

Яценко Ольга Миколаївна,
доктор економічних наук, професор, професор
кафедри міжнародної торгівлі і маркетингу,
Київський національний економічний
університет ім. В. Гетьмана

Yatsenko Olha M.
D.Sc. (Economics), Professor, Professor, International
Trade and Marketing Department, Kyiv National
Economic University named after Vadym Hetman,
<https://orcid.org/0000-0003-4399-2217>

**РОЗВИТОК ІННОВАЦІЙНОГО БІЗНЕСУ ТА МІЖНАРОДНОЇ ТОРГІВЛІ ВОДНЕМ:
ІНСТИТУЦІОНАЛЬНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ ДЛЯ СТАЛОГО ПОСТ-
ВУГЛЕЦЕВОГО МАЙБУТНЬОГО**
**DEVELOPMENT OF INNOVATIVE BUSINESS AND INTERNATIONAL HYDROGEN TRADE:
INSTITUTIONAL SUPPORT FOR THE ENERGY TRANSITION TO A SUSTAINABLE POST-CARBON
FUTURE**

Яценко О. М. Розвиток інноваційного бізнесу та міжнародної торгівлі воднем: інституціональне забезпечення енергетичного переходу для сталого пост-вуглецевого майбутнього. *Український журнал прикладної економіки та техніки*. 2025. Том 10. № 1. С. 92 – 103.

Yatsenko O. Development of innovative business and international hydrogen trade: institutional support for the energy transition to a sustainable post-carbon future. *Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*. 2025. Volume 10. № 1, pp. 92 – 103.

Глобальний енергетичний перехід характеризується переходом від викопних видів палива, таких як вугілля, нафта і природний газ, до більш чистих і сталих джерел енергії. Акцентовано увагу, що воднева енергетика має значний потенціал для розвитку інноваційного бізнесу, міжнародної торгівлі і забезпечення енергетичного переходу для сталого пост-вуглецевого майбутнього. Нині більшість водню споживається локально, без значних обсягів міждержавних поставок. Зазначено, що розвиток цього ринку стикається з низкою технічних викликів, зокрема високими витратами на виробництво «зеленого» водню, технічними складнощами з інфраструктурою, його транспортуванням та зберіганням через низьку щільність і необхідність створення масштабної інфраструктури. Попит на водень зростає, оскільки він відіграє ключову роль у декарбонізації та зниженні викидів парникових газів, особливо у важкій промисловості, транспортному секторі та енергетичних системах. У короткостроковій перспективі торгівля воднем, ймовірно, відбуватиметься переважно між сусідніми країнами через трубопроводи, що обмежуватиме масштаби міжнародної торгівлі доти, доки не будуть розроблені технології, що зменшують витрати. У довгостроковій перспективі зі зростанням попиту на «зелений» водень, особливо в Європі та Азії, тенденція до активної торгівлі цим ресурсом поступово зміниться. За найбільш оптимістичними прогнозами світовий ринок водню поступово зростатиме до 2030 р. і обсяг міжнародної торгівлі воднем може досягнути 120 млн тонн на рік. Теоретично доведено, що водень починає відігравати дедалі важливішу роль у глобальній енергетичній системі, геополітика торгівлі енергоносіями неминуче зміниться. В енергетичній геополітиці традиційно домінували експортери викопного палива, такі як Близький Схід і росія. Однак перехід на водень має потенціал для децентралізації виробництва енергії, роблячи країни з багатими ресурсами відновлюваної енергії, такі як Перська затока, Північна Африка та частини Європи, ключовими гравцями на новому ринку водню. Це підкреслює важливість розвитку міжнародних ланцюгів постачання водню, зокрема з регіонів, багатих на відновлювані джерела енергії, таких як Північна Африка, Близький Схід і Австралія. Інституціональне забезпечення енергетичного переходу для сталого пост-вуглецевого майбутнього реалізується на глобальному і макrorівні. На глобальному рівні – через систему норм і правил регулювання міжнародного ринку, політику міжнародних торговельних угод й митного регулювання, міжнародну координацію щодо впровадження стандартів якості та безпеки водню. На макrorівні – через державні інституції, регуляторну базу та стратегії розвитку водневої економіки, які вже стали невід'ємною частиною енергетичних планів багатьох країн, що прагнуть досягти вуглецевої нейтральності, скорочення викидів парникових газів і підвищення енергетичної безпеки. Обґрунтовано, що ринок водню чекає непростий шлях, пов'язаний з вирішенням технічних і економічних питань. Проте, завдяки розвитку інноваційного бізнесу та технологічних інновацій, підтримці з боку урядів, приватних інвесторів і різних груп стейкхолдерів, цей сектор має великі шанси стати ключовим гравцем у майбутньому енергетичному ландшафті, відіграючи важливу роль у декарбонізації світової економіки.

Ключові слова: інноваційний бізнес, інституціональне забезпечення, енергетичний перехід, водень, глобальна воднева економіка, геополітика енергетики, декарбонізація, сталий розвиток, стале пост-вуглецеве майбутнє, зелений перехід, зелені інвестиції, технологічні інновації, міжнародна торгівля, система торгівлі викидами, регулювання, стратегічні інтереси, економічні інтереси, стратегія використання водню для енергетики, енергетична стратегія, стратегування водневої економіки, стратегії країн, глобальні тригери розвитку, торговельна політика, екологічна політика, міжнародні торговельні угоди, митне регулювання, міжнародна торгівля.

The global energy transition is characterized by a shift from fossil fuels such as coal, oil, and natural gas to cleaner and more sustainable energy sources. It is emphasized that hydrogen energy has significant potential for the development of innovative business, international trade, and energy transition for a sustainable post-carbon future. Currently, most hydrogen is consumed locally, without significant volumes of interstate supplies. It is noted that the development of this market faces many technical challenges, including high costs of producing "green" hydrogen, technical difficulties with the infrastructure for its

transportation and storage due to low density, and the need to create large-scale infrastructure. Demand for hydrogen is growing as it plays a key role in decarbonization and greenhouse gas emissions reduction, especially in heavy industry, transportation, and energy systems. In the short term, hydrogen trade will likely occur mainly between neighboring countries through pipelines, limiting the scope of international trade until cost-reducing technologies are developed. In the long term, as demand for green hydrogen grows, especially in Europe and Asia, the trend toward active trade in this resource will gradually change. According to the most optimistic forecasts, the global hydrogen market will gradually grow until 2030, and the volume of international hydrogen trade may reach 120 million tons per year. It has been theorized that hydrogen is becoming increasingly important in the global energy system, and the geopolitics of energy trade will inevitably change. Energy geopolitics has traditionally been dominated by fossil fuel exporters such as the Middle East and Russia. However, the transition to hydrogen has the potential to decentralize energy production, making countries with rich renewable energy resources, such as the Persian Gulf, North Africa, and parts of Europe, key players in the new hydrogen market. This underscores the importance of developing international hydrogen supply chains, particularly from regions rich in renewable energy sources, such as North Africa, the Middle East, and Australia. Institutional support for the energy transition for a sustainable post-carbon future is implemented at the global and macro levels. At the global level, through a system of rules and regulations for the international market, international trade agreements and customs regulation, and international coordination on the implementation of hydrogen quality and safety standards. At the macro level, through government institutions, regulatory frameworks, and hydrogen economy development strategies, which have already become an integral part of the energy plans of many countries seeking to achieve carbon neutrality, reduce greenhouse gas emissions, and improve energy security. It is substantiated that the hydrogen market will face a difficult path related to solving technical and economic issues. However, thanks to the development of innovative business and technological innovations, support from governments, private investors, and various stakeholder groups, this sector has a great chance to become a key player in the future energy landscape, playing an important role in the decarbonization of the global economy.

Keywords: innovative business, institutional support, energy transition, hydrogen, global hydrogen economy, energy geopolitics, decarbonization, sustainable development, sustainable post-carbon future, green transition, green investments, technological innovation, international trade, emissions trading system, regulation, strategic interests, economic interests, strategy of hydrogen use for energy, energy strategy, strategizing the hydrogen economy, country strategies, global development triggers, trade policy, environmental policy, international trade agreements, customs regulation, international trade.

Вступ

Проблема розвитку інноваційного бізнесу є важливою та актуальною в сучасному світі. Інновації стали необхідним елементом успішного функціонування всіх суб'єктів бізнесу на мікро-, макро- та глобальному рівнях, незалежно від їх секторальної приналежності і орієнтації на прибуток. Сучасний світовий енергетичний сектор зазнає значних змін, зумовлених необхідністю боротьби зі зміною клімату та розвитком екологічно чистих енергетичних технологій. В основі цієї трансформації лежить водень – універсальний і потенційно революційний енергоносіє, який обіцяє декарбонізацію секторів економіки, що важко піддаються електрифікації. Оскільки світ переходить від палива на основі вуглецю до пост-вуглецевого водневого палива, міжнародна торгівля воднем стає критично важливою сферою уваги [1; 2] Цей перехід не лише обіцяє змінити геополітику енергетики, але й переформатувати торговельну та екологічну політику на глобальному рівні.

Воднева економіка стає одним із ключових аспектів трансформації світової енергетики, спрямованої на досягнення вуглецевої нейтральності та боротьбу з кліматичними змінами. Водень як універсальний енергетичний носій має потенціал значно зменшити залежність від викопних видів палива та сприяти зниженню викидів парникових газів. За прогнозами Міжнародного енергетичного агентства (IEA), глобальний ринок водню може стати наріжним каменем у досягненні цілей Паризької кліматичної угоди, оскільки передбачається значне збільшення виробництва та споживання водню в різних секторах економіки до 2050 р. [3–6]. Крім того, нові технологічні інновації дозволяють збільшувати економічну привабливість виробництва водню, особливо «зеленого» водню, отриманого за допомогою відновлюваних джерел енергії.

Міжнародна торгівля воднем поступово стає ключовим елементом глобальних енергетичних ринків. Оскільки світ рухається до декарбонізації своєї економіки, водень є потенційним рішенням для задоволення енергетичних потреб, одночасно зменшуючи викиди вуглекислого газу. Дослідження потенціалу водню для сталого розвитку глобальної енергетики вказує на необхідність створення інфраструктури для виробництва, зберігання та транспортування водню, що сприяє формуванню нових ринків, особливо в Європі, Азії та Північній Америці. Серед основних викликів – висока собівартість продукції та необхідність значних інвестицій в інноваційні технології. Водночас із розвитком технологій, таких як електроліз на основі відновлюваної енергії (вітру та сонця), очікується, що вартість буде поступово знижуватися, а особливо після збільшення виробництва [7].

Одна з проблем, яку необхідно вирішити для майбутнього людства, пов'язана з енергією, глобальним потеплінням і виснаженням викопного палива. Тому використання викопного палива потрапило під пильну увагу експертів, науковців, бізнесменів і державних діячів через його роль у зміні клімату. Деякі вчені вважають водень наступним кроком у інноваційному бізнесі і виробництві енергії. Науковий доробок «Нова міжнародна торгівля воднем: екологічна політика, інновації та динаміка торгівлі» Вернера Антвайлера та Девіда Шлунда досліджує роль водню як найважливішого енергоносія на майбутньому світовому енергетичному ринку. У ньому акцентується на потенціалі водню щодо заміни викопного палива у зберіганні та транспортуванні енергії з акцентом на різні методи його виробництва (зелений, блакитний та бірюзовий водень) [7].

Глобальний енергетичний перехід характеризується переходом від викопних видів палива, таких як вугілля, нафта і природний газ, до більш чистих і сталих джерел енергії. Воднева енергія може бути чистішим і ефективнішим способом жити наш світ. Зрештою, водень та інші джерела енергії потенційно можуть замінити природний газ екологічно чистим способом. Аналіз водневої економіки знайшов відображення у дослідженнях багатьох вітчизняних і зарубіжних учених. Протягом останніх десятиліть воднева економіка стала однією з пріоритетних сфер для зменшення залежності від викопних джерел енергії та їхніх екологічних проблем [8–10].

Нинішнє зростання інтересу до зеленого водню зумовлене передусім стимулюючими ініціативами розвинутих країн щодо скорочення викидів парникових газів і боротьби з глобальним потеплінням. Наприклад, Європейський Союз активно підтримує розвиток водневої енергетики, сприяючи створенню інфраструктури для виробництва «зеленого» водню з використанням відновлюваних джерел енергії. Європейські країни запроваджують правила декарбонізації та чистого повітря, що опосередковано підвищує конкурентоспроможність водню як паливного елемента та привабливого інноваційного бізнесу. Розвинені країни також допомагають залучати інвестиції та створювати попит на цей газ [6; 11–19].

Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства, енергетичний сектор є основним джерелом викидів парникових газів, що викликано використанням викопного пального для виробництва електрики та тепла. Водень як чистий вид пального може значно зменшити ці викиди. Наприклад, у процесі спалювання водню вивільняється лише вода, що робить його безвідходним енергетичним ресурсом. За оцінками Hydrogen Council, перехід на водень може скоротити глобальні викиди CO₂ до 6 гігатонн на рік до 2050 р., що відповідає 20% цілей зниження викидів для досягнення цілей Паризької угоди [20–24].

Сьогодні водень займає досить обмежену частку світового енергетичного балансу. Однак експерти оцінюють його потенціал як величезний: водень може стати основою для досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року. Вирішити транспортну проблему планують будівництвом воднепроводів. Майкл Семераро довів, що трубопровід водню може бути економічно конкурентоспроможним методом передачі відновлюваної енергії для відстаней у 1000 миль із технологіями 2030 р. [12]. Однак у цій ж статті наголошують, що методи потребують подальшого дослідження.

Наразі попит на водень в основному створюється нафтопереробною промисловістю та виробництвом добрив. Проте експерти стверджують, що у майбутньому галузі, які значною мірою залежать від викопного палива, такі як важка промисловість і далекомагістральні перевезення, авіаційний транспорт, можуть отримати найбільшу вигоду від водневої енергетики [20; 24]. Водень як чисте паливо здатен значно скоротити викиди вуглецю у цих секторах, що є ключовим фактором для досягнення глобальних цілей декарбонізації. Водень може бути використаний у важкій промисловості, зокрема в металургії, де традиційні методи виробництва заліза та сталі вимагають великих обсягів вугілля. Відповідно до дослідження, проведеного McKinsey, заміна вугілля воднем у виробництві сталі може зменшити викиди на 70%.

Енергетичний перехід вже розглядається як стратегічний у багатьох країнах, таких як Швеція, де компанії, такі як SSAB, реалізують проекти «зеленого» водню для виробництва сталі. Щоб водень міг значно сприяти переходу на чисту енергію, його потрібно застосувати в секторах, де він майже повністю відсутній, наприклад, у транспорті, будівництві та виробництві електроенергії. «Майбутнє водню» містить широкий і незалежний огляд водню, який показує, яка зараз ситуація з воднем, як водень може допомогти досягти чистого, безпечного та доступного енергетичного майбутнього та як ми можемо реалізувати його потенціал [25].

Обґрунтуванню інституціонального забезпечення енергетичного переходу присвячені дослідження і звіти міжнародних організацій. Відповідна проблематика вже у фокусі уваги COT, де у звіті підкреслюється важливість стандартизації у торгівлі воднем [26]. У звіті Світового банку підкреслюється, що воднева економіка може стати рушійною силою економічного розвитку багатьох країн, зокрема тих, що мають багаті ресурси відновлюваної енергетики [27].

Важлива місія відводиться провідним країнам та інтеграційним угрупованням. Європейський Союз є одним із лідерів у формуванні водневої політики. У звіті «Погляд на водень 2024» зазначається, що ЄС планує збільшити виробництво «зеленого» водню та сприяти скороченню викидів вуглецю [22]. Це включає субсидії на виробництво водню з відновлюваних джерел та підтримку транскордонної торгівлі воднем. Важливо, що водень розглядається як стратегічний ресурс для енергетичної безпеки ЄС. Зміни в екологічній політиці, зокрема прийняття Паризької кліматичної угоди, стимулюють розвиток водневої економіки. Підкреслюється, що для досягнення кліматичних цілей 2050 р. необхідно значно скоротити використання викопних джерел енергії та зробити водень доступним для широкого кола галузей, від промисловості до транспорту [8].

На прохання уряду Японії під час її головування в G20 Міжнародне енергетичне агентство підготувало знаковий звіт, в якому проаналізувало поточний стан справ у водневій енергетиці та запропонувало рекомендації щодо її майбутнього розвитку [23]. У звіті зазначається, що чистий водень користується безпрецедентним політичним і діловим імпульсом, а кількість політик і проектів у всьому світі швидко зростає. У звіті робиться висновок, що зараз настав час розширювати технології та знижувати витрати, щоб забезпечити широке використання водню. Прагматичні та практичні рекомендації для урядів і промисловості, що містяться у звіті, дозволять повною мірою скористатися цим зростаючим імпульсом. На відміну від відновлюваних джерел енергії, таких як вітер, сонце та біогаз,

воднева економіка стала популярною та широко використовуваною завдяки своєму позитивному іміджу в засобах масової інформації та соціальним комунікаціям. Однак воднева економіка все ще залишається менш вивченою і не до кінця зрозумілою на соціальному рівні [21–23]. І це незважаючи на важливість водневої економіки, яка забезпечить чисте довкілля та можливість енергетичної незалежності країн.

Дослідження «Hydrogen Insights 2023» вказує на те, що водень може стати ключовим елементом для декарбонізації таких галузей промисловості, як сталеве виробництво, хімічна промисловість та виробництво електроенергії [24]. Ці галузі є основними споживачами викопного палива та джерелами значних викидів CO₂. Отже, використання водню як чистого джерела енергії є ключовим для досягнення цілей зі скорочення викидів парникових газів. Однак це вимагає значної трансформації існуючих виробничих процесів та впровадження інноваційних технологій, таких як електроліз, який допомагає зменшити викиди CO₂.

Обґрунтування та стратегування водневої економіки прослідковується і в наукових працях вітчизняних дослідників, роботи яких спрямовані на вивчення потенціалу водневої енергетики в умовах України, включаючи екологічні та економічні аспекти [28–36]. У своїх роботах вітчизняні науковці виділяють два ключові елементи розвитку водневої економіки в Україні, по-перше, вони відзначають сприятливі кліматичні умови, які роблять виробництво водню за допомогою «зелених» технологій можливим і прибутковим, а по-друге, підкреслюється потенціал співпраці з європейськими ініціативами, такими як інтеграція в енергосистему ENTSO-E, що відкриває нові можливості для розвитку водневої енергетики. Однак українські дослідники вказують і на певні виклики, що стоять перед енергетичною системою країни. Вони наголошують на неготовності енергетичної інфраструктури до масштабного впровадження водневих технологій та загальній складності переходу до відновлюваної енергетики.

Формулювання цілей статті

Метою статті є визначення проблем, специфіки розвитку інноваційного бізнесу й міжнародної торгівлі воднем, пріоритетних напрямів та особливостей інституціонального забезпечення енергетичного переходу з урахуванням необхідності забезпечення сталого пост-вуглецевого майбутнього.

Виклад основного матеріалу дослідження

Водень завдяки своїй екологічній чистоті може стати важливим елементом у забезпеченні сталого розвитку і реалізації глобальних цілей у сфері клімату. Інноваційний бізнес та продовження інвестицій у водневі технології, а також активна політика держав, спрямована на зменшення викидів парникових газів, може суттєво сприяти переходу до безвідходної економіки, де водень стане одним із основних енергетичних ресурсів. Водень – це хімічний елемент, який вважається одним із найперспективніших енергоносіїв майбутнього [37]. Оскільки він не виробляє вуглекислий газ під час згоряння, водень розглядається як чиста альтернатива традиційним вуглецевим паливам. Основні причини, чому водень набуває такої популярності, включають його здатність вирішувати проблеми зберігання та транспортування енергії, його універсальність у використанні як палива в різних секторах економіки, а також можливість виробництва водню з різних джерел, зокрема за допомогою відновлюваних джерел енергії, таких як сонце та вітер. Ключовим фактором у виробництві «зеленого» водню є доступ до відновлювальних джерел енергії, як вже згадувалося, це сонячна та вітрова енергія. Ці джерела енергії є необхідними для забезпечення електричної енергії, що використовується для електролізу води. Згідно з прогнозами, обсяги виробництва водню з відновлювальних джерел зростатимуть у найближчі роки. У 2020 р., за даними IEA, «зелений» водень становив лише 1% загального виробництва водню, однак до 2030 р. цей показник може зрости до 10% [21–24; 38–40].

На світовій арені воднева економіка стає предметом міжнародної торгівлі та інноваційного бізнесу. Країни, які багаті на ресурси відновлюваної енергії, такі як Австралія, Саудівська Аравія та Чилі, розробляють плани щодо експорту водню в ті регіони, де виробництво цього енергетичного ресурсу є менш економічно вигідним. Серед найбільших споживачів водню, які зацікавлені в імпорті «зеленого» водню, знаходяться Японія, Південна Корея та Німеччина. Ці країни вже сьогодні інвестують значні кошти в інфраструктуру для транспортування та зберігання водню, готуючи свої ринки до майбутнього буму.

Європейський Союз є одним із головних центрів споживання водню, і до 2030 р. потреба ЄС у водні може досягати 20–30 млн тонн на рік, з яких близько 50% планується імпортувати. Європейський Союз (ЄС) та багато інших країн інтегрували водень у свої довгострокові енергетичні стратегії. За допомогою Європейського зеленого курсу та Водневої стратегії ЄС має на меті стати першим кліматично нейтральним континентом до 2050 р. В рамках цієї стратегії ЄС планує встановити щонайменше 6 гігават (ГВт) потужностей електролізерів до 2024 р. з метою виробництва до 1 млн тонн «зеленого» водню щорічно. Очікується, що до 2030 р. ця потужність зросте до 40 ГВт, що дозволить виробляти 10 млн тонн водню [7].

За прогнозами, до 2050 р. водень задовольнятиме до 24% світових енергетичних потреб, а його річна ринкова вартість оцінюється в 630 млрд євро.

Країни Перської затоки, зокрема Саудівська Аравія, Оман та ОАЕ, також позиціонують себе як великі виробники водню. Наприклад, Саудівська Аравія має намір виробляти 4 мільйони тонн «зеленого» водню щорічно до 2030 р., тоді як Оман і ОАЕ мають амбітні плани стати значними експортерами водню, використовуючи свої багаті сонячні та вітрові ресурси для живлення електролізерів.

Оскільки водень починає відігравати все більш помітну роль у глобальних енергетичних системах, геополітика торгівлі енергоносіями неминуче змінюватиметься. Традиційно в енергетичній геополітиці домінували експортери викопного палива, такі як Близький Схід і росія. Однак перехід до водню має потенціал децентралізації виробництва енергії, що робить країни з багатими ресурсами відновлюваної енергії, такі як країни Перської затоки, Північної Африки та частини Європи, критично важливими гравцями на ринку водню, що формується.

Німеччина, наприклад, очікує, що 50–70% її попиту на водень, який, як очікується, досягне 90–110 терават-годин (ТВт-год) до 2030 р., потрібно буде задовольняти за рахунок імпорту. Це призвело до значної співпраці між Німеччиною та країнами-експортерами водню, особливо в регіоні Перської затоки. Співпраця між Німеччиною та Саудівською Аравією у виробництві, переробці та транспортуванні «зеленого» водню є прикладом нового енергетичного партнерства, яке виникає внаслідок того, як торгівля воднем стає реальністю. Також варто зазначити, що у 2021 р. Німеччина підписала угоди з Марокко щодо спільного виробництва «зеленого» водню, що є прикладом перших кроків до формування міжнародної торгівлі цим ресурсом.

Франція планує стати світовим лідером у виробництві екологічного водню до 2030 р., інвестуючи 7 млрд євро. Стратегія уряду включає три основні напрями: розвиток виробництва водню через електроліз, декарбонізацію важкого транспорту (включно з водневими вантажівками та літаками з нульовими викидами до 2035 р.) та підтримку інновацій і досліджень у галузі водневої енергетики. Компанії Total та Engie спільно будують найбільший у Франції завод з виробництва «зеленого» водню, який щодня вироблятиме 5 тонн водню з використанням сонячної енергії [39; 40]. Нідерланди та ОАЕ розпочали стратегічне партнерство для розвитку маршрутів транспортування водню з метою створення надійної інфраструктури для глобальної водневої економіки. Так само Нідерланди та Оман створили спільні підприємства для сприяння імпорту та експорту «зеленого» водню. Ці партнерства відображають зростаючу взаємозалежність між виробниками та споживачами водню – динаміку, яка, ймовірно, змінить світову торгівлю. Це підкреслює важливість розвитку міжнародних ланцюгів постачання водню, зокрема з регіонів, які багаті на відновлювані джерела енергії (Північна Африка, Близький Схід і Австралія).

Японія та Південна Корея також є великими споживачами водню, особливо в контексті декарбонізації промисловості та транспорту. У 2022 р. Японія імпортувала близько 300 тис. тонн водню, проте вже до 2030 р. цей показник може зрости до 3 млн тонн, (з урахуванням планів країни щодо розширення використання водню в енергетиці та транспорті). Південна Корея своєю чергою має амбітні плани щодо використання водню в судноплавстві та важкій промисловості, а тому розглядає можливість імпорту водню з Австралії та інших регіонів.

Сьогодні найбільшими імпортерами водню є країни Азії. Це передусім обумовлено попитом регіону на хімічні речовини, а також транспортними, залізничними і сталеливарними секторами в Китаї та Індії. Очікується, що ця тенденція збережеться і до 2050 р. Проте передбачається, що у Японії та Південній Кореї значна частка попиту на водень буде надходити від виробництва електроенергії, оскільки ці країни активно інвестують у створення водневої інфраструктури для підтримки національних енергетичних стратегій [20].

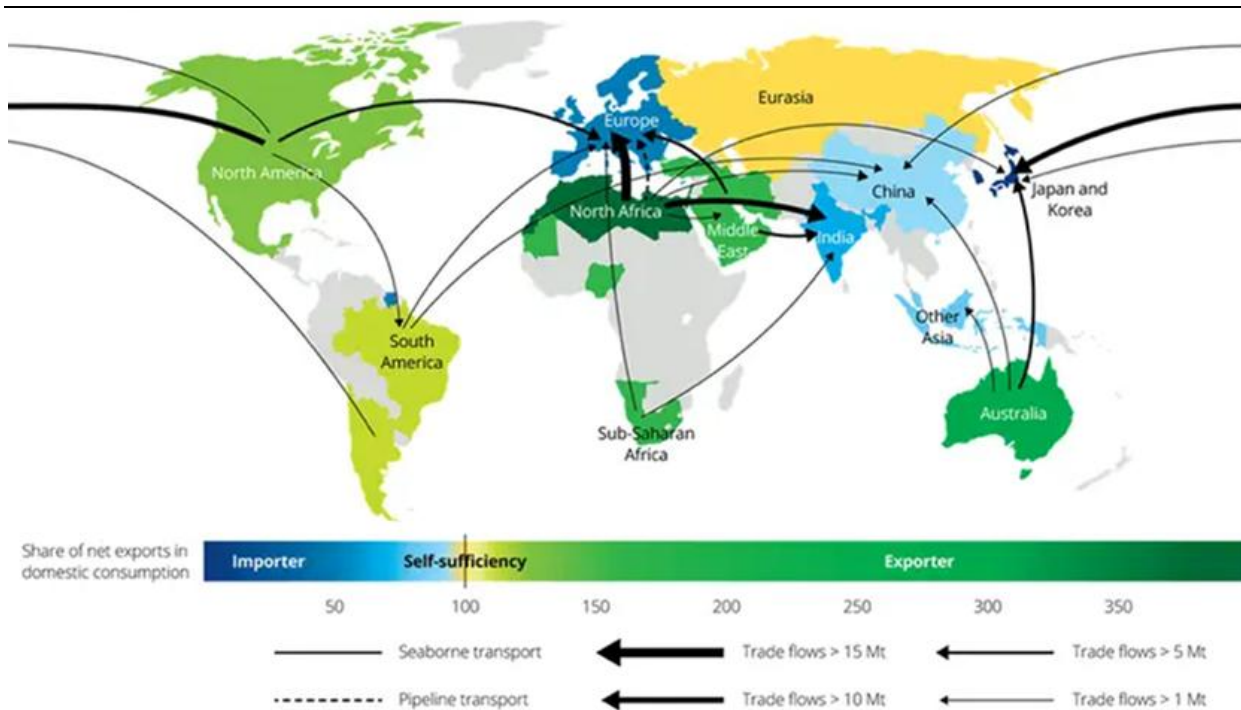
Основними експортерами водню у перспективі можуть стати країни Океанії, Північної Америки та Близького Сходу (рис. 1). На зараз Саудівська Аравія та Об'єднані Арабські Емірати вже розробляють плани щодо використання сонячної енергії для виробництва водню, орієнтованого на експорт. Також перспективно виглядає Австралія, яка завдяки своїм великим відновлюваним ресурсам, може стати лідером у виробництві «зеленого» водню [20].

Згідно з останніми оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA), світовий ринок водню поступово зростає, і за найбільш оптимістичними прогнозами, до 2030 р. обсяг міжнародної торгівлі воднем може досягнути 120 млн тонн на рік [22]. Це значне зростання порівняно з сьогоднішнім рівнем, оскільки на даний момент більшість водню споживається локально, без значних обсягів міждержавних поставок. Однак зі зростанням попиту на «зелений» водень, особливо в Європі та Азії, тенденція до активної торгівлі цим ресурсом поступово змінюється.

Зі статистичної точки зору, найзначніше зростання очікується в Азійсько-Тихоокеанському регіоні, де попит на чисту енергію стає дедалі більшим у зв'язку з високим рівнем індустріалізації та урбанізації. Звіт Hydrogen Council (2023) підкреслює, що до 2050 р. Азія може стати найбільшим регіоном для споживання водню, з часткою понад 50% від світового попиту [24] (табл. 1).

Сучасний ринок водню формується навколо кількох ключових гравців – як експортерів, так і імпортерів. З одного боку, країни з великими ресурсами відновлюваної енергії, такі як Австралія, Саудівська Аравія, Чилі та Марокко, мають конкурентні переваги для виробництва «зеленого» водню. Вони вже почали реалізовувати амбітні національні програми для розвитку водневої інфраструктури та укладання довгострокових контрактів на експорт водню. Австралія, наприклад, має на меті стати найбільшим світовим експортером водню до 2030 р. з потенційними ринками в Азії, особливо в Японії та Південній Кореї. Країна у 2021 р. підписала контракти з Японією на постачання водню, що стало першим прикладом великих міжнародних угод у цій галузі.

З іншого боку, країни, що є великими споживачами енергії і прагнуть знизити свої викиди парникових газів, є основними імпортерами водню.



Source: Deloitte analysis based on its Hydrogen Pathway Explorer (HyPE) model

Рис. 1. Ключові регіони глобальної торгівлі воднем у 2050 р. Джерело: [38].

Таблиця 1. Прогноз попиту на водень у 2050 році

Країна/Регіон	Частка попиту на водень у 2050 р., %
Китай	28,7%
Індія	10,1%
США	9,3%
Російська Федерація	7,8%
Японія	6,1%
Саудівська Аравія	5,5%
Європа	3,7%
Іран	3,5%
Сінгапур	3,2%
Індонезія	2,6%
Канада	2,5%
Німеччина	2,2%
Тринідад і Тобаго	1,8%
Об'єднані Арабські Емірати	1,8%
Бразилія	1,7%
Єгипет	1,7%
Республіка Корея	1,6%
Пакистан	1,4%
Катар	1,4%
Франція	1,2%
Південна Америка	1,1%
Велика Британія	1,0%

Джерело: [7].

Розвиток інноваційного бізнесу та зростання міжнародної торгівлі воднем супроводжується значними інвестиціями в інфраструктуру для його транспортування. Наприклад, компанія Air Liquide у 2022 р. інвестувала понад 8 млрд доларів у будівництво нових трубопроводів для транспортування водню в Європі, що дозволить збільшити обсяги експорту водню з країн з розвинутими відновлюваними джерелами енергії до споживачів у ЄС. Важливою тенденцією є також поява нових інноваційних технологій у виробництві, зберіганні та транспортуванні водню. Ключовим фактором є зниження витрат на електроліз води, що дозволяє отримувати «зелений» водень з відновлюваних джерел енергії за

Японія стала першою країною у світі, яка розробила національну водневу стратегію, передбачаючи імпорт водню у великих масштабах. У той час як Японія вже інвестує в міжнародні проекти з виробництва водню, наприклад, в Австралії та Брунеї, Південна Корея також робить акцент на імпорт водню для декарбонізації свого промислового сектору. У Європі Німеччина є лідером за темпами розвитку водневої економіки, вона активно інвестує в міжнародні проекти, зокрема в Північній Африці, щоб забезпечити постачання «зеленого» водню для своїх підприємств.

Зростання ролі водню як глобального енергоносія вимагає значних змін як у торговельній, так і екологічній політиці. Торговля воднем стикається з кількома унікальними викликами, включаючи високі транспортні витрати та невирішені технологічні питання, пов'язані з безпекою та зберіганням. Транспортування водню на великі відстані, особливо морським транспортом, наразі не є економічно доцільним без значного технологічного прориву [41]. Як наслідок, у найближчій перспективі торгівля воднем, ймовірно, відбуватиметься переважно між сусідніми країнами через трубопроводи, що обмежуватиме масштаби міжнародної торгівлі доти, доки не будуть розроблені технології, що зменшують витрати.

Щоб підтримати зростання водневої економіки, урядам і міжнародним організаціям необхідно буде розробити нові правила і стандарти для виробництва, транспортування і споживання водню. ЄС вже зробив кроки в цьому напрямі, створивши Європейський альянс чистого водню, який об'єднує підприємства, громадські організації та державні органи для координації зусиль, пов'язаних з воднем, на всьому континенті [10]. Крім того, воднева стратегія ЄС передбачає значні інвестиції у виробництво водню з відновлюваних джерел, загальний обсяг яких, за оцінками, становитиме від 180 до 470 млрд євро до 2050 р. [46].

нижчими цінами. За даними звіту BloombergNEF (2022), очікується, що вартість виробництва «зеленого» водню впаде на 85% до 2030 р., що зробить його конкурентоспроможним порівняно з воднем, отриманим із природного газу [16]. Крім того, нові технології зберігання, зокрема використання аміаку як транспортувального носія для водню, дозволяють знизити витрати на транспортування і збільшити економічну ефективність міжнародної торгівлі воднем.

Розвитку інноваційного бізнесу сприяють залучення різних груп стейкхолдерів та технологічні інновації в сфері водневої економіки. Прогрес у водневих технологіях може не лише знизити витрати, а й підвищити конкурентоспроможність водню на світовому ринку. Важливою тенденцією є зростання ролі приватного сектору в розвитку міжнародної водневої торгівлі. Такі глобальні корпорації, як Shell, Siemens, та Toyota, активно інвестують у водневі проєкти та створюють партнерства з урядами для розробки міжнародних ланцюгів постачання. Це свідчить про те, що воднева економіка стає не тільки політичним, а й економічним пріоритетом.

Ще одним ключовим фактором є збільшення попиту на водень з боку важкої промисловості та транспорту. Сектори, де складно зменшити викиди за допомогою електрифікації, такі як сталеливарна, цементна та хімічна промисловості, активно досліджують можливості використання водню для заміни викопного палива. Наприклад, шведська компанія SSAB разом з іншими європейськими партнерами вже розпочала будівництво першого заводу для виробництва сталі з використанням водню, що дозволить зменшити викиди CO₂ на 90% порівняно з традиційними методами. Значне зростання попиту на водень також спостерігається у транспортній галузі, особливо в сегментах важких вантажівок, судноплавства та авіації. Хоча електрифікація легкових автомобілів вже стала масовою тенденцією, важкий транспорт потребує більш енергоємних рішень, і водень у цьому контексті є перспективним варіантом. За прогнозами Hydrogen Council, до 2050 р. до 20% усіх вантажних автомобілів у світі можуть працювати на водневих паливних елементах [3]. Подібні прогнози є і щодо судноплавства, де водень і його похідні, такі як аміак, можуть стати основним видом палива для великих океанських суден.

Важливу роль у зростанні попиту на водень відіграє і його використання для зберігання енергії. Водень можна виробляти з надлишкової електроенергії від відновлюваних джерел, таких як сонце та вітер, і зберігати його для подальшого використання в моменти пікового попиту. Це дозволяє вирішити одну з головних проблем відновлюваної енергетики – нестабільність виробництва. Уряди країн, що активно розвивають «зелену» енергетику, вже інвестують значні кошти в інфраструктуру для зберігання водню. Наприклад, Німеччина виділила понад 2 млрд євро на розвиток інфраструктури для зберігання водню, зокрема будівництво підземних сховищ та трубопроводів.

Таким чином, статистичні дані показують, що ринок водню перебуває на стадії активного розвитку, і хоча обсяги міжнародної торгівлі воднем ще відносно невеликі, проте зростання попиту та інвестицій свідчить про швидкі зміни в цьому секторі. Це підтверджується прогнозами, що вже до середини століття водень стане ключовим елементом глобальних енергетичних ринків. Наразі глобальний ринок водню набирає обертів, перетворюючись на один із динамічніших елементів у світовій енергетиці. Водень уже відіграє важливу роль у таких галузях, як хімічна промисловість та виробництво добрив, проте його основний потенціал полягає в декарбонізації таких важких секторів економіки, як сталеливарна промисловість, судноплавство та авіація. За даними звіту Hydrogen Council [3], глобальний ринок водню вже досяг вартості понад 160 млрд доларів і прогнозується, що до 2050 р. цей показник зросте в десятки разів. Крім того, водень може використовуватися для декарбонізації таких секторів, як важка промисловість, виробництво сталі та цементу, де інші джерела відновлюваної енергії, наприклад, сонячна або вітрова енергетика, є менш ефективними.

Важливість водню також полягає в його здатності вирішити питання енергетичного переходу та інтеграції відновлюваних джерел енергії в глобальну енергетичну систему. Оскільки сонячна та вітрова енергетика є змінними, використання водню як акумулятора енергії дозволяє зберігати надлишки енергії та використовувати їх в періоди підвищеного попиту. Це є важливим фактором у стабілізації енергетичних систем і зменшенні залежності від традиційних джерел енергії.

У найближчі десятиліття попит на водень на глобальному рівні продовжить зростати, і це стане однією з ключових тенденцій в енергетичному секторі. Глобальна воднева економіка формується на перетині енергетичної безпеки та боротьби з кліматичними змінами. Згідно з даними Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA), вже до 2050 р. попит на водень може досягти 600 млн тонн на рік, що приблизно в шість разів перевищує сучасний рівень [1]. Основними імпортерами будуть країни Європи та Азії, а основними експортерами – країни з розвинутими відновлюваними джерелами енергії.

Головним глобальним тригером розвитку і зростання є цілі щодо декарбонізації. Наприклад, Європейський Союз у своїй Стратегії з відновлюваних джерел енергії та декарбонізації планує досягти нульового рівня викидів до 2050 р., і водень є ключовим елементом цієї стратегії. ЄС була запущена стратегія з розвитку водневої економіки, яка передбачає створення транс'європейської мережі для транспортування водню та інтеграцію його в загальний енергетичний ринок. Німеччина (як лідер ЄС у питаннях водневої економіки) вже виділила 9 млрд євро на підтримку національних і міжнародних водневих проєктів. Водночас уряд Японії виділив понад 19 млрд доларів на розвиток водневих технологій у рамках свого плану досягти вуглецевої нейтральності до 2050 р.

Сучасні тенденції в міжнародній торгівлі воднем демонструють значний прогрес у інституціональному забезпеченні енергетичного переходу країнами та розвитку як інфраструктури, так і політичної підтримки, що спрямовані на активізацію водневої економіки. Водень перетворюється на товар стратегічного значення, і глобальні енергетичні ланцюги адаптуються до нової реальності. Однією з ключових тенденцій є розвиток партнерства між країнами-експортерами, багатими на відновлювані джерела енергії, і країнами-імпортерами, що мають високий рівень попиту на чисту енергію. Уряди різних країн також активно підтримують розвиток водневої інфраструктури на міжнародному рівні.

Водень став важливим елементом глобальних енергетичних стратегій країн через його здатність вирішувати низку ключових викликів сучасної енергетики. Зокрема, його використання дозволяє не тільки зменшити викиди CO₂, але й забезпечити енергетичну стабільність завдяки можливості зберігання енергії, а особливо в контексті інтеграції відновлюваних джерел енергії в енергетичні системи. Це особливо важливо для таких країн, як Японія та Південна Корея, які імпортують значну частину своєї енергії та прагнуть знизити залежність від викопних джерел палива.

Збільшення попиту на водень стимулює країни розвивати нові потужності для його виробництва та експорту. Наприклад, Саудівська Аравія розробляє масштабні проекти з виробництва «зеленого» водню, використовуючи свої значні ресурси відновлюваної енергії. Австралія також є одним із ключових гравців на ринку завдяки своїм великим резервам сонячної та вітрової енергії, які дозволяють їй виробляти водень з низькими викидами. У звіті IRENA зазначено, що Австралія може стати одним із найбільших експортерів водню у світі, зокрема в регіоні Азійсько-Тихоокеанського басейну [1].

Інституціональне забезпечення енергетичного переходу реалізується на глобальному і макrorівні. На глобальному рівні – через систему норм і правил регулювання міжнародного ринку, політику міжнародних торговельних угод й митного регулювання, міжнародну координацію щодо впровадження стандартів якості та безпеки водню. На макrorівні – через державні інституції, регуляторну базу та стратегії розвитку водневої економіки, які вже стали невід’ємною частиною енергетичних планів багатьох країн, що прагнуть досягти вуглецевої нейтральності, скорочення викидів парникових газів і підвищення енергетичної безпеки. Національні уряди, міжнародні організації та корпорації співпрацюють, створюючи нормативну базу для стимулювання водневих технологій і торгівлі. Торговельна політика має адаптуватися до реалій водневої економіки. Наразі глобальні торговельні угоди не враховують унікальні виклики торгівлі воднем, такі як потреба в спеціалізованій транспортній інфраструктурі та потенційний вплив виробництва водню на навколишнє середовище. Для сприяння міжнародній торгівлі воднем необхідно буде оновити існуючі торговельні угоди, включивши до них положення про виробництво і транспортування водню, а також створити нові рамки для міжнародного співробітництва у сфері водневих технологій.

Важливою складовою інституціонального забезпечення енергетичного переходу та розвитку глобального ринку водню є співпраця між країнами у питаннях стандартизації та сертифікації «зеленого» водню. Міжнародні організації, такі як IEA та Європейська комісія, розробляють механізми для перевірки походження водню, що дозволить гарантувати відповідність його виробництва стандартам екологічної сталості. Важливість стандартизації у торгівлі воднем підкреслюється і COT. У звіті COT зазначається, що одним з ключових аспектів є створення єдиних міжнародних стандартів для виробництва і транспортування водню, що спростить торговельні бар’єри між країнами. Наголошується на інтеграції водневих ринків з існуючими енергетичними мережами та забезпеченні сумісності технологій [26]. Крім того, політика міжнародних торговельних угод та митного регулювання також впливає на можливості міжнародної торгівлі воднем. Країни, що входять до великих економічних блоків, таких як ЄС або Азійсько-Тихоокеанське економічне співтовариство (АРЕС), прагнуть спрощувати торговельні бар’єри для розвитку нових ринків водню. Угоди про вільну торгівлю можуть сприяти розвитку водневої торгівлі між країнами, а також зниженню витрат на логістику і транспортування водню.

Водночас міжнародна координація щодо впровадження стандартів якості та безпеки водню є критично важливою. Наприклад, у 2022 р. Hydrogen Council разом із міжнародними стандартами організаціями розпочав роботу над розробкою глобальних стандартів для виробництва, транспортування та використання водню. Ці стандарти будуть необхідними для забезпечення якості водню, його безпеки під час перевезення та зберігання, а також для стимулювання розвитку міжнародної торгівлі.

Міжнародні організації, такі як Міжнародне енергетичне агентство (IEA), Hydrogen Council та Організація Об’єднаних Націй (ООН), також відіграють важливу роль у формуванні глобальної політики щодо водню. IEA активно підтримує дослідження та співпрацю між країнами для розвитку водневої економіки, за його оцінками у 2050 р. водень може забезпечувати до 12% світових енергетичних потреб, що робить його одним із найважливіших компонентів глобальної енергетичної системи. У своєму звіті за 2022 р. IEA підкреслило важливість міжнародної координації для розвитку інфраструктури та зниження вартості виробництва «зеленого» водню. Окрім того, в рамках IEA були створені спеціальні групи для розробки рекомендацій щодо стимулювання міжнародної торгівлі воднем.

Однак на початкових етапах державні субсидії на підтримку виробництва і транспортування водню залишаються важливими, про що зазначається у звіті Світового банку (2023) [27]. Воднева економіка може мати значний вплив на ринок праці, створюючи нові робочі місця у сферах виробництва, транспортування та зберігання водню. Це особливо важливо для країн, які прагнуть модернізувати свою економіку і рухатися в контексті сталого розвитку.

Успішний розвиток водневої економіки залежить від стратегій ключових гравців (як виробників, так і споживачів). В Європі Європейський Союз взяв на себе лідерство в розробці водневої стратегії, яка є важливим елементом «Зеленого курсу» (European Green Deal). У 2020 р. було опубліковано Європейську водневу стратегію, що передбачає досягнення нульових викидів до 2050 р., а водень відіграє ключову роль у цьому переході [43]. План передбачає виробництво до 10 млн тонн «зеленого» водню до 2030 р. та імпорту значних обсягів з країн, багатих на відновлювані ресурси, таких як Марокко, Чилі та Австралія. Регуляторна база для торгівлі воднем у ЄС зосереджена на стимулюванні розвитку інфраструктури, встановленні стандартів якості водню та забезпеченні економічної конкурентоспроможності цього ресурсу. У Європі Німеччина та Нідерланди стали лідерами у просуванні водню, причому обидві країни роблять значні інвестиції в потужності електролізерів та водневу інфраструктуру. На рівні національних стратегій одним з яскравих прикладів є Німеччина, яка у 2020 р. презентувала свою Національну водневу стратегію (Nationale Wasserstoffstrategie). Ця стратегія передбачає інвестиції понад 9 млрд євро в розробку технологій виробництва водню та розвиток міжнародних торговельних відносин. Важливим елементом стратегії є стимулювання імпорту водню з країн з великим потенціалом відновлюваної енергії, таких як Марокко. Німеччина активно розвиває проекти співпраці для забезпечення довгострокових поставок водню для власних потреб і всього ЄС.

Інші країни, такі як Великобританія, роблять значні кроки у виробництві водню. До 2030 р. Великобританія планує мати 5 ГВт потужностей «зеленого» водню, а до 2050 р. очікується, що водень буде забезпечувати 20–35% загального попиту на енергію в країні. Ці зусилля є частиною більш широких зусиль з декарбонізації економіки Великобританії та зменшення її залежності від викопних видів палива [7].

У регіоні Перської затоки Саудівська Аравія поставила амбітну мету виробляти 4 мільйони тонн «зеленого» водню щорічно до 2030 р. Оман та ОАЕ також окреслили плани стати великими виробниками водню, причому Оман має намір виробляти до 2050 р. до 8,5 млн тонн водню щорічно. Ці країни Перської затоки використовують свої багаті ресурси відновлюваної енергії для масштабного виробництва водню, позиціонуючи себе як ключових постачальників у світовій водневій економіці.

Інші країни також активно працюють над розвитком власних водневих стратегій. Японія, одна з перших країн, що впровадила національну стратегію водневої економіки у 2017 р., планує до 2050 р. стати лідером у глобальній водневій економіці. Уряд Японії виділив понад 19 млрд доларів на стимулювання виробництва та використання водню. Особливу увагу приділено розвитку технологій для виробництва «зеленого» водню та формуванню міжнародних торговельних відносин, зокрема з Австралією, яка є потенційним великим експортером цього ресурсу.

Україна має потенціал для того, щоб відігравати значну роль у європейській водневій економіці. Величезні ресурси відновлюваної енергії в країні, зокрема, вітрової та сонячної, роблять її ідеальним кандидатом для виробництва «зеленого» водню [2; 35; 36]. Українські науковці, підприємці та навчальні заклади вже починають вивчати можливості, які відкриває воднева стратегія ЄС. Наприклад, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського (КПІ) був визначений як потенційний центр водневих досліджень та інновацій, де університет готовий готувати фахівців і розробляти нові технології для водневої промисловості [44].

Участь України у водневій стратегії ЄС може дати значний поштовх економіці країни, особливо в секторі відновлюваної енергетики. Міністерство енергетики України вже працює над дорожньою картою розвитку водневої енергетики, а український бізнес робить кроки для участі в реалізації водневої стратегії ЄС [35].

Таким чином, з огляду на тенденції та динаміку, можна очікувати, що попит на водень буде зростати в геометричній прогресії, охоплюючи дедалі більше секторів економіки, і стимулюватиме розвиток інноваційного бізнесу та міжнародної торгівлі воднем, вдосконалюючи при цьому інституціональне забезпечення енергетичного переходу для сталого пост-вуглецевого майбутнього.

Висновки та перспективи подальших розвідок

Зважаючи на те, що світові енергетичні потреби продовжують зростати, водень відіграє важливу роль у задоволенні цього попиту, особливо в контексті екологічно чистих технологій. Водень має потенціал зіграти трансформаційну роль у декарбонізації глобальної економіки, оскільки країни переходять від викопного палива до чистої енергії. Воднева економіка є тригером розвитку інноваційного бізнесу та міжнародної торгівлі воднем, що є важливою складовою глобального енергетичного переходу. Однак серйозні проблеми залишаються (особливо у сферах транспорту та інфраструктури). Щоб повністю реалізувати потенціал водню, уряди та міжнародні організації повинні розробити нову торговельну та екологічну політику для вирішення унікальних проблем виробництва, транспортування та споживання водню. Розвиток водневої економіки вимагає інновацій, значних інвестицій у технології та інфраструктуру, а також нового партнерства між виробниками та споживачами водню. Оскільки водень стає все ширше використовуватися в усіх секторах економіки, геополітичний та економічний ландшафт енергетики продовжуватиме розвиватися, створюючи нові можливості та виклики для виробників і споживачів. Інституціоналізація у сфері водневої торгівлі перебуває на стадії активного формування, і більшість країн роблять ставку на розвиток інститутів і політик, які стимулюватимуть зростання водневої економіки. Міжнародна співпраця і регуляторні угоди мають вирішальне значення для успішного формування глобального ринку водню. Зрештою, успішний розвиток водневої економіки буде залежати

від міжнародного співробітництва, технологічних інновацій і далекоглядних політичних рішень, спрямованих на створення сталого пост-вуглецевого майбутнього.

Література

1. Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: part I – trade outlook for 2050 and way forward. 2022. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022_.pdf
2. Yatsenko O., Iatsenko O. Trends and prospects in international hydrogen trade in the face of new barriers and challenges to global cooperation. *Actual Problems of International Relations*. 2024. Vol. 1. no. 161, pp. 177-189. DOI: <https://doi.org/10.17721/apmv.2024.161.1>.
3. Global Hydrogen Review 2024. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
4. The Future of Hydrogen (2019). IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
5. Hydrogen, IEA, Paris. URL: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>.
6. Low-emission hydrogen production can grow massively by 2030 but cost challenges are hampering deployment. 2024. URL: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>
7. Werner Antweiler, David Schlund. The emerging international trade in hydrogen: Environmental policies, innovation, and trade dynamics. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2024. Vol. 127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2024.103035>.
8. Dawood Hjeij, Yusuf Bicer, Mohammed bin Saleh Al-Sada, Muammer Koç. Hydrogen export competitiveness index for a sustainable hydrogen economy. *Energy Reports*, 2023. Vol. 9, pp. 5843-5856. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.024>.
9. Krzysztof Urbaniec, Anton Friedl, Donald Huisingh, Pieter Claassen. Hydrogen for a sustainable global economy. *Journal of Cleaner Production*. 2010. Vol. 18 (Suppl. 1) DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.05.010>.
10. Enabling the European hydrogen economy. 2021. URL: <https://auroraer.com/insight/enabling-the-european-hydrogen-economy/>.
11. Yatsenko O., Duginets G., Panchenko V. European integration imperatives of Ukraine's post-war reconstruction on the basis of sustainability: in search of sources of financing. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*. 2024 Vol. 334 (5), pp. 616-623. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-334-93>.
12. Michael A. Semeraro III. Renewable energy transport via hydrogen pipelines and HVDC transmission lines. *Energy Strategy Reviews*. 2021. Vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100658>.
13. Pedro J. Megía Arturo J. Vizcaíno José A. Calles Alicia Carrero. Hydrogen Production Technologies: From Fossil Fuels toward Renewable Sources. *A Mini Review. Energy & Fuels*. 2021. Vol. 35. Issue 20. URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>.
14. Flavio Pinheiro Martins, Sofia De-León Almaraz, Amilton Barbosa Botelho Junior, Catherine Azzaro-Pantel, Priti Parikh. Hydrogen and the sustainable development goals: Synergies and trade-offs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114796>.
15. Duginets, G., Yatsenko, O., & Panchenko, V. International experience of post-war reconstruction: triggers of socio-economic development in the conditions of decentralization. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 2024. Vol. 328 (2), pp. 497-505. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-328-74>.
16. Kamala Schelling (2023). Green Hydrogen to Undercut Gray Sibling by End of Decade. BloombergNEF. URL: <https://about.bnef.com/blog/green-hydrogen-to-undercut-gray-sibling-by-end-of-decade/>
17. Osaulenko O., Yatsenko O., Reznikova N., Rusak D., Nitsenko V. (). The productive capacity of countries through the prism of sustainable development goals: challenges to international economic security and to competitiveness. *Financial and credit activity: problems of theory and practice*. 2020. Vol. 2, no 33. pp. 492-499. DOI: <https://doi.org/10.18371/fcaptive.v2i33.207214>.
18. Reznikova N., Grod M. Institutionalization of climate change combat in the eu and socio-economic effects of industry decarbonization. *Actual Problems of International Relations*, 2024. issue 158, pp. 59-60.
19. Yatsenko O., Panchenko V., Ivashchenko O. Climatic limitations of economic growth as challenges of financing international investment projects in the sphere of circular economy. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 2024. Vol. 332(4), pp. 82-89. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-332-11>.
20. What is hydrogen energy? McKinsey&Company. 2024. URL: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-hydrogen-energy>.
21. Hydrogen Insights 2021. A Perspective on Hydrogen Investment, Deployment and Cost Competitiveness. URL: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>.
22. Hydrogen Insights 2024. URL: <https://hydrogencouncil.com/uploads/2024/09>.
23. Hydrogen isn't the fuel of the future. It's already here. 2019. URL: <https://www.weforum.org/stories/2019/06/the-clean-energy-of-the-future-is-already-here/>.
24. Hydrogen Insights 2023 URL: <https://hydrogencouncil.com>.
25. Fatih Birol (2019). The Future of Hydrogen. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
26. WTO report: International trade and green hydrogen. Supporting the global transition to a low-carbon economy. (2022). URL: https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/green_hydrogen_e.pdf.
27. World Bank Report (2023). Scaling hydrogen financing for development. URL: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022024121527489/pdf/P1809201780da10e518c061a2e73041a6fc.pdf#:~:text=consultations%20with%20client%20countries%20and%20private%20sector>.
28. Shkvarylyuk S. (2024). Effective implementation of green energy in Ukraine: theoretical and applied aspects. *Collection of Scientific Papers "Scientific Notes"*, Vol. 34 (1), pp. 252-261. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.34.24.01.21.145.151/

29. Рєпкін О. (2020). Плани ЄС щодо розвитку водневої галузі до 2030 року та перспективи України у цій екосистемі. URL: <https://ecolog-ua.com/news/plany-yes-shchodo-rozvytku-vodnevoyi-galuzi-do-2030-roku-ta-perspektyvy-ukrayiny-u-ciy>.
30. Onysiuk, S. Mechanisms of international economic cooperation to support the global energy transition: ways to improve. *Collection of Scientific Papers "Scientific Notes"*. 2024. Vol. 36 (3), pp. 254-271. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.22.152.158.
31. Зеленько О. О., Гуцан Т. Г., Осьмірко І. В. Воднева енергетика та перспективи її розвитку в економіці України. *БІЗНЕСІНФОРМ*. 2022. № 8. С. 20-26. URL: https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2022-8_0-pages-20_26.pdf.
32. Dmitriiieva, O. Social factors influence on energy efficiency management and development of renewable energy sources. *Collection of Scientific Papers "Scientific Notes"*. 2024. № 36 (3), pp. 42-49. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.04.026.032.
33. Khalatur, S. Financial component of the hydrogen economy development strategy of Ukraine. *Collection of Scientific Papers "Scientific Notes"*, 2024. № 36 (3), pp. 242-253. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.21.145.151.
34. Reznikova N., Grod M. Macroeconomic impacts of the circular transition: the green swans of decarbonization on the path to sustainability. *Actual Problems of International Relations*. 2024. issue 160, pp. 110-120.
35. Валова Ю., Лінінг В. Український водень: повосенні перспективи виробництва та міжнародний ринок. 2024. URL: <https://business.rayon.in.ua/topics/696730-ukrainskiy-voden-povoenni-perspektivi-virobnitstva-ta-mizhnarodniy-rinok>.
36. Лопушанська М. Відновлюваний водень: роль України у забезпеченні Європи. 2023. URL: <https://ukraine-oss.com/vidnovlyuvanyj-voden-rol-ukrayiny-u-zabezpechenni-yevropy/>.
37. Hydrogen chemical element. URL: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>.
38. Here's how global trade will be key to unlocking the full potential of the green hydrogen market. 2023. URL: <https://www.businessinsider.com/sc/investing-in-green-hydrogen-could-get-us-to-net-zero>.
39. Green hydrogen: a new step in the energy transition. 2024. URL: <https://surfeo.eu/green-hydrogen-a-new-step-in-the-energy-transition/>.
40. Hydrogen blending: A step on the path to net zero. 2022. URL: <https://clarus.co.nz/content-hub/hydrogen-blending-a-big-step-on-the-path-to-net-zero>.
41. Qianzhi Z., Lining W., Wenyang C., Chenglong Z. Assessing the impact of hydrogen trade towards low-carbon energy transition. *Applied Energy*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124233>.
42. Shijie W., Romain S., Arnold T., Sangwon S., Bernhard S. Future environmental impacts of global hydrogen production. *Energy & Environmental Science*. 2024. Issue 6. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3EE03875K>.
43. Ad van Wijk, Frank Wouters (2021). Hydrogen–The Bridge Between Africa and Europe. DOI: 10.1007/978-3-030-74586-8_5.
44. «Воднева революція» КПП долучається до нової стратегії ЄС (2020). URL: <https://kpi.ua/ru/hydrogen-strategy-about>.

References

1. *Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward*. (2022). Available at: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Global_hydrogen_trade_part_1_2022.pdf.
2. Yatsenko, O., & Iatsenko, O. (2024). Trends and prospects in international hydrogen trade in the face of new barriers and challenges to global cooperation. *Actual Problems of International Relations*, Vol. 1, no. 161, pp. 177–189. DOI: <https://doi.org/10.17721/apmv.2024.161.1>.
3. *Global Hydrogen Review 2024*. International Energy Agency. Available at: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
4. *The Future of Hydrogen*. (2019). IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
5. *Hydrogen*. IEA, Paris. Available at: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>.
6. *Low-emission hydrogen production can grow massively by 2030 but cost challenges are hampering deployment*. (2024). Available at: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>.
7. Antweiler, W., & Schlund, D. (2024). The emerging international trade in hydrogen: Environmental policies, innovation, and trade dynamics. *Journal of Environmental Economics and Management*, Vol. 127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeeem.2024.103035>.
8. Hjeij, D., Bicer, Y., Al-Sada, M. B. S., & Koç, M. (2023). Hydrogen export competitiveness index for a sustainable hydrogen economy. *Energy Reports*, Vol. 9, pp. 5843–5856. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.024>.
9. Urbaniec, K., Friedl, A., Huisingh, D., & Claassen, P. (2010). Hydrogen for a sustainable global economy. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 18 (Suppl. 1). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.05.010>.
10. *Enabling the European hydrogen economy*. (2021). Available at: <https://auroraer.com/insight/enabling-the-european-hydrogen-economy/>.
11. Yatsenko, O., Duginets, G., & Panchenko, V. (2024). European integration imperatives of Ukraine's post-war reconstruction on the basis of sustainability: In search of sources of financing. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, Vol. 334 (5), pp. 616–623. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-334-93>.
12. Semeraro III, M. A. (2021). Renewable energy transport via hydrogen pipelines and HVDC transmission lines. *Energy Strategy Reviews*, Vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2021.100658>.
13. Megía, P. J., Vizcaíno, A. J., Calles, J. A., & Carrero, A. (2021). Hydrogen production technologies: From fossil fuels toward renewable sources. A mini review. *Energy & Fuels*, Vol. 35, Issue 20. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.energyfuels.1c02501>.
14. Martins, F. P., De-León Almaraz, S., Botelho Junior, A. B., Azzaro-Pantel, C., & Parikh, P. (2024). Hydrogen and the sustainable development goals: Synergies and trade-offs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114796>.

15. Duginets, G., Yatsenko, O., & Panchenko, V. (2024). International experience of post-war reconstruction: Triggers of socio-economic development in the conditions of decentralization. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, Vol. 328 (2), pp. 497–505. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-328-74>.
16. Schelling, K. (2023). Green hydrogen to undercut gray sibling by end of decade. *BloombergNEF*. Available at: <https://about.bnef.com/blog/green-hydrogen-to-undercut-gray-sibling-by-end-of-decade/>.
17. Osaulenko, O., Yatsenko, O., Reznikova, N., Rusak, D., & Nitsenko, V. (2020). The productive capacity of countries through the prism of sustainable development goals: Challenges to international economic security and to competitiveness. *Financial and Credit Activity: Problems of Theory and Practice*, Vol. 2, no. 33, pp. 492–499. DOI: <https://doi.org/10.18371/fcaptp.v2i33.207214>.
18. Reznikova, N., & Grod, M. (2024). Institutionalization of climate change combat in the EU and socio-economic effects of industry decarbonization. *Actual Problems of International Relations*, Issue 158, Pp. 59–60.
19. Yatsenko, O., Panchenko, V., & Ivashchenko, O. (2024). Climatic limitations of economic growth as challenges of financing international investment projects in the sphere of circular economy. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, Vol. 332 (4), pp. 82–89. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-332-11>.
20. *What is hydrogen energy?* (2024). McKinsey & Company. Available at: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-hydrogen-energy>.
21. Hydrogen Insights 2021. A Perspective on Hydrogen Investment, Deployment and Cost Competitiveness. Available at: <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>.
22. Hydrogen Insights 2024. Available at: <https://hydrogencouncil.com/uploads/2024/09>.
23. Hydrogen isn't the fuel of the future. It's already here. (2019). Available at: <https://www.weforum.org/stories/2019/06/the-clean-energy-of-the-future-is-already-here/>.
24. Hydrogen Insights 2023. Available at: <https://hydrogencouncil.com>.
25. Birol, F. (2019). *The Future of Hydrogen*. Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
26. WTO report: International trade and green hydrogen. Supporting the global transition to a low-carbon economy. (2022). Available at: https://www.wto.org/english/res_e/booksp_e/green_hydrogen_e.pdf.
27. World Bank Report. (2023). *Scaling hydrogen financing for development*. Available at: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022024121527489/pdf/P1809201780da10e518c061a2e73041a6fc.pdf>.
28. Shkvarylyuk, S. (2024). Effective implementation of green energy in Ukraine: theoretical and applied aspects. *Scientific Notes*, Vol. 34 (1), pp. 252–261. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.34.24.01.21.145.151.
29. Repkin, O. (2020). Plany YeS shchodo rozvytku vodnevoi haluzi do 2030 roku ta perspektyvy Ukrainy u tsiy ekosystemi [Plans of the EU for the development of the hydrogen industry until 2030 and Ukraine's prospects in this ecosystem]. Available at: <https://ecolog-ua.com/news/plany-yes-shchodo-rozvytku-vodnevoyi-galuzi-do-2030-roku-ta-perspektyvy-ukrayiny-u-ciy>.
30. Onysiuk, S. (2024). Mechanisms of international economic cooperation to support the global energy transition: ways to improve. *Scientific Notes*, Vol. 36 (3), pp. 254–271. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.22.152.158.
31. Zelenko, O. O., Gutsan, T. H., Osmirko, I. V. (2022). Vodneva enerhetyka ta perspektyvy yii rozvytku v ekonomitsi Ukrainy [Hydrogen energy and its development prospects in Ukraine's economy]. *Business Inform*, No. 8, pp. 20–26. Available at: https://www.business-inform.net/export_pdf/business-inform-2022-8_0-pages-20_26.pdf.
32. Dmitriieva, O. (2024). Social factors influence on energy efficiency management and development of renewable energy sources. *Scientific Notes*, no. 36 (3), pp. 42–49. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.04.026.032.
33. Khalatur, S. (2024). Financial component of the hydrogen economy development strategy of Ukraine. *Scientific Notes*, No. 36 (3), pp. 242–253. DOI: http://doi.org/10.33111/vz_kneu.36.24.03.21.145.151.
34. Reznikova, N., Grod, M. (2024). Macroeconomic impacts of the circular transition: the green swans of decarbonization on the path to sustainability. *Actual Problems of International Relations*, Issue 160, pp. 110–120.
35. Valova, Yu., Lining, V. (2024). Ukrainyskyi voden: povoyenni perspektyvy vyrobnytstva ta mizhnarodnyi rynok [Ukrainian hydrogen: post-war production prospects and the international market]. Available at: <https://business.rayon.in.ua/topics/696730-ukrainskiy-voden-povoenni-perspektivi-virobnitstva-ta-mizhnarodniy-rinok>.
36. Lopushanska, M. (2023). Vidnovlyuvanyi voden: rol Ukrainy u zabezpechenni Yevropy [Renewable hydrogen: Ukraine's role in Europe's supply]. Available at: <https://ukraine-oss.com/vidnovlyuvanyj-voden-rol-ukrayiny-u-zabezpechenni-yevropy/>.
37. Hydrogen chemical element. Available at: <https://www.britannica.com/science/hydrogen>.
38. Here's how global trade will be key to unlocking the full potential of the green hydrogen market. (2023). Available at: <https://www.businessinsider.com/sc/investing-in-green-hydrogen-could-get-us-to-net-zero>.
39. Green hydrogen: a new step in the energy transition. (2024). Available at: <https://surfeo.eu/green-hydrogen-a-new-step-in-the-energy-transition/>.
40. Hydrogen blending: A step on the path to net zero. (2022). Available at: <https://clarus.co.nz/content-hub/hydrogen-blending-a-big-step-on-the-path-to-net-zero>.
41. Qianzhi, Z., Lining, W., Wenyong, C., & Chenglong, Z. (2024). Assessing the impact of hydrogen trade towards low-carbon energy transition. *Applied Energy*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124233>.
42. Shijie, W., Romain, S., Arnold, T., Sangwon, S., & Bernhard, S. (2024). Future environmental impacts of global hydrogen production. *Energy & Environmental Science*, Issue 6. DOI: <https://doi.org/10.1039/D3EE03875K>.
43. Van Wijk, A., & Wouters, F. (2021). *Hydrogen—The Bridge Between Africa and Europe*. DOI: 10.1007/978-3-030-74586-8_5.
44. "Vodneva revoliutsiia" KPI doluchaietsia do novoi stratehii YeS [Hydrogen revolution: KPI joins the new EU strategy]. (2020). Available at: <https://kpi.ua/ru/hydrogen-strategy-about>.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2025 р.