потенціалу стримується комплексом бар'єрів технологічного, економічного та інституційного характеру, що вимагає системної державної політики та міжнародної підтримки.

Список використаних джерел

1. Криль, Я. М., Паюк, С. О., Репкін, О. О., Кузьменко, С. О., Паламарчук, В. О., & Свіденко, К. І. (2023). Стан та перспективи використання відновлюваного водню в Україні: вплив на промисловість та шляхи декарбонізації економіки. *Мінеральні ресурси України*, (2), 12-16. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.12-16>
2. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. <https://hydrogen.ua/images/about/Green-Hydrogen-for-a-European-Green-Deal.-A-2x40-GW-Initiative.pdf>
3. Myskiv, G., & Ivanytskyi, R. (2024). DECARBONIZATION AS A KEY TO SUSTAINABLE DEVELOPMENT: CHALLENGES AND PROSPECTS OF THE EU AND UKRAINE. *Financial & Credit Activity: Problems of Theory & Practice*, 3(56). <https://doi.org/10.55643/fcaptop.3.56.2024.4397>
4. Vogar, M., El-Sagerd, A., & Al-Khalid, N. (2025). Hydrogen Energy: Pathways, Technologies, and Global Prospects for a Decarbonized Future. *Energy Conversions*, 2025 – Volumes 4.
5. Ameli, H., Strbac, G., Pudjianto, D., & Ameli, M. T. (2024). A review of the role of hydrogen in the heat decarbonization of future energy systems: Insights and perspectives. *Energies*, 17(7), 1688. <https://doi.org/10.3390/en17071688>
6. Shukla, A. K., Gautam, R., Chaudhary, S., Srivastava, A. K., Kumar, A., Singh, S., & Maurya, P.

K. (2024). Hydrogen energy: Addressing challenges and exploring future prospects. In *Hydrogen Energy* (pp. 34-45). CRC Press.

7. Seck, G. S., Hache, E., Sabathier, J., Guedes, F., Reigstad, G. A., Straus, J., ... & Cabot, C. (2022). Hydrogen and the decarbonization of the energy system in Europe in 2050: A detailed model-based analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779>

8. Franco, A. (2025). Green Hydrogen and the Energy Transition: Hopes, Challenges, and Realistic Opportunities. *Hydrogen*, 6(2), 28. <https://doi.org/10.3390/hydrogen6020028>

9. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. (2024). Статистичні дані про розвиток відновлювальної енергетики в Україні <https://saee.gov.ua/>

References

1. Kryl, Ya. M., Paiuk, S. O., Riepin, O. O., Kuzmenko, S. O., Palamarchuk, V. O., & Svidenko, K. I. (2023). Stan ta perspektyvy vykorystannia vidnovliuvanoho vodniu v Ukraini: vplyv na promyslovist ta shliakhy dekarbonizatsii ekonomiky. *Mineralni resursy Ukrainy*, (2), 12-16. <https://doi.org/10.31996/mru.2023.2.12-16>

2. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. <https://hydrogen.ua/images/about/Green-Hydrogen-for-a-European-Green-Deal.-A-2x40-GW-Initiative.pdf>

3. Myskiv, G., & Ivanytskyi, R. (2024). DECARBONIZATION AS A KEY TO SUSTAINABLE

DEVELOPMENT: CHALLENGES AND PROSPECTS OF THE EU AND UKRAINE. *Financial & Credit Activity: Problems of Theory & Practice*, 3(56). <https://doi.org/10.55643/fcaptop.3.56.2024.4397>

4. Vogar, M., El-Sagerd, A., & Al-Khalid, N. (2025). *Hydrogen Energy: Pathways, Technologies, and Global Prospects for a Decarbonized Future*. Energy Conversions, 2025 – Volumes 4.

5. Ameli, H., Strbac, G., Pudjianto, D., & Ameli, M. T. (2024). A review of the role of hydrogen in the heat decarbonization of future energy systems: Insights and perspectives. *Energies*, 17(7), 1688. <https://doi.org/10.3390/en17071688>

6. Shukla, A. K., Gautam, R., Chaudhary, S., Srivastava, A. K., Kumar, A., Singh, S., & Maurya, P. K. (2024). Hydrogen energy: Addressing challenges and exploring future prospects. In *Hydrogen Energy* (pp. 34-45). CRC Press.

7. Seck, G. S., Hache, E., Sabathier, J., Guedes, F., Reigstad, G. A., Straus, J., ... & Cabot, C. (2022). Hydrogen and the decarbonization of the energy system in Europe in 2050: A detailed model-based analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167, 112779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779>

8. Franco, A. (2025). Green Hydrogen and the Energy Transition: Hopes, Challenges, and Realistic Opportunities. *Hydrogen*, 6(2), 28. <https://doi.org/10.3390/hydrogen6020028>

9. Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy. (2024). Statystychni dani pro rozvytok vidnovliuvalnoi enerhetyky v Ukraini <https://saee.gov.ua/>