

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАДИМА ГЕТЬМАНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ВАДИМА ГЕТЬМАНА

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ДМІТРІЄВА ОКСАНА ВІТАЛІЇВНА

УДК 330.332 :338 .2(477)

ДИСЕРТАЦІЯ

**СТРАТЕГУВАННЯ РОЗБУДОВИ ВОДНЕВОЇ ЕКОНОМІКИ В
УКРАЇНІ**

Спеціальність 051 – Економіка

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ Дмітрієва О.В.

Науковий керівник: Котенок Андрій Григорович, кандидат економічних
наук, доцент

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Дмитрієва О.В. Стратегування розбудови водневої економіки України. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 051 – Економіка. – Київський національний економічний університет імені Вадима Гетьмана, Київ, 2025.

Дисертаційне дослідження присвячене вирішенню фундаментальної міждисциплінарної наукової проблеми – формуванню концептуально цілісної та прогностично орієнтованої моделі водневої економіки України в умовах енергетичного переходу, декарбонізації, кліматичної трансформації та інтеграції до європейського енергетичного простору. В українській академічній традиції здійснено комплексне осмислення водневої економіки як багатовимірної системної трансформаційної платформи, яка не зводиться лише до технологічного переходу або енергетичної модернізації, а передбачає глибоку перебудову інституційних структур, управлінських механізмів, соціоекономічних взаємозв'язків та стратегічних пріоритетів розвитку держави.

Запропоновано новаторське трактування водневої економіки як ключового вектора постфосильного розвитку, що поєднує в собі ресурсно-інноваційний, екологічний, інфраструктурний, правовий, регіональний та ціннісний компоненти, які мають бути синхронізовані через механізми стратегічного планування нового покоління. Розкрито економічну сутність та природу водневої економіки не як вторинного інструменту енергетичної політики, а як інтегровану основу для побудови нової парадигми національної економіки, орієнтованої на довгострокову стійкість, кліматичну нейтральність та міжнародну. Розроблена автором концепція формує інноваційний дискурс стратегування, в межах якого водень постає не лише як енергоресурс, а як

індикатор і маркер майбутньої економіки – цифрової, інклюзивної, децентралізованої, низьковуглецевої та високотехнологічної.

На основі міждисциплінарного аналізу (економіка, енергетика, політологія, екологія, стратегічне управління) дисертація формує теоретичні та методологічні підвалини для формування нової наукової школи стратегічного планування в сфері водневої трансформації. Такий підхід дозволяє переосмислити роль України в європейській енергетичній архітектурі та позиціонувати її як активного учасника глобального водневого ринку, здатного генерувати не лише енергію, а й нову якість економічного розвитку, засновану на знаннях, екологічній відповідальності та інституційній адаптивності.

У першому розділі дисертації здійснено системний аналіз теоретико-методологічних засад формування національної моделі водневої економіки в контексті глобального енергетичного переходу, імплементації принципів кліматичної нейтральності та Цілей сталого розвитку ООН. Дисертантом запропоновано авторський категоріально-понятійний апарат дослідження у створенні міждисциплінарної аналітичної рамки, в якій воднева економіка вперше в українському науковому дискурсі розглядається як складна соціотехнічна система, що функціонує на перетині економічних, екологічних, інституційних, політичних і геополітичних векторів розвитку. В межах цього підходу воднева економіка інтерпретується як інтегративний механізм соціоекономічної реконфігурації, здатний трансформувати архітектуру енергетичних, індустріальних та інноваційних підсистем національного господарства.

У роботі дістала подальшого розвитку комплексна характеристика детермінант трансформацій сучасних економік «надкраїн». У вітчизняній науковій практиці запропоновано універсальну концептуальну рамку для ідентифікації, аналізу та моделювання водневої економіки, що базується на поєднанні парадигмального, сценарного та системного підходів. Ця рамка враховує трансверсальні зв'язки між міжнародними стратегічними документами (наприклад, Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe,

REPowerEU), глобальними сценарними моделями (IEA, BloombergNEF, Hydrogen Council) та національними нормативно-правовими актами, що регулюють енергетичну і промислову політику. Автором запропоновано типологізацію структурних компонентів водневої економіки – виробництво, зберігання, транспортування, використання, регулювання, – яка у сукупності формує функціонально-інституційний каркас трансформації національного енергетичного ландшафту.

У роботі комплексно проаналізовано особливості меж здійсненому теоретичному узагальненні ключових передумов формування водневої економіки України. До таких передумов віднесено: а) наявність природно-ресурсного базису для генерації низьковуглецевого та «зеленого» водню (ВДЕ-потенціал, наявність водних ресурсів, географічна близькість до споживачів у ЄС); б) інфраструктурну спадщину у вигляді газопровідних систем, що можуть бути адаптовані до транспортування водню; в) інституційний потенціал адаптації нормативного поля до вимог ЄС; г) інноваційні можливості інтеграції водневих технологій у промислові процеси. Таке бачення дозволяє вперше розглядати водневу економіку як об'єкт довгострокової державної стратегії та передумову формування нових форматів енергетичної дипломатії та регіонального розвитку.

Крім того, автором розроблено систему стратегічних цілей, пріоритетів і кількісних індикаторів для вимірювання прогресу у становленні водневої економіки, яка синхронізується з цілями Європейського зеленого курсу, кліматичної нейтральності до 2050 року та вимогами інтеграції України до Європейського енергетичного союзу.

Ця модель індикативного аналізу, яка вперше апробована в межах українського наукового контексту, відкриває можливість не лише для моніторингу ефективності реалізації політик, а й для побудови динамічних прогнозних сценаріїв сталого розвитку енергетики та промисловості на основі водневої трансформації.

У другому розділі дисертації здійснено комплексне емпіричне дослідження актуального стану, ключових викликів і перспектив розвитку водневої економіки як у глобальному, так і в національному вимірі. Виокремлено розробку авторського підходу до багаторівневого компаративного аналізу, який поєднує кількісні (статистичні), якісні (контент-та політичний аналіз) та експертно-інтерпретативні методи дослідження. Цей підхід дозволив представити в українській науковій практиці здійснити цілісну типологізацію стратегій водневої трансформації в ключових країнах світу (ЄС, Німеччина, Японія, Південна Корея, США, Австралія), а також зіставити їх із поточною концептуальною базою та практиками, що формуються в Україні.

У межах цього розділу автором проведено систематизований контент-аналіз міжнародних і національних стратегічних документів, програм і дорожніх карт водневої політики, що дозволило виявити уніфіковану типологію стратегічних моделей, які домінують у глобальному водневому дискурсі: технологічна модель (орієнтація на інноваційні прориви), ринкова модель (стимулювання приватного сектору), інфраструктурна модель (розвиток логістичних і транспортних мереж), кліматична модель (інтеграція в політику декарбонізації), коопераційна модель (формування водневих альянсів і транскордонних партнерств). Ці моделі вперше апробовано як аналітичний інструментарій для порівняння стратегій країн-лідерів і вивчення потенціалу їх адаптації в українському контексті.

Окремим напрямом наукової інновації є емпіричне оцінювання потенціалу України у сфері водневої економіки, здійснене в авторській аналітичній рамці за ключовими функціональними елементами: виробництво, зберігання, транспортування, споживання. Розроблено нову методику оцінювання, яка поєднує параметри техніко-економічного аналізу (наявність електролізерів, потенціал ВДЕ, трубопровідна інфраструктура, логістичні вузли), інституційно-нормативну готовність (наявність стратегічних документів, гармонізація з правом ЄС, рівень координації між державними інституціями) та індикатори інвестиційної привабливості регіонів (рейтинг

інвестиційного клімату, наявність кластерів, доступ до транснаціональних програм).

В межах дисертаційного дослідження створено узагальнену карту потенційних «водневих хабів» України, яка охоплює території з оптимальним поєднанням технічних, інфраструктурних, логістичних, екологічних та регуляторних параметрів. Така карта є практико-орієнтованим аналітичним продуктом, що може бути використаний як інструмент регіонального стратегування в межах державної політики просторового розвитку, зокрема для участі у трансєвропейських програмах (TEN-E, European Hydrogen Backbone).

Запропоноване автором концептуальне обґрунтування ролі водневих технологій у подоланні структурних дисбалансів, пов'язаних з інтеграцією відновлювальних джерел енергії у національну енергосистему. Дисертантом доведено, що водень може виступати не лише як «енергетичне сховище» для надлишкової ВДЕ-генерації, а й як мультифункціональний механізм балансування, який сприяє стабільності, гнучкості та керованості енергетичної системи. Це дозволяє розглядати водневу економіку не як окрему галузь, а як інтегральну компоненту нової парадигми стратегічного управління енергетичною безпекою, декарбонізацією і технологічною модернізацією.

У третьому розділі дисертації розкрито авторську концепцію стратегування розвитку водневої економіки України на основі сучасної форсайт-методології, яка ґрунтується на принципах системного, міждисциплінарного, сценарного та ціннісно-орієнтованого аналізу. Наукова новизна цього блоку дослідження полягає, насамперед, у теоретичному обґрунтуванні та розробці інноваційної моделі форсайт-стратегування водневої трансформації національної економіки, що є адаптованою до умов високої невизначеності, геополітичних ризиків, асиметричності ресурсного розподілу та нестійкості глобальних енергетичних ланцюгів.

Вперше в українській науковій літературі здійснено структуризацію функціональних та аксіологічних компонентів форсайт-підходу до стратегічного управління енергетичними трансформаціями.

Автором обґрунтовано, що ефективне стратегування водневої економіки неможливе без системного виявлення довгострокових мегатрендів (декарбонізація, цифровізація, регіональна децентралізація), формування спільних ціннісних орієнтирів стейкхолдерів (держава, бізнес, наука, громадянське суспільство), ідентифікації критичних технологічних вузлів і вибору пріоритетних напрямів розвитку (електроліз, транспортування водню, утилізація в промисловості). Запропоновано концепцію сценарного моделювання трансформаційних траєкторій з урахуванням комплексних ризиків (ресурсних, кліматичних, геоекономічних) і потенціалу міжсекторальної кооперації.

Визначним є авторське трактування форсайту як інституційного механізму колективної дії, який забезпечує не лише аналітичне передбачення, а й соціально-політичну легітимність стратегічних рішень. Уперше доведено, що форсайт у сфері водневої економіки може виступати механізмом інституціонального узгодження інтересів, підвищення довіри між ключовими суб'єктами політики, створення комунікативного простору для стратегічної співпраці.

Це дозволяє переосмислити роль прогнозування не як лінійної екстраполяції тенденцій, а як інструменту формування спільного бачення майбутнього, що критично важливо в умовах поліцентричного управління енергетикою та переходу до відкритих адаптивних стратегічних систем.

Інноваційним внеском у наукову методологію є запропонований автором механізм організаційно-економічного енергетичного партнерства, який синтезує принципи державно-приватного партнерства, інституційного ко-дизайну та транснаціонального співробітництва. Цей механізм базується на логіці горизонтального управління, яке передбачає децентралізоване прийняття рішень, взаємодію багатьох рівнів влади (локального, національного, наднаціонального), відкриту участь заінтересованих сторін, а також впровадження цифрових платформ для стратегічного моніторингу, зворотного зв'язку та адаптації стратегій в реальному часі.

Кульмінаційним результатом третього розділу є створення авторської концептуальної моделі стратегічної оцінки готовності галузей економіки до водневої трансформації, яка передбачає багатокритеріальне багаторівневе оцінювання за такими параметрами: а) технічна модернізація; б) ресурсна забезпеченість; в) інноваційна відкритість; г) регуляторна гнучкість; д) соціальна сприйнятливість. Запропонована модель дозволяє здійснювати діагностику бар'єрів і вікон можливостей у галузевому розрізі, формувати адаптивні дорожні карти розвитку, які поєднують інвестиційні стимули, освітні програми, міжнародну сертифікацію та інтеграцію до світових водневих ланцюгів доданої вартості.

У завершальному висновковому блоці дисертації здійснено узагальнення теоретичних, методологічних та прикладних результатів дослідження, що виводять його за межі традиційного техніко-економічного підходу до водневої енергетики та позиціонують як цілісну концептуальну платформу для формування національної стратегії водневої трансформації. Дисертант продовжив не тільки формалізацію теоретико-методологічних основ і аналітичних моделей водневої економіки, а й у розробив практико-орієнтованого стратегічного інструментарію, адаптованого до багатовекторних викликів сучасної енергетичної політики, трансформаційної динаміки економіки та глобальної декарбонізації.

Встановлено, що воднева економіка може виступати не просто як технологічна або екологічна інновація, а як нова системна рамка постіндустріального розвитку, яка трансформує логіку міжгалузевої взаємодії, перебудовує інституційну архітектуру публічного управління, змінює регіональні пріоритети політики просторового розвитку та поглиблює вектор інтеграції України до Європейського Союзу на основі водневого партнерства.

Автор довів, що стратегічне управління у сфері водневої економіки має бути багаторівневим, міжсекторальним і ціннісно-орієнтованим, із фокусом на інституційну координацію, сценарне планування та адаптивне прогнозування.

Ключовим результатом дисертації є розробка механізмів синергії між державним стратегічним плануванням, науково-аналітичною підтримкою та стейкхолдерською взаємодією. Зокрема, автор запропонував концепцію багаторівневої дорожньої карти водневої трансформації, яка охоплює етапи оцінки готовності секторів, формування пріоритетних цілей, проєктування механізмів стимулювання, моніторинг і коригування стратегій.

Розроблено індикативну панель стратегічного оцінювання, що дозволяє здійснювати кількісно-якісну діагностику ефективності реалізації водневої політики за критеріями інституційної адаптивності, технологічного прогресу, інвестиційної динаміки, екологічного ефекту та ступеня залучення ключових акторів.

Практична значущість результатів дисертації виявляється у можливості їх безпосередньої імплементації в стратегічні документи та політичні ініціативи національного і наднаціонального рівнів. Запропоновані підходи мають потенціал апробації в рамках участі України в Європейському водневому альянсі, ініціативі REPowerEU, а також у проєктах транскордонного енергетичного співробітництва.

Особливої ваги набуває те, що аналітичні моделі, методики оцінювання та інструменти форсайт-стратегування можуть бути інтегровані у діяльність профільних міністерств, регіональних адміністрацій, галузевих об'єднань, дослідницьких центрів і бізнес-структур.

У підсумку, авторське дослідження формує нову аналітико-прогностичну парадигму стратегічного планування енергетичної трансформації, в якій воднева економіка розглядається як точка синергії між кліматичною відповідальністю, інноваційною модернізацією та інституційною стійкістю.

Це дозволяє позиціонувати дисертацію як цінний внесок у розвиток української науково-економічної школи стратегічного управління, здатної відповісти на виклики епохи трансформаційної турбулентності, посткризового відновлення та глобального переходу до безвуглецевої економіки.

Ключові слова: стратегування водневої економіки, форсайт-методологія, енергетичний перехід, кліматична трансформація, декарбонізація, міждисциплінарний підхід, інституційна адаптивність, національна модель водневої економіки, сценарне моделювання, соціотехнічна система енергетичне партнерство, індикативні інструменти, водневі хаби, інтеграція до Європейського енергетичного союзу, інноваційне стратегічне планування.

ABSTRACT

Dmytrieva O.V. Strategic Planning for the Development of Ukraine's Hydrogen Economy. – A qualification research paper submitted in manuscript form. Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 051 – Economics. – Vadym Hetman Kyiv National Economic University, Kyiv, 2025.

The dissertation research is devoted to solving a fundamental interdisciplinary scientific problem – the formation of a conceptually integral and prognostically oriented model of Ukraine's hydrogen economy under conditions of energy transition, decarbonization, climate transformation, and integration into the European energy space. Within the Ukrainian academic tradition, a comprehensive understanding of the hydrogen economy is developed as a multidimensional systemic transformation platform, which is not limited solely to a technological transition or energy modernization, but entails a deep restructuring of institutional structures, governance mechanisms, socio-economic relationships, and the strategic development priorities of the state.

A novel interpretation of the hydrogen economy is proposed as a key vector of post-fossil development that combines resource-innovative, environmental, infrastructural, legal, regional, and value-based components, which must be synchronized through next-generation strategic planning mechanisms. The economic essence and nature of the hydrogen economy are revealed not as a secondary instrument of energy policy, but as an integrated foundation for building a new paradigm of the national economy, oriented toward long-term resilience, climate neutrality, and international engagement. The concept developed by the author shapes

an innovative discourse of strategizing, within which hydrogen emerges not only as an energy resource but also as an indicator and marker of the future economy – digital, inclusive, decentralized, low-carbon, and high-tech.

Based on interdisciplinary analysis (economics, energy, political science, ecology, strategic management), the dissertation forms theoretical and methodological foundations for the establishment of a new scientific school of strategic planning in the field of hydrogen transformation. This approach enables a rethinking of Ukraine's role in the European energy architecture and positions it as an active participant in the global hydrogen market, capable of generating not only energy but also a new quality of economic development based on knowledge, environmental responsibility, and institutional adaptability.

The first chapter of the dissertation provides a systematic analysis of the theoretical and methodological foundations for forming a national model of the hydrogen economy in the context of the global energy transition, the implementation of climate neutrality principles, and the UN Sustainable Development Goals. The author proposes an original conceptual and terminological apparatus for the research by creating an interdisciplinary analytical framework in which, for the first time in Ukrainian academic discourse, the hydrogen economy is viewed as a complex socio-technical system functioning at the intersection of economic, ecological, institutional, political, and geopolitical development vectors. Within this approach, the hydrogen economy is interpreted as an integrative mechanism of socio-economic reconfiguration capable of transforming the architecture of the energy, industrial, and innovation subsystems of the national economy.

The work further develops a comprehensive characterization of the determinants of transformation in modern "supranational" economies. A universal conceptual framework is proposed for the first time in Ukrainian academic practice to identify, analyze, and model the hydrogen economy based on the combination of paradigmatic, scenario-based, and systemic approaches. This framework considers transversal links between international strategic documents (e.g., Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe, REPowerEU), global scenario models (IEA,

BloombergNEF, Hydrogen Council), and national regulatory acts governing energy and industrial policy. The author proposes a typology of structural components of the hydrogen economy – production, storage, transportation, utilization, and regulation – which together form a functional and institutional framework for the transformation of the national energy landscape.

The dissertation provides a comprehensive analysis of the key preconditions for forming Ukraine's hydrogen economy. These include: (a) the presence of a natural resource base for generating low-carbon and "green" hydrogen (RES potential, availability of water resources, geographical proximity to EU consumers); (b) infrastructural legacy in the form of gas pipeline systems that can be adapted for hydrogen transport; (c) institutional potential to align regulatory frameworks with EU requirements; (d) innovative capabilities for integrating hydrogen technologies into industrial processes. This perspective allows the hydrogen economy to be considered, for the first time, as an object of long-term state strategy and a prerequisite for forming new formats of energy diplomacy and regional development.

Additionally, the author develops a system of strategic goals, priorities, and quantitative indicators for measuring progress in establishing the hydrogen economy, synchronized with the goals of the European Green Deal, climate neutrality by 2050, and the requirements for Ukraine's integration into the European Energy Union. This indicative analysis model, tested for the first time within the Ukrainian academic context, enables not only the monitoring of policy implementation effectiveness but also the construction of dynamic forecast scenarios for the sustainable development of energy and industry based on hydrogen transformation.

The second chapter of the dissertation presents a comprehensive empirical study of the current state, key challenges, and prospects for developing the hydrogen economy both globally and nationally. An original approach is proposed for multi-level comparative analysis that combines quantitative (statistical), qualitative (content and political analysis), and expert-interpretative research methods. This approach allowed, for the first time in Ukrainian academic practice, for a comprehensive typology of hydrogen transformation strategies in leading countries (EU, Germany,

Japan, South Korea, USA, Australia) and their comparison with the emerging conceptual base and practices in Ukraine.

Within this chapter, the author conducts a systematic content analysis of international and national strategic documents, programs, and hydrogen policy roadmaps, enabling the identification of a unified typology of strategic models that dominate global hydrogen discourse: technological model (focus on innovation breakthroughs), market model (private sector stimulation), infrastructure model (development of logistics and transport networks), climate model (integration into decarbonization policy), and cooperative model (formation of hydrogen alliances and cross-border partnerships). These models are tested for the first time as analytical tools for comparing the strategies of leading countries and assessing their adaptability to the Ukrainian context.

A separate direction of scientific innovation is the empirical assessment of Ukraine's potential in the hydrogen economy, conducted within the author's analytical framework across key functional elements: production, storage, transportation, and consumption. A new evaluation methodology is developed that combines parameters of techno-economic analysis (availability of electrolyzers, RES potential, pipeline infrastructure, logistics hubs), institutional and regulatory readiness (availability of strategic documents, alignment with EU law, level of coordination among state institutions), and indicators of regional investment attractiveness (investment climate ratings, presence of clusters, access to transnational programs).

The dissertation develops a generalized map of Ukraine's potential "hydrogen hubs," encompassing areas with optimal combinations of technical, infrastructural, logistical, environmental, and regulatory parameters. This map is a practice-oriented analytical product that can serve as a tool for regional strategizing within the framework of national spatial development policy, particularly for participation in trans-European programs (TEN-E, European Hydrogen Backbone).

The proposed conceptual justification of the role of hydrogen technologies in overcoming structural imbalances related to the integration of renewable energy

sources into the national power system is an important contribution. The author demonstrates that hydrogen can serve not only as an "energy storage" for surplus RES generation but also as a multifunctional balancing mechanism that enhances the stability, flexibility, and controllability of the energy system. This enables the hydrogen economy to be seen not as a separate sector, but as an integral component of a new paradigm of strategic energy security management, decarbonization, and technological modernization.

The third chapter presents the author's concept of strategizing the development of Ukraine's hydrogen economy based on a modern foresight methodology grounded in the principles of systemic, interdisciplinary, scenario-based, and value-oriented analysis. The scientific novelty of this part of the study lies primarily in the theoretical substantiation and development of an innovative foresight-based model for the hydrogen transformation of the national economy, adapted to conditions of high uncertainty, geopolitical risks, asymmetry of resource distribution, and instability in global energy chains.

For the first time in Ukrainian academic literature, the functional and axiological components of the foresight approach to strategic energy transformation management are structured. The author argues that effective strategizing of the hydrogen economy is impossible without systematically identifying long-term megatrends (decarbonization, digitalization, regional decentralization), forming common value orientations among stakeholders (government, business, science, civil society), identifying critical technological nodes, and selecting priority areas for development (electrolysis, hydrogen transport, industrial utilization). A concept of scenario modeling of transformational trajectories is proposed, taking into account complex risks (resource, climate, geo-economic) and the potential for cross-sectoral cooperation.

The author's interpretation of foresight as an institutional mechanism of collective action, which ensures not only analytical forecasting but also the socio-political legitimacy of strategic decisions, is particularly significant. For the first time, it is proven that foresight in the hydrogen economy can serve as a mechanism

for institutional alignment of interests, building trust among key policy actors, and creating a communicative space for strategic cooperation. This redefines the role of forecasting not as a linear extrapolation of trends but as a tool for forming a shared vision of the future, which is critically important under polycentric energy governance and the transition to open adaptive strategic systems.

An innovative contribution to scientific methodology is the proposed mechanism of organizational and economic energy partnership, which synthesizes the principles of public-private partnership, institutional co-design, and transnational cooperation. This mechanism is based on the logic of horizontal governance, involving decentralized decision-making, interaction among multiple levels of government (local, national, supranational), open stakeholder participation, and the implementation of digital platforms for strategic monitoring, feedback, and real-time strategy adaptation.

The culminating result of the third chapter is the development of the author's conceptual model for strategic assessment of sectoral readiness for hydrogen transformation, which provides multi-criteria, multi-level evaluation based on the following parameters: (a) technical modernization; (b) resource availability; (c) innovation openness; (d) regulatory flexibility; (e) social acceptability. The proposed model allows for diagnosing barriers and identifying windows of opportunity across sectors, forming adaptive development roadmaps that combine investment incentives, educational programs, international certification, and integration into global hydrogen value chains.

In the concluding section of the dissertation, the theoretical, methodological, and applied results of the research are summarized, positioning it beyond the traditional techno-economic approach to hydrogen energy and framing it as a holistic conceptual platform for developing a national strategy for hydrogen transformation. The author not only formalizes the theoretical and methodological foundations and analytical models of the hydrogen economy, but also develops practice-oriented strategic tools adapted to the multifaceted challenges of modern energy policy, economic transformation dynamics, and global decarbonization.

It is established that the hydrogen economy can function not merely as a technological or environmental innovation, but as a new systemic framework for post-industrial development that transforms the logic of intersectoral interaction, restructures the institutional architecture of public governance, alters regional priorities in spatial development policy, and deepens Ukraine's integration with the European Union through hydrogen partnership.

The author proves that strategic management in the field of the hydrogen economy must be multi-level, cross-sectoral, and value-oriented, with a focus on institutional coordination, scenario planning, and adaptive forecasting.

A key result of the dissertation is the development of mechanisms for synergy between state strategic planning, scientific-analytical support, and stakeholder engagement. In particular, the author proposes the concept of a multi-level hydrogen transformation roadmap, which includes the stages of sectoral readiness assessment, formulation of priority goals, design of incentive mechanisms, monitoring, and strategic adjustment.

An indicative strategic assessment panel is also developed, enabling quantitative and qualitative diagnostics of hydrogen policy implementation effectiveness based on criteria such as institutional adaptability, technological progress, investment dynamics, environmental impact, and stakeholder engagement.

The practical significance of the dissertation results lies in their potential for direct implementation into strategic documents and policy initiatives at national and supranational levels. The proposed approaches are suitable for pilot implementation within Ukraine's participation in the European Hydrogen Alliance, the REPowerEU initiative, and cross-border energy cooperation projects.

Of particular importance is that the analytical models, evaluation methodologies, and foresight strategizing tools can be integrated into the activities of relevant ministries, regional administrations, industry associations, research centers, and business structures.

Ultimately, the author's research establishes a new analytical and forecasting paradigm of strategic planning for energy transformation, in which the hydrogen

economy is viewed as a point of synergy between climate responsibility, innovative modernization, and institutional resilience. This positions the dissertation as a valuable contribution to the development of the Ukrainian scientific and economic school of strategic management, capable of responding to the challenges of transformative turbulence, post-crisis recovery, and the global transition to a carbon-free economy.

Key words: strategic planning of the hydrogen economy, foresight methodology, energy transition, climate transformation, decarbonization, interdisciplinary approach, institutional adaptability, national model of the hydrogen economy, scenario modeling, socio-technical system, energy partnership, indicative tools, hydrogen hubs, integration into the European Energy Union, innovative strategic planning.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У наукових фахових виданнях України:

1. Контент-аналіз стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки різних країн світу. Дмитрієва О.В., Ємельяненко Л.М.. *“Трансформаційна економіка”*. Хмельницький кооперативний торговельно-економічний інститут. 2024 № 3 (08) С. 26 -36. DOI: 10.32782/2786-8141/2024-8-4 (1,17д.а., особисто автору – 0,9 д.а.: запропоновано систему управління енергетичною безпекою на основі функціонального підходу). (дата звернення: 19.06.2024).
2. Дмитрієва О.В., Світова практика та міжнародне співробітництво у розвитку водневої економіки країн світу *"Ефективна економіка"* № 10, жовтень 2024 р. DOI: 10.32702/2307-2105.2024.10., (0,9 д.а.). (дата звернення: 19.06.2024).

3. Дмітрієва О.В., 2024. Вплив соціальних факторів на управління енергоефективністю та розвиток відновлювальних джерел енергії. Вчені записки.2024.№36 (3) С. 42-49. DOI: 10.33111/vz_kneu.36.24.03.04.026.032. (0,7д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).

В інших виданнях:

4. Дмітрієва О. В. і інші. “Renewable Energy Sources as a Key Focus of Ukraine's Energy Policy Amid Military Threats: Geographical and Economic Dimensions” Журнал ECONOMIC AFFAIRS Quarterly Journal of Economics Print ISSN: 0424-2513 Online ISSN: 0976-4666 NAAS RATING : 5.45 SCOPUS INDEXED UGC-CARE GRP II <https://economicaffairs.co.in/> Economic Affairs, Vol. 69(03), pp. 1461-1469, September 2024 DOI: 10.46852/0424-25 13.4.2024.30. (0,9 д.а. , особисто автору - 0,3 д.а.).(дата звернення: 23.06.2024).
5. Dmitriiieva O., Dmitriiieva D. (2023). Hydrogen economy as a strategic priority for Ukraine’s recovery. Global Prosperity. Том 3(3). Опубліковано 2023-07-03. р. 48–58. Стаття Publisher: Oktan Print (Czech Republic). (0,9 д.а. , особисто автору - 0,3 д.а.). (дата звернення: 23.06.2024).
6. Дмітрієва О.В., Косяк І.В., Тітов В.В., Смірнова О.Ю., Праворський В.В., Галицька О.Б. Діагностика та управління бізнес-процесами підприємства. *POLISH SCIENCE JOURNAL* (Республіка Польща), 2021 ISSUE 7(40). 199 р. Р. 51-59. (0,9 д.а. , особисто автору - 0,3 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).
7. Dmitrieva Oksana, Derbenova Yana, Kashyna Ganna, Leontovych Serhii, Ablova Olena, Yaremenko Lyudmyla. Impact of the Covid-19 Pandemic on Entrepreneurial Capacity and Financial Security in Ukraine. *Sustainable Development in the Post-Pandemic Period (SDPPP)*: International Scientific and Practical Conference. Tallin, Estonia, November 9-10, 2021. SHS Web of Conferences 126, 08002 (2021) P. 1-10 URL: <https://doi.org/10.1051/shsconf/202112608002> SDPPP-2021. (0,9 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).

8. Дмитрієва О.В. Особливості фінансування виробництва інтелектуального продукту транснаціональних корпорацій конференції. *TOPICAL ISSUES OF MODERN SCIENCE, SOCIETY AND EDUCATION*: Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків, 5-7 вересня 2021р. Харків: НПЦ «Sciconf.com.ua». 2021. 624 с. С. 534-538. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).
9. Ємельяненко Л.М., Дмитрієва О.В. Кліматичне фінансування як основа міжнародної взаємодії та партнерства в забезпеченні зеленого зростання. *Зелена економіка та низьковуглецевий розвиток: міжнародний та національний вимір*: Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, (форма участі заочна). м. Київ, 10 грудня 2021 р. Київ: Видавничий дім «Гельветика». Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління. 2021. 120 с. С.106-112. (0,5 д.а. , особисто автору - 0,3д.а.). (дата звернення: 21.06.2024).
10. Ємельяненко Л.М., Дмитрієва О.В. Кіберпростір України: безпекові загрози, виклики та перспективи розвитку. *Кібербезпека державних інституцій та подолання кризових станів*: Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції . м. Київ-Вроцлав, 26 травня 2022 р. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).
11. Ємельяненко Л.М., Дмитрієва О.В. Cybernetic Factors of Ukraine's Global Security. *Economic Security in the Global Environment (ESGE-2022)*: Матеріали Міжнародної конференції. м. Київ, 29-30 червня 2022 р. К.: КНЕУ. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 19.06.2024).
12. Ємельяненко Л.М., Дмитрієва О.В. Дмитрієва Д.С. Форсайт-підхід до стратегування економічного розвитку України в умовах невизначеності. *Стратегічні імперативи сучасного менеджменту*: Зб. Матеріалів VI Міжнародної науково-практичної конференції. 21 жовтня 2022 р. К.: КНЕУ, 2022. 370 с. С. 206-209. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).

13. Дмитрієва О.В. Міжнародні інструменти економічної аналітики водневої економіки та їх адаптація в Україні. Зб. Матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції. 24 січня 2025 р. Україна, Київ: КНЕУ, 2025. 404 с. С. 32-35. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).

ЗМІСТ

ВСТУП	22
РОЗДІЛ 1. КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ РОЗБУДОВИ НАЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ВОДНЕВОЇ ЕКОНОМІКИ В КОНТЕКСТІ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ ІНІЦІАТИВ.	30
1.1. Генезис концепції водневої економіки в парадигмі енергетичного розвитку.	30
1.2 . Розбудова водневої економіки: передумови, складові, детермінанти та синергетичні ефекти.	45
1.3. Формування національної моделі водневої економіки з урахуванням міжнародних стратегічних ініціатив.	64
Висновки до першого розділу.	81
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ, ПРОБЛЕМ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗБУДОВИ ВОДНЕВОЇ ЕКОНОМІКИ В СВІТІ ТА УКРАЇНІ.	84
2.1. Аналіз стану та ефективності розвитку водневої економіки в країнах світу.	84
2.2. Контент-аналіз стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки різних країн світу та України.	105
2.3. Оцінювання потенціалу розвитку водневої економіки в Україні в розрізі її окремих складових (виробництво, зберігання, транспортування, споживання). Проблеми інтеграції ВДЕ в емпіричну енергосистему Євросоюзу.	127
Висновки до другого розділу.	147
РОЗДІЛ 3. ІНСТРУМЕНТАРІЙ СТРАТЕГУВАННЯ РОЗБУДОВИ ВОДНЕВОЇ ЕКОНОМІКИ В УКРАЇНІ.	149
3.1. Форсайт-підхід до стратегування економічного розвитку України в умовах невизначеності: аксіологічна місія, функціональні та індикативні компоненти.	149
3.2. Формування механізму організаційно-економічного енергетичного партнерства у контексті міжнародних цілей щодо захисту клімату.	169
3.3. Концептуальна модель стратегічної оцінки трансформації промисловості відповідно до принципів вуглецевої нейтральної водневої економіки.	190
Висновки до третього розділу.	208
ВИСНОВКИ	209
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	214
ДОДАТКИ	
21456	

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасні глобальні виклики зумовлюють потребу переходу до низьковуглецевих моделей розвитку, де воднева економіка розглядається як ключовий елемент енергетичної трансформації. Україна, маючи потенціал для виробництва та експорту водню, потребує науково обґрунтованого стратегічного підходу до формування відповідної економічної моделі. Існуючі дослідження здебільшого акцентують на технологічних або правових аспектах, залишаючи поза увагою цілісні механізми стратегування в умовах нестабільного інституційного середовища. Відсутність інтегрованих стратегічних рішень щодо розбудови водневої економіки в Україні створює наукову проблему, яка потребує комплексного дослідження. Актуальність теми зумовлена необхідністю подолання цієї прогалини та розробки ефективної моделі стратегування у відповідності до національних пріоритетів і європейського курсу.

У сучасних умовах глобальної енергетичної трансформації дедалі більшого значення набуває наукове осмислення процесів становлення водневої економіки як інструменту декарбонізації, енергетичної безпеки та сталого розвитку. Теоретико-методологічне підґрунтя для вивчення цих процесів було закладене завдяки напрацюванням як зарубіжних, так і українських дослідників, які висвітлюють питання інноваційного розвитку енергетики, трансформації товарних ринків, стратегічного планування та форсайт-аналітики.

У європейському академічному просторі ґрунтовні дослідження здійснені такими вченими, як Tushar K. Ghosh, Mark A. Prelas, J.O.M. Bockris, Kazimierz Lejda, Sylwia Siedlecka, Robert Popper, Elise Almirall, René Rohrbeck, Mariana Mazzucato, Amartya Sen, P. Krugman, J. Tinbergen, B. Milanovic, S. Evenett та інші. Їхні праці охоплюють широкий спектр питань: від структурної

трансформації глобальних товарних потоків і еволюції торгівлі до розвитку ланцюгів доданої вартості в умовах енергетичного переходу.

В Україні значний внесок у формування теоретичних засад розвитку водневої економіки зробили науковці С. Кудря, О. Репкін, Л. Яценко, С. Халатур, І. Дороніна, І. Мельник, М. Ткаленко, С. Дейнега, О. Тесленко, Т. Коломоєць, В. Буславець, Н. Левченко, І. Коваленко, В. Петров, І. Кириленко, Д. Шевчук, О. Мельник, Т. Пилипенко, С. Ситник, А. Данилюк, В. Беляєва, І. Сафонова, І. Шевченко, Р. Сидоренко, А. Павлюк, І. Бондар, О. Похилук та багато інших. Їхні дослідження охоплюють як техніко-економічне обґрунтування водневих технологій, так і соціально-економічні аспекти впровадження водневої енергетики в регіональному і національному контекстах.

Попри наявність потужного наукового доробку, питання стратегування розбудови водневої економіки в умовах системної трансформації української економіки залишаються недостатньо висвітленими. Зокрема, бракує досліджень, що інтегрують аксіологічні, інституційні та індикативні складові в єдину модель стратегічного управління в умовах невизначеності. Це створює підґрунтя для формулювання наукової проблеми та обґрунтовує необхідність проведення комплексного дослідження, спрямованого на розробку ефективної моделі стратегування розбудови водневої економіки в Україні.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційну роботу виконано відповідно до плану науково-дослідних робіт у межах науково-дослідних тем факультету економіки та управління Київського національного економічного університету імені Вадима Гетьмана: міжкафедральної теми «Модернізація державного антикризового управління національною економікою (державний реєстраційний номер: 0116U001426) – особисто автором визначено структуру та особливості глобального ринку водню, а також детермінанти та імперативи глобалізації ринку водню з обґрунтуванням стратегічних напрямів інтеграції забудови національного водневого ринку у світовий.

Мета і завдання дослідження. *Метою дослідження є обґрунтування теоретико-методологічних засад і розробка прикладного інструментарію стратегічного управління процесом становлення водневої економіки в Україні як чинника сталого розвитку національної економіки.*

Для досягнення поставленої мети сформульовано наступні *завдання*:

- проаналізувати генезис виникнення та розвитку парадигми водневої економіки в контексті глобальних енергетичних трансформацій
- визначити складові, передумови та потенціал розвитку водневої економіки як системної економічної інновації
- систематизувати стратегічні цілі та індикатори становлення водневої економіки відповідно до міжнародних та національних пріоритетів
- дослідити сучасний стан та ефективність реалізації водневої економіки в провідних країнах світу
- провести контент-аналіз стратегічних ініціатив з розвитку водневої економіки в країнах світу та Україні
- оцінити потенціал розвитку водневої економіки в Україні з урахуванням її складових (виробництво, зберігання, транспортування, споживання) та проблем інтеграції в енергосистему ЄС
- обґрунтувати застосування форсайт-підходу до стратегування економічного розвитку України в умовах невизначеності, включно з аксіологічними, функціональними та індикативними компонентами
- розробити механізм організаційно-економічного енергетичного партнерства в контексті міжнародних кліматичних цілей
- сформувати концептуальну модель стратегічної оцінки трансформації промисловості України згідно з принципами вуглецево нейтральної водневої економіки

Об'єктом дослідження є воднева економіка як механізм забезпечення сталого розвитку національної економіки.

Предметом дослідження є процес стратегічного управління становленням водневої економіки в Україні.

Методи дослідження. Теоретико-методологічним підґрунтям дисертаційного дослідження є фундаментальні положення індустріальної та постіндустріальної парадигми розвитку сучасного суспільства, концепції сталого розвитку, кліматичної нейтральності, енергетичної трансформації та інституціональної економіки. У процесі виконання дослідження застосовано широкий спектр загальнонаукових і спеціальних методів, які забезпечили комплексність та системність аналізу предметної області. Метод наукової абстракції та узагальнення використано для формування авторського понятійно-категоріального апарату водневої економіки (розділи 1.1–1.3). Історико-логічний метод застосовано при аналізі еволюції підходів до водневої трансформації в енергетиці та промисловості, а також при вивченні розвитку міжнародної водневої політики (розділи 1.1, 2.1). Системний аналіз уможливив дослідити водневу економіку як багатовимірну соціотехнічну систему, виокремити її структурні компоненти, інституційну архітектуру та функціональні зв'язки (розділи 1.2, 2.3, 3.3). SWOT-аналіз було застосовано для оцінювання внутрішніх і зовнішніх факторів впливу на розвиток водневої економіки України та її стратегічних перспектив (розділи 2.3, 3.1). Контент-аналіз використано під час аналізу стратегічних документів Європейського Союзу, країн-лідерів водневої трансформації та України (розділ 2.2). Порівняльний аналіз дав змогу вивчити стратегії водневої трансформації таких країн, як ЄС, Японія, США, Австралія (розділ 2.1). Експертно-інтерпретативний метод використано для ідентифікації потенціалу водневої трансформації в Україні з урахуванням галузевої специфіки, інституційної готовності та інвестиційної привабливості (розділи 2.3, 3.3). Індикативне моделювання застосовано для побудови системи стратегічних індикаторів розвитку водневої економіки України та оцінювання готовності окремих секторів (розділи 1.3, 3.3). Форсайт-методологію покладено в основу концепції стратегування водневої економіки в умовах невизначеності та розробки сценаріїв розвитку (розділи 3.1, 3.2). Сценарний підхід забезпечив моделювання траєкторій розвитку водневої економіки та прогнозування

стратегічних рішень з урахуванням ризиків (розділ 3.2). Структурно-функціональний підхід застосовано для аналізу ролі водневої економіки у процесах реформування промислово-енергетичного сектору та енергетичної дипломатії (розділи 1.2, 3.3).

Інформаційну базу дослідження становлять наукові праці вітчизняних і зарубіжних учених. Щорічні конференції Організації Об'єднаних Націй (ООН) з питань зміни клімату, відомі як «Конференції Сторін» або «COP», що займають головне місце в порядку денному кліматичної політики. Конференції ООН з торгівлі та розвитку (ЮНКТАД), Всесвітньої митної організації (ВМО), Комісії ООН з права міжнародної торгівлі (ЮНСІТРАЛ), Світового банку, Міжнародного валютного фонду (МВФ), Організації економічного співробітництва і розвитку (ОЕСР), Міжнародного торговельного центру (МТЦ). Офіційні статистичні та аналітичні матеріали профільних міжнародних організацій (IEA, IRENA, Hydrogen Council, BloombergNEF, Єврокомісія), нормативно-правові акти України, національні та міжнародні стратегічні документи у сфері водневої політики (зокрема Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe, REPowerEU), дані рейтингів, індексів та інвестиційних оглядів, результати власних розрахунків і моделювання автора, а також електронні ресурси, зокрема офіційні вебпортали урядів, профільних міністерств, галузевих асоціацій і міжнародних аналітичних платформ.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційного дослідження полягає у формулюванні концептуально-методологічного підходу до стратегування розвитку водневої економіки України, який враховує трансформаційні виклики постіндустріальної доби, кліматичну та енергетичну політику ЄС, необхідність декарбонізації енергоємних секторів, модернізацію інституційної архітектури та глобальні тренди розвитку водневої енергетики.

Авторські здобутки, які виносяться на захист, полягають у наступному:

Вперше:

- розроблено концептуальну модель форсайт-стратегування водневої економіки України, що базується на принципах системного,

міждисциплінарного, аксіологічного та сценарного підходів. Модель враховує особливості трансформаційної динаміки, високий рівень стратегічної невизначеності, асиметричність доступу до ресурсів і необхідність міжвідомчої координації;

Удосконалено:

- методологію стратегічного аналізу потенціалу водневої економіки, зокрема через врахування чинників впливу глобального енергетичного переходу, синхронізації з ENTSO-E, можливостей використання надлишкової ВДЕ-генерації для електролізу, а також технологічної здатності до участі в європейських енергетичних ринках;
- понятійно-категоріальний апарат водневої економіки, у якому воднева економіка позиціонується не як технологічна підсистема, а як міжгалузева соціотехнічна система. Оновлено визначення понять «воднева трансформація», «воднева екосистема», «енергетичне партнерство» з урахуванням ціннісного вектору сталого розвитку, цифровізації та циркулярності;
- фортсайт-підхід у стратегуванні енергетичних трансформацій, зокрема: методи картування майбутнього, системної динаміки, матричного сценарного моделювання, прогнозування із застосуванням штучного інтелекту (нейромереж) для оцінки часових рамок переходу до «зеленого водню», побудови траєкторій розвитку, оцінки мультиплікативного ефекту водневої трансформації.

Набули подальшого розвитку:

- концептуальні засади національної водневої стратегії, що охоплюють структурні, регуляторні, технологічні та соціально-економічні компоненти. Визначено етапність реалізації водневої трансформації до 2030, 2040 та 2050 років відповідно до сценарних оцінок, на основі яких визначено три альтернативні траєкторії розвитку: інерційна, адаптивна та проривна;
- підходи до розуміння ролі держави як стратегічного координатора у формуванні водневої екосистеми, що включає створення законодавчого поля,

податкових і фінансових стимулів, технічної стандартизації, підтримки науково-освітнього середовища та інтернаціоналізації партнерств у сфері водню. Обґрунтовано доцільність створення Національного агентства форсайту водневої економіки, аналогічного до Government Office for Science у Великобританії чи Foresight Platform ЄС;

- підходи до трактування організаційно-економічного механізму формування енергетичного партнерства між державою, бізнесом, наукою та громадськістю. Показано, що досягнення водневої мети можливе лише за умови горизонтальної координації інтересів і розвитку індустріальних кластерів, зокрема — на базі регіонів із потенціалом ВДЕ, промислової модернізації та логістичних сполучень;

- підходи до визначення механізмів інтеграції водневої економіки до глобальних ринків, зокрема за допомогою розвитку експортної інфраструктури для «зеленого» водню, участі України у європейських і транснаціональних водневих коридорах (H2Med, Central Hydrogen Corridor), міжнародної сертифікації та формування бренду «Ukrainian Green Hydrogen».

Результати дослідження мають вагоме теоретичне і прикладне значення та створюють основу для вдосконалення національної політики енергетичного переходу, формування міжсекторальних дорожніх карт водневої трансформації, адаптації законодавства України до вимог Європейського зеленого курсу і реалізації цілей сталого розвитку до 2030 року. Основні наукові розробки, висновки та практичні результати дослідження впроваджено: Головне управління розвідки Міністерства оборони України – враховані та використані під час підготовки інформаційних матеріалів для органів державної влади (довідка про впровадження № 222/4Д/1699 від 20.06.2025). ПП «Гурліфт і К» - використані під час розробки інвестиційних проектів рамкаї яких планується впровадження водневих технологій (довідка про впровадження № 24 від 27.01.2025). ГО «Міжнародний центр розвитку смарт суспільства» – використані під час опрацювання рекомендацій щодо проведення освітніх програм та просвітницьких рухів стосовно переваг водневої енергії у боротьбі з

кліматичними змінами метою формування громадської свідомості про необхідність зменшення негативного впливу на навколишнє середовище задля досягнення чистішого та екологічно безпечного майбутнього (довідка про впровадження № 15 від 06.12.2024

Особистий внесок здобувача. Усі одержані наукові результати, які викладені в дисертаційному дослідженні та виносяться на захист, одержані автором самостійно і знайшли відображення в наукових публікаціях автора. З наукових праць, які опубліковані у співавторстві, у дисертації використано лише ті положення, ідеї та висновки, які отримані автором самостійно.

Апробація результатів дослідження. Основні положення та висновки дисертаційної роботи доповідалися й одержали схвалення на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях: Економіка та низьковуглецевий розвиток: міжнародний та національний вимір (Київ, Україна. 2021 р); Сталий розвиток у пост пандемічний період (Таллін, Естонія. 2021); Стратегічні імперативи сучасного менеджменту (Київ, Україна. 2022 р).; ConferenceESGE-2022. Globalsecurity:managingthefutureofUkraine (Київ, Україна. 2022 р).; Економічна аналітика: сучасні реалії та прогностичні можливості (Київ, Україна. 2025 р) .

Публікації. Основні положення і наукові результати дисертаційного дослідження опубліковано автором самостійно і у співавторстві в 13 наукових працях загальним обсягом 7,07 д.а., з яких особисто автору належить 4,9 д.а., з них: 1 – у науковому фаховому виданні Естонії, що зареєстроване в міжнародній наукометричній базі (Web of Science); 3 – у наукових фахових виданнях України; 3 – в інших виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Обсяг основного тексту дисертації становить 197 сторінок. Робота містить 20 таблиць на 10 сторінках, 21 рисунок на 9 сторінках та 63 додатків . Список використаних джерел налічує 542 найменування.

РОЗДІЛ 1

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ОСНОВИ РОЗБУДОВИ НАЦІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ ВОДНЕВОЇ ЕКОНОМІКИ В КОНТЕКСТІ ІМПЛЕМЕНТАЦІЇ МІЖНАРОДНИХ ІНІЦІАТИВ

1.1. Генезис концепції водневої економіки в парадигмі енергетичного розвитку

Еволюційно підтверджено, що фундаментальна суперечність між цивілізаційними потребами людства та природним потенціалом ресурсів виступає основною проблемою економіки та головною рушійною силою суспільного розвитку та прогресу. Зазначена суперечність однозначного вирішення не має з тієї причини, що задоволення нових потреб породжує інші, які своєю чергою потребують нових ресурсів.

В сучасному світі питання сталості та ефективності використання енергетичних ресурсів стають дедалі більш актуальними у зв'язку зі зростаючою свідомістю про необхідність зменшення впливу на навколишнє середовище та розвитку стійкої енергетики. У цьому контексті концепція водневої економіки виявляється однією з найбільш обговорюваних та перспективних галузей сучасної економіки. Воднева економіка виступає не лише як потенційне рішення для енергетичних проблем, але і як ключовий фактор у переході до сталого розвитку та зменшенні викидів парникових газів.

Теоретичний базис розбудови водневої економіки є основою для глибокого розуміння процесу трансформації енергетичних систем, який включає водневі технології як основний елемент. Воднева економіка передбачає використання водню як основного енергетичного носія, здатного забезпечити не лише енергетичну безпеку, але і стійкий розвиток на основі відновлювальних джерел енергії.

Теорія водневої економіки як цілісна концепція поки що не сформована у вигляді єдиного універсального теоретичного підходу. Проте, вона поступово розвивається через внески науковців, які працюють у різних дисциплінах: енергетиці, економіці, екології,

соціології та технологіях. Її можна розглядати як міждисциплінарну парадигму, яка інтегрує різні аспекти.

Термін «воднева економіка» був вперше вжитий в 1970-х роках вченим та інженером Джоном Бокслом (JohnBockris) [1]. У своїй презентації Дж. Бокслом розглядав перспективи використання водню як джерела енергії та прогнозував, що в майбутньому водень може стати основним енергетичним носієм у світі, що змінить принципи функціонування енергетичних систем. Таким чином, Дж. Бокслом вперше сформулював ідею «водневої економіки», яка в подальшому отримала широке визнання та стала об'єктом досліджень і розвитку в сфері енергетики. Отже, ідея водневої економіки з самого початку мала чітко виражений інноваційно-енергетичний характер і розглядалася як альтернатива викопним ресурсам.

Після Джона Бокслова термін «воднева економіка» активно почали використовувати вчені та фахівці в галузі енергетики та екології. Широкий спектр дослідників займалися вивченням водневої економіки в різний час. Термін «воднева економіка» став популярним серед науковців, інженерів, політиків та громадськості з подальшим розвитком та поширенням ідей щодо використання водню як енергетичного носія в формування концепції, яка відіграла ключову роль у визначенні та сприянні енергетичним змінам у суспільстві.

Наукові трактування сутності водневої економіки залежать від наукових шкіл, методології дослідження та міждисциплінарного підходу конкретних учених. Нижче представлені ключові авторські інтерпретації сутності водневої економіки, запропоновані провідними закордонними дослідниками. Як видно з (додаток А), більшість дослідників вважають, що воднева економіка є важливою складовою енергетичної трансформації та екологічної модернізації сучасного суспільства.

У результаті проведеного аналізу авторських підходів закордонних дослідників встановлено спільне бачення змісту та функціонального призначення водневої економіки. Зокрема, більшість учених розглядають її як складову глобальної енергетичної трансформації, що передбачає поступову відмову від викопних палив і перехід до використання відновлюваних джерел енергії. Водночас наголошується на ключовій ролі водню в процесі декарбонізації, особливо в енергоємних секторах, таких як

промисловість і транспорт, де інші технології мають обмежену ефективність. Воднева економіка також інтерпретується як чинник технологічного прориву, який потребує нових рішень у сферах виробництва, зберігання та транспортування енергії. Крім того, вона трактується як інструмент соціально-економічного розвитку, що сприяє створенню нових робочих місць, підвищенню рівня екологічної справедливості та реалізації принципів сталого розвитку.

В Україні воднева економіка ще на початкових етапах свого розвитку, однак українські науковці активно досліджують її економічні, екологічні та технологічні аспекти. Вони трактують водневу економіку як ключовий елемент для забезпечення енергетичної безпеки, сталого розвитку та інтеграції країни в глобальні енергетичні ринки. Основні підходи до трактування водневої економіки в Україні можна звести до кількох напрямів.

Видатний український учений і філософ Володимир Вернадський (1863–1945) був засновником учення про біосферу та ноосферу. Його праці [2] мали суттєвий вплив на розвиток екологічної думки і стали основою для багатьох сучасних підходів до вирішення глобальних проблем, включно з енергетичними. Хоча сам термін «воднева економіка» виник пізніше, концептуальні ідеї Вернадського багато в чому корелюють із принципами цієї моделі.

Вернадський В. вважав, що людство поступово перетворює біосферу (сферу життя) у ноосферу (сферу розуму), де діяльність людини починає керуватися науковими знаннями, екологічними принципами та гармонією з природою. Він підкреслював важливість використання енергії, яка не порушує рівновагу в природі (зокрема, сонячної енергії). Воднева економіка, яка базується на «зеленому» водні, повністю відповідає цій ідеї, оскільки водень, отриманий з відновлюваних джерел, не створює шкідливих викидів і гармонійно вписується у природні цикли. Вчений наголошував, що людство повинно знайти стійкі джерела енергії для забезпечення прогресу. Водень може стати таким джерелом, що відповідає вимогам сталого розвитку.

Український вчений передбачав енергетичну революцію, яка стане основою подальшого розвитку цивілізації. В. Вернадський вважав, що енергетична залежність від викопного палива є тимчасовим явищем, а майбутнє належить енергії, яка не шкодить

довкіллю. Водень, як універсальний і чистий енергоносіє, відповідає цьому прогнозу. Він наголошував, що тільки завдяки науковому прогресу можливо здійснити масштабний енергетичний перехід. Розробка водневих технологій (електроліз, паливні елементи, системи зберігання водню) є прямим втіленням цієї ідеї. Отже, концепція ноосфери, закладена українським мислителем, гармонійно перетинається з філософськими засадами сучасної водневої економіки.

В. Вернадський одним із перших наголошував на необхідності сталого розвитку, який враховує баланс між потребами людства і збереженням природи. Ідеї українського вченого щодо зменшення впливу людської діяльності на біосферу гармонізують із сучасними підходами до декарбонізації через водневу економіку. Він закликав до відповідального використання природних ресурсів, що є основою сучасної водневої економіки.

Фундаментальні ідеї Володимира Вернадського створюють філософське підґрунтя для концепції водневої економіки. Його бачення гармонії між природою, наукою і технологіями знаходить практичне відображення у сучасному розвитку водневих технологій. Воднева економіка може розглядатися як втілення ідей ноосфери, що об'єднує прогрес людства з екологічною відповідальністю.

Таким чином, філософські ідеї В. Вернадського – зокрема, ноосферне бачення розвитку людства, орієнтоване на гармонію з природою, раціональне використання ресурсів та роль наукового прогресу в управлінні біосферою – стали світоглядним підґрунтям сучасного розуміння сталого розвитку. Саме ці положення є надзвичайно близькими до ідеології водневої економіки, що також апелює до необхідності екологічного балансу, наукової раціональності та технологічної інноваційності.

Продовженням цієї філософської традиції в сучасних українських умовах виступають наукові дослідження, присвячені економічному, екологічному та інфраструктурному потенціалу водневих технологій в Україні. Вітчизняні вчені, спираючись як на глобальні тренди, так і на унікальні національні ресурси, аналізують можливості інтеграції водневої економіки в систему енергетичної безпеки та декарбонізації країни.

Сучасні вітчизняні науковці активно публікують наукові праці та статті з аналізом перспектив водневої економіки в Україні, а також розглядають економічні та технічні можливості цього сектору для розвитку країни.

О. Шевченко акцентує на важливості розвитку відновлюваної енергетики для створення водневого потенціалу України, зокрема, на основі сонячної та вітрової енергії [3]. І. Павленко [4] обговорює економічні аспекти водневої енергетики, наголошуючи на можливостях скорочення енергетичної залежності та інтеграції нових технологій у національну економіку. П. Левченко розглядає [5] питання енергетичної безпеки та значення водневої енергетики для зниження залежності від імпортованих енергоносіїв.

На думку українських вчених Л. Шостака та О. Дікарева воднева економіка представляє собою новий глобальний технологічний уклад. На переконання цих дослідників воднева економіка буде виходити за рамки енергетики і включити розподіл, використання водню для технологічних процесів.

Переважає більшість вчених у світовій та вітчизняній науці при дослідженні економічних аспектів водневої проблематики акцентують увагу на визначенні таких ключових категорій як «енергетичний перехід», «водневі технології», «декарбонізація економіки» та «воднева економіка».

Науковець із Великобританії А. Чалмерс (A. Chalmers) трактує енергетичний перехід як комплексний перехід від викопних енергоресурсів до відновлюваних, де важливу роль відіграють інновації в технологіях та соціальні зміни.

Американський дослідник Г. Вестфаль (G. Westphal) аналізує енергетичний перехід як процес, який відбувається не тільки в рамках технологій, а й через вплив соціально-економічних факторів, які формують структуру споживання енергії в суспільствах.

В публікації вітчизняного вченого О. Гаджука визначено енергетичний перехід як стратегію зменшення залежності від викопного палива та впровадження новітніх відновлюваних джерел енергії. Автор звертає увагу на те, що «енергетичний перехід в Україні повинен включати зміни в енергетичній інфраструктурі, ефективність використання енергії та соціальну адаптацію населення до нових енергетичних стандартів» [6].

В 2013 році український дослідник Ю. Біланов констатує: «енергетичний перехід для України - це не лише змінювання джерел енергії, а й зміна соціально-економічних структур, де відновлювані джерела повинні стати основою сталого розвитку» [7]. Автор затверджує, що «енергетичний перехід – це не лише технологічна трансформація, а й комплекс соціально-економічних і політичних змін, які визначають майбутнє енергетичних систем» [8]. Тобто її автор І. Бакунов вважає енергетичний перехід стратегічною метою для будь-якої країни, де пріоритет надається розвитку енергоефективних технологій та зменшенню екологічного сліду від енергетичних процесів.

Загальновідомий американський дослідник Дж. Ріфкін [9] трактує водневі технології як основний елемент глобальної енергетичної революції, де водень стає головним енергоносієм, що дозволяє створити нову економіку на основі чистої енергії. Проте науковець із Німеччини М. Шор [10] підкреслює важливість розвитку водневих технологій для інтеграції відновлювальної енергетики в існуючі енергетичні мережі, пропонуючи водень як універсальне рішення для зберігання та транспортування енергії.

Вітчизняний вчений І. Вовк зазначає, що «водневі технології можуть стати основою для енергетичної незалежності України, зокрема у виробництві водню з відновлюваних джерел енергії» [11].

В той же час всесвітньовідомий український науковець А. Згуровський акцентує на значенні водневих технологій для збереження та транспортування енергії в умовах скорочення використання викопного палива, наголошуючи на потенціалі водню в системах енергетичного зберігання. Автор констатує: «водневі технології на сьогодні є одними з найбільш перспективних для інтеграції в глобальні енергетичні системи, оскільки забезпечують ефективне зберігання і транспортування енергії, зокрема з відновлювальних джерел» [12].

Проте В. Кудряшов підкреслює значення водневих технологій, які «можуть стати ключем до вирішення проблем з енергетичним зберіганням, а також знизити екологічні наслідки промислового виробництва» [13]. Дослідник розглядає водневі технології як важливий елемент енергетичних перетворень, зокрема в контексті виробництва водню через електроліз води з використанням сонячної та вітрової енергії.

В рамках дослідження проблематики розбудови водневої економіки науковий інтерес викликає інтерпретація значення категорії «декарбонізація економіки».

Дослідник із Нідерландів К. Клінк розглядає декарбонізацію як необхідність для досягнення сталого розвитку та забезпечення кліматичної стабільності, де важливу роль відіграє воднева економіка [14]. Англійський вчений П. Сміт зауважує, що декарбонізація економіки є найважливішою задачею для всіх урядів та компаній у світі для запобігання глобальним кліматичним змінам, а водень є ключовим інструментом у цьому процесі [15].

Вітчизняні вчені в останні роки також багато уваги приділяють вивченню специфіки декарбонізації української економіки. Так, А. Шевченко зауважує, що «декарбонізація економіки є пріоритетним завданням для всіх сучасних економік, водень виступає головним елементом у забезпеченні безвуглецевих технологій» [16]. Авторка підкреслює важливість декарбонізації як основної стратегії сталого розвитку, наголошуючи на необхідності скорочення викидів парникових газів у всіх секторах економіки та впровадження водневих технологій для досягнення цих цілей.

В. Олійник визначає «декарбонізація економіки України має стати пріоритетним завданням, водень виступає ключовим елементом у забезпеченні безвуглецевої енергетичної моделі» [17]. Автор виділяє декарбонізацію як основну мету для інтеграції України в глобальну економіку майбутнього, в якій водень буде важливим компонентом як енергоносіє. Одночасно М. Кравченко наголошує на ролі декарбонізації для зменшення впливу на клімат, зокрема через технології водню, які допоможуть досягти кліматичних цілей Україна.

Закордонні та вітчизняні науковці концентрують зусилля в своїх дослідженнях на ідентифікації сутності феномену та специфіки трактування поняття «водневої економіки», що також знаходить відповідне відображення в публікаціях.

Наприклад, у праці Дж. Ріфкіна [18] водневу економіку відносено до майбутньої глобальної економіки, де водень стане основним енергоносієм, замінивши нафту та газ. Він вважає, що воднева економіка дозволить здійснити перехід до сталого розвитку. А його співвітчизник М. Ловінс описує водневу економіку як інтегровану систему, що

поєднує водневі технології, інновації в енергетичному секторі і зменшення екологічного впливу [19].

Український вчений І. Левченко у 2014 році визначає водневу економіку як нову форму економічної організації, де водень є основним енергоресурсом для всіх секторів, і Україна має великі можливості для розвитку водневих технологій через її потенціал у відновлюваних джерелах енергії. Автор підкреслює, що «воднева економіка дасть можливість не лише забезпечити сталий розвиток енергетики, а й стати основним драйвером економічного зростання, зокрема в країнах з розвиненою відновлюваною енергетикою» [20].

Ю. Бабенко [21] підкреслює, що воднева економіка в Україні має стати основою для розвитку екологічно чистої енергетики та індустрії, зокрема через активне використання водню в транспорті та промисловості. Вітчизняний дослідник М. Черненко трактує водневу економіку як модель, де водень стає основним інструментом для енергетичної незалежності та зменшення впливу на довкілля, акцентуючи увагу на розвитку інфраструктури для зберігання та транспортування водню. Автор визначає, що «воднева економіка в Україні повинна стати основою для переходу до енергетичної безпеки, де водень буде використовуватись як універсальний енергоносіє у промисловості, енергетиці та транспорті» [22].

В результаті критичного аналізу полеміки наукових поглядів щодо трактування ключових понять у сфері дослідження економічних аспектів водневої проблематики встановлено, що логіка взаємозв'язку між категоріями «енергетичний перехід», «водневі технології», «декарбонізація економіки» та «воднева економіка» базується на взаємозалежності цих елементів у процесі глобальної трансформації енергетичних і економічних систем (додаток К2).

Таким чином, логіка взаємодії ключових категорій дослідження вибудовується як послідовний ланцюг причинно-наслідкових зв'язків. Енергетичний перехід формує зростаючий попит на інноваційні технології, здатні інтегрувати відновлювані джерела енергії в енергетичні системи нового покоління. Водневі технології, у свою чергу, виступають ефективним інструментом для виробництва, зберігання, транспортування та споживання чистої енергії, створюючи технічну базу для подальшої трансформації.

Процеси декарбонізації економіки потребують мінімізації викидів парникових газів, особливо в тих секторах, де саме водень є найбільш ефективним і практично придатним рішенням. Завершальною ланкою цього ланцюга виступає воднева економіка як комплексне явище, що забезпечує сталість економічного розвитку, екологічну збалансованість і енергетичну безпеку національного та глобального рівнів.

Представлена наукова полеміка трактування ключових категорій та логіка їхньої взаємодії демонструють загальну наукову тенденцію до розвитку водневої економіки та важливість водневих технологій у контексті декарбонізації та сталого розвитку. Вітчизняні вчені вважають, що Україна має великий потенціал для розвитку водневих технологій, і їхнє впровадження може значно покращити енергетичну ситуацію в країні.

В реаліях сьогодення безсумнівним є факт того, що «практично повне вичерпування ресурсних можливостей індустріальної моделі світогосподарського розвитку вимагає докорінного концептуального переосмислення ключових методологічних засновників трансформаційних змін його енергетичної парадигми» [23].

У науковому дискурсі поняття «парадигма» використовується для позначення системи ключових уявлень, методологічних підходів і принципів, які визначають спосіб пізнання та організації знань у певний історичний період. Парадигма формує рамки наукового мислення та визначає домінантну логіку розвитку галузі. Натомість «концепція» розглядається як конкретна система поглядів або теоретичне бачення певного явища, що реалізується в межах тієї чи іншої парадигми. У контексті енергетичного розвитку концепція водневої економіки є складовим елементом нової парадигми, орієнтованої на сталість, декарбонізацію та технологічні інновації.

На нашу думку, сучасна парадигма енергетичного розвитку є фундаментальним поняттям, яке визначає нові підходи та моделі в енергетичній сфері, адаптуючись до змін у суспільстві, технологіях і навколишньому середовищі. Вона відображає загальний напрям розвитку енергетичних систем і встановлює пріоритети для майбутнього енергетичного розвитку, спрямовуючи зусилля на забезпечення сталого, ефективного та екологічно безпечного використання енергії.

Ключовими елементами сучасної парадигми енергетичного розвитку слід вважати наступні:

- перехід від традиційних енергетичних джерел до відновлюваних, що передбачає трансформацію енергетичних систем з використанням викопних видів палива на більш чисті та відновлювані джерела енергії, такі як сонце, вітер, вода та біоенергія;
- енергоефективність та раціональне використання енергоресурсів, що уможлиблюється через оптимізацію використання енергії, зменшення втрат при її виробництві, транспортуванні та споживанні;
- декарбонізація енергетики, що здійснюється шляхом прагнення до значного зменшення викидів вуглецю та інших парникових газів через впровадження чистих і низьковуглецевих технологій;
- інновації та цифровізація в енергетичних технологіях, які здійснюються з розвитком інноваційних водневих технологій, енергосистеми, що саморегулюються, розподілені енергомережі та інтелектуальні мережі;
- енергетична безпека і сталий розвиток як забезпечення стабільного, доступного та сталого постачання енергії для всіх верств населення, зокрема в умовах глобальних кліматичних змін і зменшення традиційних енергоресурсів.

На наше переконання, сучасна парадигма енергетичного розвитку в її інтерпретації та реальному прояві передбачає тісний взаємозв'язок з загальновідомими концепціями (рис. 1.1).

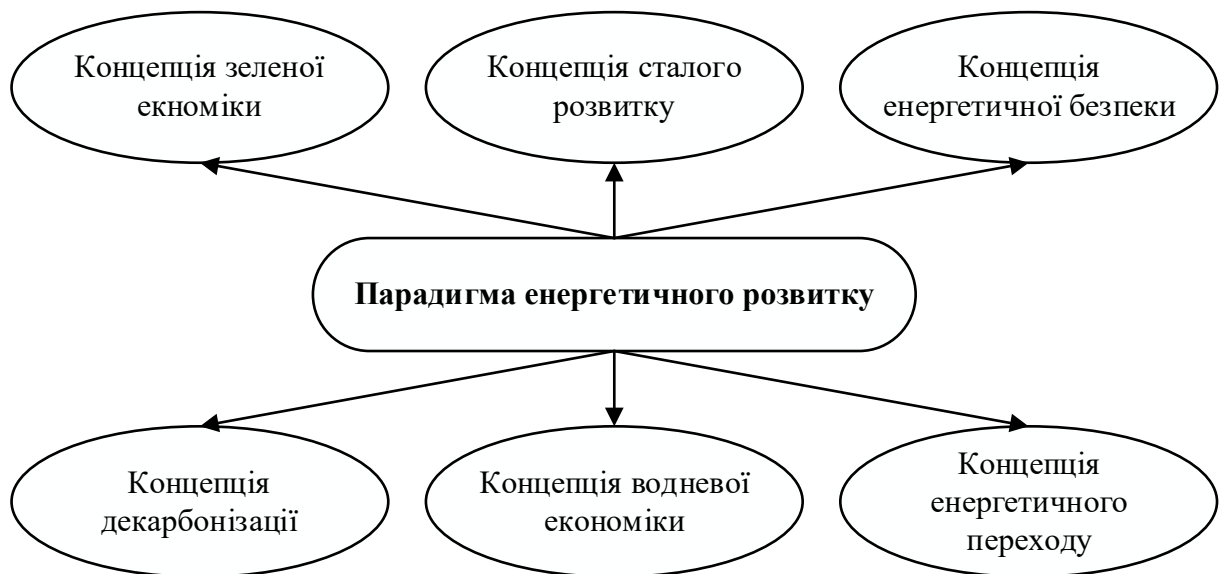


Рис. 1.1. Взаємозв'язок сучасної парадигми енергетичного розвитку із загальновідомими концепціями

Парадигма енергетичного розвитку безпосередньо пов'язана з концепцією сталого розвитку, оскільки енергетичний сектор є важливою частиною сталого розвитку. Вона включає три взаємозалежні складові: економічну – розвиток енергетичних технологій, що забезпечують енергію з низьким викидом вуглецю; соціальну – забезпечення доступу до енергії для всіх верств населення; екологічну – зменшення негативного впливу на навколишнє середовище через скорочення викидів парникових газів.

Парадигма енергетичного розвитку безпосередньо включає елементи зеленої економіки, яка акцентує увагу на розвитку технологій, що сприяють збереженню екології, зменшенню забруднення навколишнього середовища і забезпеченню екологічно безпечних умов для майбутніх поколінь. Водневі технології та енергія від відновлювальних джерел займають центральне місце в зеленій економіці.

У рамках парадигми енергетичного розвитку також визначається важливість енергетичної безпеки, що означає створення енергетичних систем, які здатні функціонувати безперебійно, знижуючи залежність від іноземних постачальників енергії і диверсифікуючи джерела енергії. Підвищення енергетичної безпеки може включати розвиток відновлюваних джерел енергії, атомної енергетики, а також інноваційних технологій.

Парадигма енергетичного розвитку безпосередньо взаємопов'язана з концепцією декарбонізації, оскільки вона передбачає перехід від використання викопних видів палива (вугілля, нафти, природного газу) до відновлюваних джерел енергії та більш чистих водневих технологій. Декарбонізація є необхідним етапом в зменшенні викидів парникових газів та боротьбі з глобальними змінами клімату.

Парадигма енергетичного розвитку відповідає концепції енергетичного переходу, оскільки включає систематичну трансформацію енергетичних систем з одночасним впровадженням новітніх відновлювальних і водневих технологій. Енергетичний перехід передбачає поступову зміну способів виробництва та споживання енергії, з метою досягнення сталого розвитку та мінімізації екологічних ризиків.

Оскільки водневі технології займають важливе місце в парадигмі енергетичного розвитку, концепція водневої економіки є природним продовженням цього процесу. Водень стає важливим джерелом енергії для декарбонізації важких галузей, таких як

важка промисловість, транспорт та енергетика, і відіграє ключову роль у глобальному енергетичному переході.

Таким чином, парадигма енергетичного розвитку є основою для впровадження нових технологій та практик в енергетичній сфері, що відповідають вимогам сталого розвитку, декарбонізації та забезпечення енергетичної безпеки. Вона пов'язана з рядом інших концепцій, таких як сталий розвиток, енергетична безпека, зелена економіка, енергетичний перехід і воднева економіка, що дає можливість сформулювати нову модель енергетичних систем для майбутнього.

Для обґрунтування чіткого уявлення про взаємозв'язок парадигми енергетичного розвитку із згаданими концепціями доцільно звернути увагу на відповідні праці, цитати та ідеї закордонних вчених, в яких висвітлені парадигмально-концептуальні положення. Оскільки ці концепції зазвичай не обговорюються в рамках однієї конкретної роботи, нами акцентовано увагу посилання на праці, де вони викладені у контексті розвитку енергетичних теорій, екологічних досліджень та політики (додаток Л2).

Автори проаналізованих наукових праць та їхні цитати підтверджують, що концепції сталого розвитку, декарбонізації, енергетичної безпеки, зеленої економіки, енергетичного переходу та водневої економіки з'являються як відповіді на глобальні виклики. Вони виникли у відповідь на зміни в суспільстві, технічні інновації та екологічні проблеми, зокрема кліматичні зміни, й активно обговорюються в науковій та політичній сферах з 1980-х років до сьогодні.

Концепція водневої економіки пройшла тривалий шлях розвитку, від наукових відкриттів до сучасних програм глобальної декарбонізації. З цього випливає, що становлення водневої економіки є не лише науковим чи технологічним, а й цивілізаційним процесом. Її еволюція включає кілька ключових етапів (додаток М2)

Воднева економіка як концепція передбачає перехід на використання водню як основного джерела енергії в глобальній економіці. Ідея базується на потенціалі водню замінити викопні палива (нафту, вугілля, природний газ), знизивши викиди парникових газів і зменшивши залежність від обмежених ресурсів.

Розвиток концепції водневої економіки в наукових колах породив кілька теоретичних шкіл, які різняться своїм підходом до ролі водню, способів його інтеграції у

глобальну економіку та вирішення екологічних і технологічних викликів. До основних теоретичних шкіл відносяться наступні: технократична, екологічна, соціально-економічна, скептична, інноваційна, економічна школа водневої економіки (додаток Б). Кожна з представлених шкіл має свої підходи до оцінки, розробки та впровадження водневої економіки. Разом вони формують багатовимірний дискурс, який стимулює подальші дослідження та допомагає знайти збалансовані рішення для переходу до стійкого майбутнього.

Технократична школа зосереджується на технологічних аспектах водневої економіки та інноваціях, необхідних для її реалізації. Екологічна школа наголошує на ролі водневої економіки у зменшенні викидів парникових газів та досягненні кліматичної нейтральності. Економічна школа досліджує фінансові та ринкові аспекти впровадження водневої економіки. Соціально-економічна школа акцентує увагу на соціальних аспектах впровадження водневої економіки. Скептична школа критично ставиться до ідеї водневої економіки, звертаючи увагу на її слабкі сторони. Інноваційна школа зосереджується на пошуку нових рішень для виробництва, транспортування та використання водню.

Таким чином, представлені у науковій літературі школи водневої економіки – технократична, екологічна, економічна, соціально-економічна, інноваційна та скептична – формують багатовекторний науковий дискурс, який демонструє різноманітність підходів до трактування ролі водню у глобальному енергетичному переході. Водночас, національний контекст вимагає адаптації цих підходів до умов енергетичної, економічної та екологічної реальності України. Враховуючи результати аналізу наукових шкіл, міжнародний і вітчизняний контекст, пропонується авторське визначення терміну «воднева економіка» як інноваційної моделі соціо-еколого-економічного розвитку, в основі якої лежить комплексне використання водню як універсального енергоносія з метою забезпечення енергетичної незалежності, декарбонізації промисловості, транспорту та побутового сектора, інтеграції відновлюваних джерел енергії в національну енергосистему та реалізації стратегічних цілей сталого розвитку України в умовах глобальних викликів та геополітичних трансформацій.

Зазначимо, економічна школа водневої економіки зосереджена на вивченні фінансово-економічних аспектів впровадження водню як енергетичного ресурсу. Її

теоретики аналізують вартість водню, ринкові механізми, політичні інструменти, інвестиційні перспективи та роль міжнародної співпраці у формуванні водневого сектору.

В розвитку економічної школи доцільно визначити три етапи.

1. Початковий етап (1970–1990 рр.): перші теоретичні розробки про економічну доцільність водневої економіки з'явилися у 1970-х роках на тлі нафтових криз; основна увага приділялася пошуку альтернативних джерел енергії та зменшенню залежності від викопного палива. Основні дослідження: теорія енергетичної субституції (заміщення нафти воднем); перспективи використання водню у транспортному секторі.

2 Етап становлення (1990–2010 рр.): зростання уваги до змін клімату стимулювало дослідження економічної ролі водню у зменшенні викидів парникових газів. Основні аспекти: собівартість виробництва водню (зокрема «сірого», «блакитного», «зеленого»); механізми субсидування та державного фінансування; відзначено роль публічно-приватного партнерства у водневих проєктах.

3. Сучасний етап (2010–дотепер): стрімке зростання інтересу до водневої економіки завдяки технологічним проривам у виробництві "зеленого водню" та зниженню вартості відновлюваних джерел енергії; фокус на глобальних ринках водню та створенні водневих хабів. Теми досліджень: Міжнародна торгівля воднем; Інвестиційна привабливість водневих технологій; Інтеграція водню у системи циркулярної економіки.

Економічна школа водневої економіки пройшла шлях від аналізу локальних моделей до глобальних сценаріїв торгівлі воднем. Її сучасні дослідження спрямовані на розв'язання ключових викликів, таких як зниження вартості виробництва, розбудова інфраструктури та залучення інвестицій. Завдяки економічним підходам воднева економіка поступово стає важливим елементом енергетичного переходу.

Економічна школа водневої економіки зосереджує увагу на економічних, фінансових і ринкових аспектах впровадження водневих технологій. Її представники підходять до водневої економіки з точки зору її впливу на глобальну торгівлю, ринки праці, сталий розвиток і економічну конкурентоспроможність країн.

Концептуально сталий розвиток передбачає гармонійне поєднання економічного зростання, соціального добробуту та охорони довкілля. У цьому контексті воднева економіка виступає одним із ключових інструментів для досягнення цілей сталого

розвитку. Вона пропонує рішення, які можуть зменшити залежність від викопного палива, знизити рівень викидів парникових газів та забезпечити стійке використання ресурсів (рис. 1.2).

У вересні 2015 року країнами-членами ООН ухвалено «Порядок денний сталого розвитку до 2030 року». Він окреслив керівні принципи та план дій щодо захисту людей і планети, а також сприяння миру, процвітанню та розвитку партнерства. Реалізація Порядку денного та його 17 глобальних цілей потребує зміни парадигми та нової економічної моделі, яка має покращити умови життя, зменшити нерівність, викоринити бідність та захистити довкілля. За останнє десятиліття з'явилася концепція зеленої економіки, яку підтримали багато країн, у тому числі й Україна.

У вересні 2015 року країнами-членами ООН ухвалено «Порядок денний сталого розвитку до 2030 року». Він окреслив керівні принципи та план дій щодо захисту людей і планети, а також сприяння миру, процвітанню та розвитку партнерства. Реалізація Порядку денного та його 17 глобальних цілей потребує зміни парадигми та нової економічної моделі, яка має покращити умови життя, зменшити нерівність, викоринити бідність та захистити довкілля. За останнє десятиліття з'явилася концепція зеленої економіки, яку підтримали багато країн, у тому числі й Україна.



Рис. 1.2. Воднева економіка як складова сталого розвитку

Синергію взаємозв'язку і взаємодії концепції сталого розвитку та концепції водневої економіки доцільно розглядати через призму досягнення Цілей сталого розвитку ПРООН, а саме:

- Ціль 7: Доступ до доступної та чистої енергії: водень забезпечує чисте, безпечне й універсальне енергетичне рішення, що доступне для різних регіонів.
- Ціль 9: Промисловість, інновації та інфраструктура: воднева економіка стимулює розвиток інновацій, створення інфраструктури для виробництва, транспортування та зберігання водню.
- Ціль 11: Стійкі міста та громади: використання водневого транспорту й енергетичних систем допомагає зменшити забруднення повітря в містах і сприяє створенню екологічно чистих міських середовищ.
- Ціль 13: Боротьба зі зміною клімату: водень значно зменшує викиди парникових газів, сприяючи досягненню кліматичних цілей Паризької угоди.
- Ціль 15: Збереження екосистем суші: перехід до водневої енергетики знижує вплив на природні ресурси, сприяючи їхньому збереженню.

Воднева економіка є важливим елементом досягнення сталого розвитку. Вона здатна вирішити екологічні, економічні та соціальні проблеми шляхом зменшення залежності від викопного палива, забезпечення чистою енергією та створення нових можливостей для економічного зростання.

Для України перехід до водневої економіки може стати ключовим кроком у забезпеченні енергетичної незалежності, інтеграції до європейського «зеленого» ринку та досягненні цілей сталого розвитку. Однак успішне впровадження цієї концепції потребує стратегічного планування, інвестицій та міжнародної співпраці.

1.2 . Розбудова водневої економіки: передумови, складові, детермінанти та синергетичні ефекти

Розвиток цивілізації протягом останніх десятиліть визначався переважно видом енергоносія, який у відповідний час використовує людство. Зміна домінуючих енергоносіїв у минулому була довготривалим і непростим процесом. У XX столітті

сформувалася економіка, заснована на викопних паливах (переважно, на використанні нафти та природного газу) з її незаперечними економічними успіхами.

Глобальна енергетична система, заснована на викопному паливі, призвела до масштабних екологічних наслідків – зростання викидів парникових газів, зміну клімату, деградацію біосфери та посилення геополітичної нестабільності. Ці чинники зумовлюють необхідність переходу до альтернативного, екологічно чистого енергоносія – водню. [24;25;26;27;28;29;30].

Світова енергетика дедалі більше стикається з проблемою виснаження традиційних нафтогазових ресурсів. У багатьох регіонах – наприклад, у Північному морі – видобуток вже знизився на десятки відсотків. Концепція «піку нафти», сформульована Маріоном Кінгом Хаббертом, передбачає, що глобальний видобуток досягне максимуму і невпинно спадатиме, якщо не буде відкрито нових родовищ. Це викликає зростання геополітичної напруги, адже понад 65% доведених запасів зосереджено в нестабільних регіонах світу, зокрема в країнах ОПЕК [31;32;33;34;36;37].

Наслідки нафтової кризи 1973 року, війна в Перській затоці, і сучасні санкції щодо Росії підтверджують залежність глобальної економіки від доступу до нафти. Рішення ОПЕК+ щодо скорочення видобутку, геополітичні конфлікти та енергетичні шоки спричиняють коливання цін (іноді понад \$120/барель) та інфляцію. Ці обставини стимулюють країни до пошуку надійних, незалежних джерел енергії – передусім водню як стратегічної альтернативи.

Енергетичний перехід та пошук альтернатив є ключовими рішеннями для уникнення кризи. Європейський Союз у рамках «Європейської зеленої угоди» ставить за мету скоротити споживання викопного палива на 55% до 2030 року [38]. Економічно розвинені країни, такі як Німеччина та Японія, активно інвестують у розвиток водневих технологій для заміщення традиційних вуглеводневих енергоносіїв.

В різні епохи розвитку людства існувала потреба в енергоносіях, які уможливили створити умови для промислового розвитку як окремих країн, так і всього світу в цілому. Історично людство спочатку найбільше всього використовувало деревину, потім вугілля, нафту та природний газ. Частка водню у загальному складі енергоносіїв збільшувалась. У зв'язку з необхідністю зменшення впливу вуглекислого газу на навколишнє середовище

сьогодні в промислово розвинутих країнах світу значну увагу приділяють питанням декарбонізації економік з переходом на використання нового енергоносія чистого водню. Аналітичні дослідження показують, що розпочався новий період розвитку економік промислово розвинутих країн – ера водню [39; 40].

Досвід розвитку світової економіки свідчить, що кожна базова структурна складова паливно-енергетичного комплексу в процесі історичного розвитку мала свої терміни становлення розвитку і існування. Іноді вона, як при використанні вугілля, вимірюється століттями, а іноді, наприклад, як у разі енергії атома, усього лише декількома десятиліттями. Прийнято вважати, що воднева енергетика виникла нещодавно. Дійсно, цей напрям в енергетиці як самостійна гілка сформувалась лише у другій половині XX століття.

У 1766 році англійський хімік Генрі Кавендіш відкрив горючий газ – водень. Француз Антуан Лавуазьє у 1783 році дав йому назву «hydrogen», довівши, що при згорянні водню утворюється вода. У 1839 році валлійський вчений Вільям Роберт Гров створив перший паливний елемент, який став основою для розвитку сучасних водневих технологій.

Протягом XIX століття відбувалося активне дослідження водню та його потенційних застосувань. У 1839 році валлійський вчений Вільям Роберт Гров створив перший паливний елемент, який використовував водень та кисень для генерації електричного струму. Цей винахід став важливою віхою у розвитку водневих технологій та заклав основи для майбутніх досліджень у цій галузі.

На початку XX століття водень почав використовуватися в промислових масштабах. У 1920-х роках німецький інженер Рудольф Ерренн розробив процес виробництва водню з вугілля, який став основою для промислового виробництва водню. Під час Другої світової війни водень використовувався в ракетній техніці, зокрема в німецькій ракеті Фау-2.

У другій половині XX століття відбувся значний прогрес у розвитку водневих технологій. У 1950-х роках NASA почало використовувати водень як ракетне паливо для своїх космічних програм. Це стимулювало подальші дослідження та розробки в галузі виробництва, зберігання та використання водню.

У 1970-х роках, під час нафтової кризи, інтерес до водню як альтернативного джерела енергії значно зріс. Країни почали інвестувати в дослідження та розробку водневих технологій, зокрема паливних елементів та водневих двигунів. У 1990-х роках були розроблені перші прототипи водневих автомобілів, що стало важливим кроком у напрямі комерціалізації водневих технологій у транспортному секторі.

Науково-практичний інтерес до водню як до палива загострився в 1990 році у зв'язку з усвідомленням небезпеки емісії парникового газу. Розвиток водневої енергетики та необхідність пошуку нових ефективних енергоносіїв й розробки на їх основі екологічно безпечних альтернативних палив зумовлені двома основними чинниками: швидке вичерпання запасів нафти на Землі; погіршення екологічної ситуації в багатьох країнах, насамперед у економічно розвинутих [41]. Одним з найперспективніших енергоносіїв виступає водень: на нього припадає три чверті всієї матерії на планеті, запаси водню невичерпні й постійно поновлюються [42]. Водень – це ідеальне паливо. За здатністю виділяти тепло він чемпіон серед чемпіонів: у нього найвища теплотворна здатність [43]. При згоранні водень дає 28-30 тис. ккал (на 1 кг.). Для порівняння зауважимо, що високої якості бензин дає тільки 10–11 тис. ккал., високоякісне вугілля – 8 тис. ккал., дрова – 2,5 тис. ккал [44]. Водень як паливо уможлиблює зняти конфлікт енергетики та біосфери, оскільки в циклі «отримання – згорання» він майже не дає шкідливих для навколишнього середовища сполук. Навпаки, при отриманні його в атмосферу виділяється кисень, а при згоранні утворюється вода.

На початку XXI століття розвиток водневих технологій набув нового імпульсу завдяки зростаючій стурбованості глобальними екологічними проблемами та необхідністю переходу до низьковуглецевої економіки. Багато країн та компаній почали активно інвестувати в дослідження та розробку водневих технологій, розглядаючи їх як ключовий компонент майбутньої енергетичної системи.

У минулому економічне зростання часто залежало від споживання природних ресурсів, ніби їхні ресурси були безмежними. Наслідком цього є поточна криза природних ресурсів із загрозою дефіциту сировини та постійного зростання цін. Сьогодні все більше суспільств / країн та економістів звертаються до інших моделей економіки, згідно з якими багатство можна створювати, не руйнуючи довкілля.

В сучасному світі питання сталості та ефективності використання енергетичних ресурсів стають дедалі більш актуальними у зв'язку зі зростаючою свідомістю про необхідність зменшення впливу на навколишнє середовище та розвитку стійкої енергетики. У цьому контексті концепція водневої економіки виявляється однією з найбільш обговорюваних та перспективних галузей сучасної економіки. Воднева економіка виступає не лише як потенційне рішення для енергетичних проблем, але і як ключовий фактор у переході до сталого розвитку та зменшенні викидів парникових газів.

Процес розбудови водневої економіки має багатогранну сутність і часто трактується різними вченими через призму різних аспектів, таких як технологічні, економічні, екологічні та соціальні зміни. Однак деякі з конкретних трактувань цього поняття можуть бути в межах статей або книг, написаних вченими, які спеціалізуються на водневих технологіях, енергетичній трансформації, екології та економічних аспектах. Розглянемо, як це поняття розкривають різні науковці і як змістовно воно наповнюється в контексті водневої економіки.

Воднева економіка є предметом дослідження переважної більшості зарубіжних науковців, результати яких висвітлені у значній кількості наукових праць. Проте переважна кількість наявних публікацій неекономічного характеру і стосується розвитку технічних аспектів водневих технологій, відповідної водневої (транспортної, промислової) інфраструктури. Існують і публікації, присвячені вирішенню завдань побудови водневої економіки як системного утворення (праці Дж. О. М. Бокріса [45], Р. Сіти, П. Раймонді, М. Нуссана [46], Р. Молінеро, М.Дж. Лазаро, І. Сілвеса [47] та ін.). Досліджуються також окремі питання розбудови водневої економіки, наприклад, такі як формування транскордонно-транспортної інфраструктури (К. Беркан, М. Ригауг, Т. Скайолсвольд [48]) тощо. Досліджуються також окремі питання інфраструктурного забезпечення водневої економіки, наприклад, такі як формування транскордонно-транспортної інфраструктури (К.Беркан, М. Ригауг, Т. Скайолсвольд [49]) тощо.

У 1972 році південноафриканський професор хімії Техаського університету Джон О'Мара Бокріса [50] вперше представив концепцію водневої економіки. Автор публікації обґрунтував: водень як енергоносіє, перспективне, екологічно чисте та універсальне джерело енергії; важливість переходу до використання водню для забезпечення

глобальної енергетичної безпеки; акцент на виробництві водню за допомогою електролізу води із використанням відновлюваних джерел енергії (сонячної, вітрової та гідроенергетики); виклики, пов'язані зі зберіганням і транспортуванням водню, та перспективи створення інфраструктури для водневої енергетики; екологічні переваги використання водню через зменшення викидів парникових газів та забруднення довкілля; довгостроковий вектор в стратегії переходу до водневої економіки зі значними інвестицій і розвитку нових технологій. Ця стаття стала основою для багатьох подальших досліджень у сфері водневої енергетики та фундаментом для сучасних ініціатив у розробці чистих та відновлюваних джерел енергії.

Відомий американський економіст, професор Гарвардської школи бізнесу Майкл Портер зосереджує увагу на тому, як нові технології можуть сприяти економічному зростанню та конкурентоспроможності країн. Він запропонував концепцію конкурентної переваги використовує для аналізу того, як нові енергетичні інновації можуть змінити глобальні економічні моделі [51]. Відповідно до висновків цього науковця можна стверджувати, що розвиток водневої економіки може допомогти країнам, які володіють ресурсами для виробництва відновлювальної енергії, стати конкурентоспроможними на глобальному ринку завдяки впровадженню новітніх технологій.

Науково-практичний інтерес в контексті реалізації концепції водневої економіки, яка виникла на початку 1970-х років у відповідь на першу нафтову кризу, викликає стратегічний підхід. Такий підхід запропонований колективом іспанських науковців з Інституту вуглецевої хімії – (Instituto de Carboquímica, ICB-CSIC), який є частиною Вищої ради з наукових досліджень Іспанії та спеціалізується на дослідженнях вуглецевих матеріалів, енергетики, а також інноваційних технологій у сфері водню. У 2016 році колективом дослідників у складі Р. Молінера, М. Хесус Лазаро та І. Суелвес [52]. Визначили та обґрунтували важливу роль водню в майбутньому енергетичному сценарії (водень не як домінуючий енергоносіє, а в поєднанні та конкуренції з іншими джерелами енергії); стратегічне підґрунтя на основі аналізу поточного стану трьох основних напрямків водневої економіки (виробництво, розподіл та використання водню); необхідність стратегічного планування (для переходу від «економіки викопного палива» до водневої економіки потрібна ретельно спланована стратегія, яка охоплює

виробництво, розподіл та використання водню); синергетика стратегічного підходу до впровадження водню (стратегії впровадження водню повинні базуватися на пошуку синергії та співпраці з іншими енергетичними векторами, а не на конфронтації).

У статті Р. Молінер, М. Дж. Лазаро та І. Суелвес представлено комплекс рекомендацій щодо переходу до водневої економіки. Серед ключових напрямів виділено вдосконалення технологій виробництва водню, зокрема розвиток зеленого водню через електроліз із використанням ВДЕ та розширення застосування біогазу. Значну увагу приділено інфраструктурі зберігання і транспортування, включаючи інноваційні матеріали, трубопровідні мережі та технології зрідження. Акцентовано на розширенні сфер використання водню в транспорті, промисловості й енергетиці. Підкреслено необхідність економічної підтримки через субсидії, НДДКР та створення ринкових механізмів. Важливими названо міжнародну співпрацю і розробку глобальних стандартів, а також освітні ініціативи для підвищення обізнаності. Автори наголошують, що лише поєднання технічних, економічних і політичних інструментів забезпечить успішний перехід до водневої економіки.

Значний інтерес викликають дослідження італійських вчених Р. Скїти, П. Раймонді та М. Нуссана з інституту Fondazione Eni Enrico Mattei (Мілан), які проаналізували потенціал зеленого водню як стійкої альтернативи викопному паливу. Автори зазначають, що станом на 2020 рік водень становив менше 2% світового енергоспоживання, а більшість водню вироблялася з викопного палива з високими викидами CO₂. Зелений водень, отриманий електролізом із відновлюваних джерел, має широке застосування, однак його масове впровадження стримується технічними та інфраструктурними бар'єрами. Дослідження також окреслює геополітичні наслідки переходу до водневої енергетики та містить рекомендації щодо посилення інвестицій у НДДКР, розбудови міжнародної інфраструктури та міжурядової співпраці [53].

Для України актуальні питання розбудови водневої економіки є менш вивченим. Зокрема, праці багатьох вітчизняних науковців та професіоналів-експертів присвячені визначенню особливостей розвитку водневої енергетики, декарбонізації, оцінюванню потенціалу водню та перспектив розбудови водневої економіки в нашій країні. Серед

провідних українських дослідників водневої енергетики варто виокремити низку фахівців, які роблять вагомий внесок у розвиток цієї сфери [54; 55; 56; 57; 58; 59].

О. Репкін, голова «Української Водневої Ради», обґрунтовує можливість інтеграції України у європейський водневий ринок, зокрема через експорт «зеленого» водню до Німеччини. Його ініціативи ґрунтуються на Водневій стратегії ЄС та розвитку ВДЕ [60; 61; 62; 63].

С. Кудря, керівник Інституту відновлюваної енергетики НАН України, є автором Атласу енергетичного потенціалу відновлюваних джерел України. У своїх роботах він підкреслює необхідність науково обґрунтованої інтеграції водневих технологій у енергосистему держави [64; 65; 66].

О. Шрайбер, В. Дубровський, О. Тесленко з Інституту загальної енергетики НАН України досліджують шляхи розвитку «зеленого» водню на основі електролізу та його потенціал для декарбонізації енергетики України [67].

О. Зеленько, Т. Гуцанта та І. Осьмірко аналізують переваги й ризики впровадження водневої енергетики в Україні. Особливу увагу вони приділяють питанню вартості виробництва водню, складності його транспортування та безпечного зберігання [68].

О. Яценко у своїх дослідженнях формулює пропозиції щодо державної підтримки розвитку водневої інфраструктури. Він акцентує увагу на необхідності участі України в міжнародних програмах на кшталт HydrogenEurope для залучення інвестицій та технологій [69; 70; 71; 71; 72].

Українські дослідники, фахівці та експерти роблять значний внесок у розвиток водневої енергетики та її вплив на економіку України, досліджуючи різні аспекти та перспективи впровадження водневих технологій. Однак значна кількість питань розбудови водневої економіки залишається недослідженою.

Воднева економіка є міждисциплінарним концептом, що досліджується з погляду енергетики, екології, економіки, інженерії та соціальних наук. Вона базується на інтеграції сучасних технологій, ринкових підходів та сталого розвитку, що й породжує багатогранний теоретичний дискурс.

В результаті проведених досліджень та критичного аналізу полеміки з актуальних питань розбудови водневої економіки доцільно звернути увагу на наступні сформульовані нами узагальнення.

Розбудова водневої економіки є багатограним процесом, який охоплює не тільки технологічну, але й соціально-економічну, екологічну та політичну трансформацію. Розбудова водневої економіки є актуальною проблематикою серед дослідників у галузі енергетики, екології, економіки та інших дисциплін.

Воднева економіка має тісний зв'язок із кількома видами економік, які визначають її інтеграцію в сучасний світовий економічний простір (додаток В).

Воднева економіка інтегрує підходи з екологічної, інноваційної та енергетичної економік, формуючи нову міждисциплінарну парадигму. Вона сприяє сталому розвитку, декарбонізації промисловості та енергетики, а також створенню нових можливостей для економічного зростання

Вчені трактують цей процес як необхідний для глобальної декарбонізації, екологічної безпеки та економічного розвитку. Важливою складовою є не лише впровадження інноваційних водневих технологій, а й створення нових соціальних структур і економічних можливостей для країн, що прагнуть до сталого розвитку.

Сутність розбудови водневої економіки полягає в інтеграції водню як енергетичного ресурсу у різні сектори економіки з метою забезпечення сталого розвитку, зниження викидів парникових газів та створення нових можливостей для економічного зростання. Водень, будучи чистим паливом з високим енергетичним потенціалом, стає одним з ключових елементів для досягнення глобальних кліматичних цілей та енергетичної трансформації.

Інтерес до водню з боку науковців та практиків обумовлений його властивостями. Фізичні властивості водню, в порівнянні з іншими паливно-енергетичними ресурсами, значно перевищують навіть природний газ по теплотворності. Водень відносять до відновлюваного джерела енергії. Його хімічні властивості такі, що коли він з'єднується і роз'єднується з іншими хімічними елементами, побічно виділяється велика кількість тепла і постійний струм. І ми отримуємо все те, що й при переробці вугілля, природного газу, мазуту, бензину тощо.

Водень є дуже енергоємним: він горить за такої температури, що і природний газ, однак при згорянні на одиницю маси виділяється у 3,5 разу більше теплової енергії порівняно з нафтою та вугіллям. Його можна транспортувати за допомогою трубопроводів, у ємностях для стисненого та зрідженого газу за дуже низьких температур.

Воднева технологія уможлиблює зберігати водень сезонно. Звичайний акумулятор має свої властивості до розрядження, йому потрібні постійні умови, щоб він зберігав заряд. Для водню все значно простіше – він зберігається у будь-якому вигляді – зрідженому чи під тиском. Більше того, секторальна інтеграція цих технологій передбачає перехід до водневої економіки, а не тільки окремо транспорту чи енергетики. Новим опалювальним ресурсом замість вуглеводнів – вугілля, природний газ, нафта – стає водень як єдина універсальна енергетична одиниця. І вона використовується як у енергетиці, так і в транспорті, так і в житлово-комунальному господарстві. Тому що процес виділення тепла і електроенергії абсолютно повністю імплементується в будь-яку будівлю для забезпечення теплом, гарячою водою і електричною енергією. Поєднання водневих технологій з вітровою енергетикою (вона має вищий потенціал, ніж сонячна) дозволяє отримувати постійне джерело енергозабезпечення, яке є відновлюваним.

Серед основних переваг водню як енергоносія фахівці виокремлюють його універсальність, екологічну чистоту та широкий спектр застосування. Водень може ефективно зберігатися, транспортуватися і використовуватися в різних секторах економіки, слугуючи альтернативою традиційним видам палива. Його виробництво може ґрунтуватися на внутрішніх ресурсах країни, що сприяє енергетичній безпеці. Крім того, водень виконує функцію акумуляування енергії та може слугувати інструментом балансування навантажень у системах, що працюють на відновлюваних і традиційних джерелах енергії.

Водень не зустрічається на землі в чистому вигляді. Як правило, він вилучається за допомогою різноманітних хімічних реакцій. У фаховій літературі з водневої енергетики водень поділяється на різні кольори залежно від способу виробництва.

Воднева економіка базується на використанні водню як універсального енергетичного носія, який може замінити викопні палива у багатьох галузях. Схема

взаємодії елементів водневої економіки складається з ключових компонентів, які забезпечують виробництво, зберігання, транспортування та використання водню.

Повноцінний цикл відтворення водню як об'єкту водневої економіки доцільно представити у вигляді наступної структурно-логічної схеми взаємодії визначальних складових: [Джерела енергії] → [Виробництво водню] → [Зберігання] → [Транспортування] → [Споживання] (додаток Г).

Повний цикл водневої економіки – це основа для розуміння всіх етапів, що входять у виробництво, транспортування, зберігання та використання водню. Від правильного функціонування кожного етапу залежить успіх усієї водневої економіки. Проте без належної інфраструктури цей цикл не може працювати ефективно.

Водень у контексті об'єкту економіки може мати кілька різновидів, кожен з яких має свої характеристики, застосування та вплив на екологію та економіку. Різновиди водню, як правило, класифікуються за методами виробництва та рівнем їх впливу на навколишнє середовище. Нижче наведено основні різновиди водню, які мають значення для розбудови водневої економіки (додаток Д).

Розбудова водневої економіки є важливим етапом у досягненні сталого енергетичного розвитку, декарбонізації та боротьби зі зміною клімату. За ключовими критеріями впливу водню на екологію та економіку доцільно порівняти його наступні характеристики. Види водню класифікуються за джерелами енергії та ступенем екологічності. Зелений водень виробляється з відновлюваних джерел, синій – із викопного палива з уловлюванням CO₂, сірий – без технологій компенсації викидів. Бурий, жовтий, бірюзовий та біоводень мають проміжні характеристики. Порівняння типів наведено у додатку Д.

Виробництво водню призводить до викидів близько 830 млн тонн вуглекислого газу на рік, що еквівалентно викидам Великої Британії та Індонезії разом. Якщо за допомогою систем уловлювання, утилізації та зберігання вуглецю CCUS (Carboncapture, utilizationandstorage) вилучити CO₂ з сірого водню (наразі ефективність цих систем складає до 80-90%), то такий водень називають блакитним [73].

За даними МЕА вартість сірого та блакитного водню в різних країнах коливається від 1 до 1,5 \$ за кг у США та на Середньому Сході, та від 1,7 до 2,4 \$ за кг в ЄС та Китаї.

При цьому основну частину витрат складають витрати на природний газ, на який припадає від 45% до 75% виробничих витрат, та на системи захоплення CO₂ (при платі за CO₂ у розмірі 50-70 \$ за тонну). Вартість же зеленого водню складає від 2,5 до 6 \$ за кг і визначається насамперед вартістю електроенергії, яка в різних країнах складає від 20 до 70 \$ за МВт. І конкурентоздатним зелений водень стосовно блакитного стає лише в діапазоні цін на електроенергію від 30 до 45 \$ за МВт (3-4,5 цента за кВт/год) [74].

Якщо ж порівняти конкурентоздатну ціну електроенергії для електролізерів з ціною «зеленого» кіловату в Україні (від 15 центів для СЕС та від 11,5 центів для ВЕС без ПДВ та надбавки до «зелених» тарифів за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва) [75], то стає зрозумілим, що в Україні зелений водень є неконкурентоздатним (збитковим) як мінімум до 2030 року.

Сучасні науковці та фахівці-експерти досліджують фактори, які впливають на вартість «зеленого» водню в Україні (рис. 1.3.) [76].

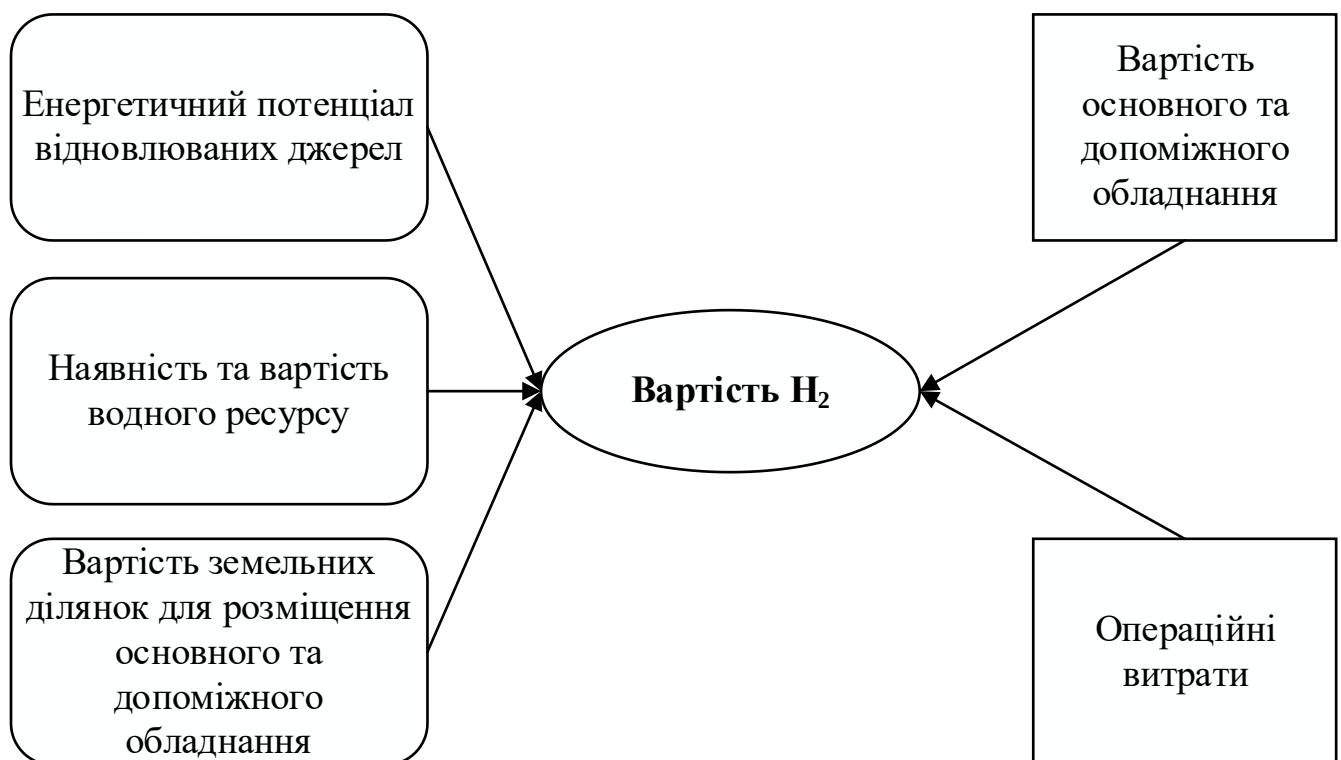


Рис. 1.3. Фактори, які впливають на вартість «зеленого» водню.

Джерело: розроблено автором

Пріоритетом для ЄС є зелений водень, для виробництва якого в ЄС з 2020 по 2024 рік планується встановити електролізери загальною потужністю не менше 6 ГВт, що забезпечить виробництво до 1 млн тон водню на рік. З 2025 по 2030 рік планується довести потужність електролізерів до 40 ГВт, а річне виробництво водню до 10 млн тон. До 2050 року виробництво та застосування водню має зрости ще більше. Зокрема передбачається, що він застосовуватиметься як засіб добового і сезонного балансування електроенергетичної системи, яка базується на відновлюваних джерелах енергії. До 2050 року близько 20% електроенергії з відновлюваних джерел може бути використано для виробництва зеленого водню, за рахунок якого буде забезпечено до 24% світової потреби в енергоресурсах, а його щорічні продажі складуть 630 млрд (табл. 1.1.).

Таблиця 1.1.

**Прогнозні значення техніко-економічних характеристик
виробництва «зеленого» водню**

Виробництво водню електролізерами	Капітальні витрати (євро/кВт)	Операційні витрати/рік %	Ефективність системи	Електроенергія (4,000-5,000 год) (євро/МВт год)	Водень (євро/кг)
2020-2025 рр.	300-600	1,5 %	75-80%	25-50	1,5-3,0
2025-2030 рр.	250-500	1%	80-82%	15-30	1,0-2,0
До 2050 р	< 200	< 1%	> 82%	10-30	0,7-1,5

Джерело: складено автором на основі [77]

Складові водневої економіки утворюють складну систему, яка включає виробництво, зберігання, транспортування та використання водню, а також розвиток інфраструктури, наукових досліджень і регулювання. Їх гармонійна інтеграція є ключем до успішного переходу до водневої економіки та сталого розвитку.

Повний цикл водневої економіки демонструє всі етапи життєвого циклу водню – від джерела до кінцевого споживача, включаючи виробництво, транспортування, зберігання, а також використання в різних секторах економіки.

Інфраструктура підтримує і забезпечує практичну реалізацію всіх етапів циклу, дозволяючи здійснювати виробництво, транспортування, зберігання та використання водню. Важливо чітко усвідомлювати ключову різницю між наведеними категоріями: повний цикл водневої економіки – це концептуальний процес, що описує, як водень рухається від виробництва до споживання. Він включає в себе етапи, технології та

процеси; інфраструктура водневої економіки – це фізичні та технологічні засоби, які дозволяють цей цикл реалізовувати на практиці. Це саме «оснащення», яке забезпечує весь процес.

Таким чином, повний цикл – це процес або послідовність етапів, а інфраструктура – це «система підтримки» для реалізації процесу, для забезпечення матеріальну та технічну базу виконання етапів. Інфраструктура є необхідною частиною для здійснення повного циклу (табл. 1.2.).

У розвитку водневої економіки на національному рівні (в Україні), як і в глобальному контексті, важливу роль виконують інноваційні інструменти як концепти її розбудови, до яких слід віднести наступні: водневі технології, долини, хаби, коридори, мережі, магістралі, меморандуми, стратегії, проекти, центри. Такі інструменти є взаємопов'язаними і працюють разом для забезпечення розвитку водневої індустрії, зниження вуглецевих викидів та інтеграції країни в глобальні енергетичні ринки. Ось як ці концепти взаємодіють один з одним (додаток Е).

Таблиця 1.2.

Повний цикл та інфраструктура як концепти водневої економіки

Концепт	Опис	Приклади
Повний цикл	Охоплює всі етапи обігу водню: від виробництва до використання та управління в системі.	Виробництво (електроліз, біомаса), транспортування (трубопроводи, контейнери), зберігання, використання (енергетика, промисловість), управління потоками.
Інфраструктура	Включає технічну та організаційну основу, що забезпечує реалізацію повного циклу.	Заводи, трубопроводи, водневі заправки, SmartGrids, наукові центри, держоргани, навчальні установи.

Джерело: складено автором

В Україні вже здійснюються реальні кроки у напрямі розбудови водневої економіки через створення водневих проектів, інфраструктури та розвиток співпраці з міжнародними партнерами. Активно розвиваються технології виробництва водню, в рамках проектів із використання відновлювальних джерел енергії – це Проєкт «Зелений водень» на основі сонячної енергії. В Україні кілька сонячних електростанцій вже тестують технології для виробництва «зеленого» водню за допомогою електролізу води.

Наприклад, на базі сонячних електростанцій в Одеській області здійснюються пілотні проєкти із виробництва водню.

Україна вже має потенціал для розвитку водневих долин, зокрема завдяки розташуванню великих промислових регіонів та наявності відновлювальних джерел енергії: наприклад, Миколаївська воднева долина. У Миколаївській області розвиваються проєкти на базі «зеленого» водню для сталеливарних та хімічних підприємств. Вже розроблено кілька ініціатив щодо інтеграції виробництва водню із місцевими промисловими підприємствами, зокрема для використання водню в металургії.

Україна має стратегічне розташування для створення водневих хабів, які можуть забезпечити експорт водню до Європи: Проєкт водневого хабу в порту Одеси. В Одесі активно працюють над створенням водневого хабу, який дозволить не тільки виробляти водень з відновлювальних джерел, але й забезпечити його транспортування для експорту в країни ЄС. Водневий хаб включатиме інфраструктуру для зберігання водню та його транспортування через порт.

Україна активно працює над інтеграцією водневої економіки з Європою через використання існуючої газотранспортної системи (ГТС): Проєкт водневого коридору Україна-ЄС. Оператор ГТС України разом з міжнародними партнерами тестує можливість транспортування водню через існуючі газопроводи. Це дасть можливість Україні стати важливим транзитним хабом для водню між Європою та Азією.

Україна підписала кілька стратегічних угод із країнами ЄС та міжнародними організаціями для розвитку водневої економіки:

- Меморандум про співпрацю з Німеччиною щодо водневої енергетики: У рамках цього меморандуму Україна та Німеччина погодили спільну стратегію щодо розвитку водневої економіки, зокрема щодо створення водневих хабів і експорту водню до ЄС.
- Угода з Польщею про розвиток водневого коридору: Це співробітництво передбачає використання наявних енергетичних маршрутів для розвитку водневих поставок між Польщею та Україною.

Україна вже почала формувати національні стратегії для розвитку водневої економіки: Концепція водневої економіки України (розроблена Міністерством

енергетики України). В документі визначено ключові напрями розвитку водневої економіки, зокрема підтримка виробництва «зеленого» водню та інтеграція його у національні енергетичні системи.

В Україні реалізуються конкретні проекти для впровадження водневих технологій у промисловість та енергетику:

- Проект із водневої мобільності в Києві: Київ планує тестувати водневі автобуси та вантажівки в рамках проекту з переходу на екологічно чисті види транспорту. Цей проект реалізується за підтримки міжнародних партнерів і є важливим кроком у розвитку водневої інфраструктури.

Україна також має наукові центри, які займаються дослідженнями та розробками в галузі водневої економіки: Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». КПІ активно займається дослідженнями у сфері водневих технологій, зокрема у виробництві водню та зберіганні енергії.

Таким чином, Україна на шляху до формування водневої економіки активно впроваджує інновації та стратегії для розвитку водневих технологій, інфраструктури та міжнародного співробітництва. Зокрема, це включає створення водневих хабів, коридорів, долин, а також важливі міжнародні угоди для інтеграції з європейськими енергетичними ринками. Ці ініціативи сприятимуть підвищенню енергетичної безпеки, зменшенню викидів вуглецю та розвитку національної економіки через нові технології та інвестиції.

В результаті проведених нами досліджень було використано SWOT-аналіз як інструмент стратегічного планування, який дозволив оцінити сильні й слабкі сторони, а також можливості та загрози, пов'язані з розбудовою водневої економіки в Україні (рис. 1.4).

На основі розробленої моделі SWOT-аналізу було здійснено детальне оцінювання стратегічних перспектив розбудови водневої економіки в Україні за відповідною аргументацією.

1. Сильні сторони (Strengths). Україна володіє значним потенціалом для розвитку «зеленої» водневої енергетики завдяки наявності ресурсів відновлюваної енергії — сонячної, вітрової та біоенергетики. За даними Інституту відновлюваної енергетики НАН

України, у 2023 році встановлена потужність ВДЕ сягнула 9,5 ГВт. У межах ініціативи 2×40 ГВт Україна планує розгорнути до 8 ГВт електролізерних потужностей, що створює передумови для експорту водню до ЄС. Співпраця з Євросоюзом, адаптація газотранспортної інфраструктури та державні стратегії декарбонізації сприяють інтеграції водневих технологій. Наукові установи, зокрема Інститут відновлюваної енергетики НАН України, активно підтримують цей напрям дослідження.

Сильні сторони (Strengths) • природні ресурси • географічне розташування • енергетична інфраструктура • науковий потенціал • підтримка ЄС	Слабкі сторони (Weaknesses) • обмежене фінансування • регуляторна невизначеність • інфраструктурні виклики • недостатня популяризація • енергетична залежність •
Можливості (Opportunities) • експортний потенціал • інвестиції • технологічні інновації • декарбонізація економіки • міжнародна співпраця	Загрози (Threats) • конкуренція • економічна нестабільність • високі початкові витрати • енергетичні кризи • екологічні виклики

**Воднева
економіка**

Рис. 1.4. SWOT-аналіз розбудови водневої економіки в Україні

Джерело: розроблено автором

2. Слабкі сторони (Weaknesses). Розвиток водневої економіки в Україні стримується низкою бар'єрів. Серед них – обмежене фінансування з боку держави та приватного сектору, відсутність чіткої правової бази та інвестиційних стимулів. Обмежений доступ до іноземного капіталу ускладнює розбудову інфраструктури. Україна має недостатній досвід у виробництві «зеленого» водню, технології переважно імпорتنі, що посилює зовнішню залежність. Відсутність водневих заправок, спеціалізованих мереж для транспортування і зберігання, а також дефіцит кваліфікованих кадрів гальмують впровадження інновацій.

3. Можливості (Opportunities). Україна має потенціал долучитися до міжнародних водневих коридорів, зокрема Європейського, що відкриває перспективи співпраці з ЄС та залучення інвестицій. У межах Європейського «Зеленого курсу» країна

може стати постачальником «зеленого» водню та скористатися міжнародними грантами і фінансовою підтримкою. Створення національних інноваційних хабів сприятиме розвитку технологій електролізу, зберігання і транспортування. Це зменшить залежність від викопного палива, знизить викиди CO₂ і підвищить конкурентоспроможність України у світовій енергетиці.

4. Загрози (Threats). Конкуренція з розвиненими країнами (ЄС, Японія, США, Австралія) у сфері водневої економіки ускладнює залучення інвестицій і вихід на глобальний ринок. Політична нестабільність, економічні ризики та воєнні загрози стримують інтерес до нових енергетичних технологій. Невизначеність у сфері енергетичної політики й висока вартість технологій обмежують доступ українських підприємств до водневих рішень. Недостатньо розвинена інфраструктура транспортування та зберігання також залишається суттєвим бар'єром.

За результатами стратегічного аналізу ми дійшли висновку, що розбудова водневої економіки в Україні має величезний потенціал, однак існує кілька значних викликів, які потребують вирішення. Сильні сторони України, такі як наявність природних ресурсів та готовність до інтеграції в міжнародні проекти, можуть сприяти розвитку водневої економіки. Однак для цього необхідно вдосконалити інфраструктуру, розвивати законодавчу базу, залучати інвестиції та стимулювати технологічні інновації.

Задля успіху водневої економіки в Україні важливо продовжити співпрацю з міжнародними партнерами, розвивати внутрішні науково-дослідні потужності, а також запроваджувати підтримку держави у вигляді фінансування та субсидій для розвитку водневих проектів. Розбудова водневої економіки в Україні залежить від комплексу передумов і детермінантів, які охоплюють економічні, екологічні, технологічні, соціальні й політичні аспекти (додаток Ж).

Передумови та детермінанти водневої економіки – це взаємопов'язані, але відмінні за змістом поняття, що формують базу для її розвитку. Передумови охоплюють загальні умови – технічні, економічні, політичні й соціальні, які створюють основу для запуску водневої економіки. Натомість детермінанти є конкретними факторами, що безпосередньо впливають на темпи, ефективність або бар'єри впровадження водневих технологій у певний історичний чи економічний період.

Розбудова водневої економіки в Україні має стратегічне значення як для національної енергетичної безпеки, так і для інтеграції з Європейським Союзом. Для цього необхідно реалізувати державну стратегію, залучити інвестиції та впровадити інноваційні технології.

Воднева економіка має потенціал генерувати численні синергетичні ефекти, які виникають завдяки взаємодії різних галузей, секторів економіки та інноваційних технологій (додаток 3).

Розвиток водневої економіки мультиплікативно стимулює низку суміжних галузей – від інфраструктури до IT-сфери. Міжгалузевий вплив водневій економіці виступає каталізатором для трансформації таких секторів, як транспорт, промисловість, енергетика, аграрна галузь. Україна може стати ключовим гравцем на європейському ринку водню завдяки своєму географічному положенню, ресурсам та енергетичному потенціалу. Воднева економіка створює фундамент для сталого розвитку країни, її енергетичної незалежності та інтеграції у глобальні ринки.

Взаємозв'язок складових водневої економіки можна описати як скоординовану екосистему, де кожен компонент взаємодіє з іншими, формуючи єдиний процес циклу повноцінного відтворення водню за логікою взаємодії його етапів: Виробництво водню → Зберігання → Транспортування → Споживання. В такій екосистемі інновації впливають на всі етапи (підвищення ефективності). Регуляторна база є «рамкою» для підтримки інвестицій та екологічного переходу. Екологічний та соціальний вплив є результатом ефективної взаємодії всіх складових. Цей зв'язок формує замкнений цикл, де кожна складова підтримує та підсилює іншу, створюючи інтегровану систему.

Воднева екосистема – це інтегрована система елементів, що охоплює виробництво, зберігання, транспортування, споживання водню, а також підтримуючу інфраструктуру, технології, регуляторні та соціальні механізми. Основна мета водневої екосистеми – створення замкнутого циклу виробництва і використання водню для енергетичної незалежності, декарбонізації та сталого розвитку.

1.3. Формування національної моделі водневої економіки з урахуванням міжнародних стратегічних ініціатив

Зростання екологічної свідомості та глобальні виклики кліматичних змін зумовлюють переосмислення підходів до енергетичної політики. У цьому контексті воднева економіка розглядається як перспективний інструмент декарбонізації та сталого розвитку. Для України це відкриває нові можливості інтеграції у європейський енергетичний простір та залучення міжнародних партнерств.

У світовій практиці розвитку водневої економіки виокремлюють три основні моделі. Перша – модель повного циклу, яка охоплює повне виробництво, зберігання, транспортування та споживання водню всередині країни. Вона характерна для держав із потужним потенціалом відновлюваної енергетики, таких як США, Китай та Австралія. Друга – модель експортера, що зосереджується на виробництві «зеленого» водню для зовнішніх ринків, переважно до країн з енергетичним дефіцитом; її дотримуються Чилі, Марокко та ОАЕ. Третя – модель імпортера, яка передбачає імпорт водню для потреб внутрішньої декарбонізації та енергетичної безпеки; її застосовують Японія, Південна Корея та більшість країн ЄС. Залежно від національних умов та цілей країни можуть комбінувати елементи різних моделей.

При формуванні національної моделі водневої економіки в Україні доцільно, на наше глибоке переконання, врахувати міжнародні ініціативи та вітчизняні особливості суспільної трансформації в сучасних умовах глобальних викликів та забезпечення стратегічного партнерства за пріоритетами європейської інтеграції.

Основу міжнародного кліматичного співробітництва заклала Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (UNFCCC, 1992), яка зобов'язала держави стабілізувати рівень парникових газів в атмосфері. На її базі було ухвалено Кіотський протокол (1997) – перший юридично обов'язковий документ щодо скорочення викидів, а також Паризьку угоду (2015), яка визначила глобальну мету утримання зростання температури в межах 2°C і стимулювала перехід до низьковуглецевих технологій. Хоча воднева економіка прямо не згадується, вона є логічною складовою політик декарбонізації. Паризька угода

відкрила нові можливості для розвитку чистих енергоносіїв, зокрема «зеленого» водню, як елементу стратегії кліматичної нейтральності до 2050 року [78; 79; 80; 81; 82].

Паризька угода замінила Кіотський протокол і стала головним міжнародним механізмом боротьби зі зміною клімату. Україна активно працює над виконанням своїх зобов'язань, зокрема через розвиток водневої енергетики та відновлюваних джерел енергії. Воднева енергетика розглядається як ключовий елемент декарбонізації, особливо у промисловості та транспорті.

Кліматична нейтральність досягається шляхом скорочення викидів парникових газів, що називається пом'якшенням зміни клімату (mitigation). Для цього впроваджуються ВДЕ, підвищується енергоефективність, здійснюється перехід на електромобілі, «зелене» паливо та технології вловлювання вуглецю. Воднева інфраструктура сприяє виконанню цілей Паризької угоди щодо чистої енергетики. Відповідно до оцінок UNFCCC, до 2050 року країни мають досягти кліматичної нейтральності, а надалі – припинити викиди. Паралельно впроваджуються адаптаційні заходи, спрямовані на реагування на наслідки зміни клімату.

Ще однією глобальною рамкою, яка закріплює певний набір маркерів «зеленості» проекту та індикаторів прогресу імплементації цих маркерів на додаток до Паризької угоди, є Цілі сталого розвитку ООН (ЦСР ООН).

Одночасно з приєднанням до Паризької угоди Україна стала частиною і глобального процесу забезпечення сталого розвитку, відповідно до нових орієнтирів розвитку, закріплених у документі «Перетворення нашого світу: порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року» (Agenda 2030), ініційованого Самітом ООН у 2015 році. Глобальна стратегія сталого розвитку (2030 Agenda for Sustainable Development) [83] була прийнята Генеральною Асамблеєю ООН 25 вересня 2015 року.

Agenda 2030 визначає 17 Цілей сталого розвитку (ЦСР) та 169 завдань для забезпечення сталого розвитку в економічній, екологічній та соціальній сферах. 17 Цілей сталого розвитку - ЦСР (Sustainable Development Goals, SDGs) [84] охоплюють такі сфери: подолання бідності; ліквідація голоду; міцне здоров'я та благополуччя; якісна освіта; гендерна рівність; чиста вода та санітарія; доступна та чиста енергія; гідна праця та економічне зростання; інновації та інфраструктура; зменшення нерівності; сталий

розвиток міст; відповідальне споживання та виробництво; боротьба зі зміною клімату; охорона морських екосистем; охорона наземних екосистем; мир, справедливість та сильні інститути; партнерство заради стійкого розвитку.

Agenda 2030 в контексті розбудови водневої економіки відповідає Цілі 7 (Чиста енергія) та Цілі 13 (Боротьба зі зміною клімату) за стратегічним пріоритетом використання зеленого водню для декарбонізації промисловості та транспорту.

Для встановлення стратегічних рамок національного розвитку України на період до 2030 року було започатковано інклюзивний процес адаптації ЦСР. Кожну глобальну ціль було розглянуто з урахуванням специфіки національного розвитку. Протягом 2016-го року в Україні було проведено низку національних (4) та регіональних (10) консультацій. За результатами консультацій було прийнято рішення, що національні ЦСР слугуватимуть основою для інтеграції зусиль, спрямованих на забезпечення економічного зростання, соціальної справедливості та раціонального природокористування. У 2019 році Президент України ухвалив Указ про 17 Цілей сталого розвитку [85], інтегрувавши їх у державну політику як основу для досягнення сталого економічного та соціального розвитку для всіх українців. В Україні Національна стратегія сталого розвитку до 2030 року враховує цілі ООН. Пріоритети охоплюють спектр таких стратегічних орієнтирів як зелена економіка, енергетична незалежність, цифровізація, євроінтеграція, які сприятимуть розвитку відновлюваної енергетики, зокрема водневої економіки, а такою відновленню після війни відповідно до принципів сталого розвитку.

Таким чином, Agenda 2030 – це глобальна стратегія сталого розвитку, яку підтримує Україна, інтегруючи її принципи у свої екологічні та економічні реформи.

Серед ключових гравців розвитку водневої економіки важливу роль відіграють міжнародні організації. Міжнародне енергетичне агентство (IEA) розробляє стратегії декарбонізації, координує дослідження та публікує аналітичні огляди, такі як *Global Hydrogen Review* та *Net Zero Roadmap*; з 2022 року Україна є його асоційованим членом. Міжнародне партнерство з водневої економіки (IPHE) об'єднує уряди, науку та бізнес задля уніфікації стандартів і підтримки інновацій. Global Hydrogen Alliance сприяє розвитку водневих проєктів, обміну технологіями та формуванню глобальної інфраструктури [86; 87; 88].

Міжнародні стратегічні документи включають в себе угоди, ініціативи та програми, що формують основні глобальні підходи до боротьби зі зміною клімату, сталого розвитку, розвитку відновлюваних джерел енергії та водневої економіки. Вони мають на меті зменшення викидів парникових газів, розвиток чистих технологій та створення глобальних стандартів для енергетичних та екологічних ініціатив.

В результаті дослідження нами міжнародних ініціатив було виявлено низку міжнародних стратегічних документів, які мають значення для сталого розвитку, клімату, енергетики та водневої економіки (додаток І).

Таким чином, поступовий перехід від традиційних джерел енергії до альтернативних, зниження ризиків, пов'язаних з негативними наслідками зміни клімату та забезпечення цілей сталого розвитку є доволі актуальним питанням для України, особливо у контексті розвитку міжнародного співробітництва у сфері альтернативної енергетики і впровадженні політики низьковуглецевого розвитку.

Європейський Союз вже більш як 30 років активно долучається до міжнародних ініціатив щодо зменшення викидів парникових газів, в тому числі за рахунок використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), тобто до побудови низьковуглецевої економіки. Поглиблюючи інтеграційні процеси, ЄС затвердив модель управління, побудовану на співробітництві, інтеграції та поширенні спільних норм та законів. Відповідно до Лісабонського договору про реформування ЄС, який було підписано 13 грудня 2007 року (Португалія, м. Лісабон) та набув чинності 1 грудня 2009 року, енергетика вперше була введена в законодавчу базу ЄС. Її було визначено як тему спільної компетенції між країнами-членами та ЄС в цілому.

З 2009 року і до появи сучасного Європейського зеленого курсу, основою кліматичної політики ЄС був «Пакет з енергетики та клімату 2020», який встановлював ціль «20-20-20» та передбачав скорочення викидів ПГ на 20% по відношенню до 1990 року, генерацію 20% енергії з ВДЕ та підвищення рівня енергоефективності на ті ж 20%. Основними інструментами для досягнення цих цілей були: а) система торгівлі викидами (СТВ), яка була запроваджена у 2005 році й застосовується до енергетичного, промислового та авіаційного секторів економіки; б) національні цілі для інших секторів, які не увійшли до СТВ (інші типи промисловості, будівель та транспортний сектор,

сільське господарство); в) національні цілі з відновлювальних джерел енергії (ВДЕ); г) різні програми з фінансування розвитку ВДЕ та інших передових вуглецево-нейтральних технологій (наприклад, Horizon 2020).

У 2019–2020 роках Європейська Комісія представила три ключові стратегії, спрямовані на підвищення ресурсоефективності та досягнення кліматичної нейтральності. Європейський зелений курс має на меті трансформувати ЄС у перший кліматично нейтральний континент до 2050 року. Стратегія інтеграції енергетичних систем передбачає створення єдиної енергосистеми з акцентом на електрифікацію та використання місцевих джерел енергії. Воднева стратегія ЄС орієнтована на впровадження водню у важко електрифіковані сектори для зниження викидів CO₂ у промисловості, транспорті, енергетиці та будівництві. У грудні 2019 року Європейська комісія прийняла масштабну програму дій під назвою «Європейський зелений курс» (European Green Deal, EGD – комюніке ЄС та дорожньої карти з планом дій і термінами виконання) [89].

Європейський зелений курс (EGD) є логічним продовженням стратегічних програм розвитку ЄС, таких як «Європа-2020» та «Європа-2030». Програма «Європа-2020» (Europe 2020) [90], яка діяла з 2010 до 2020 року, була стратегічною ініціативою ЄС, спрямованою на: сталий розвиток – зменшення викидів CO₂, енергоефективність, розвиток ВДЕ; інновації та економічне зростання – підтримка високотехнологічних секторів; зайнятість та соціальну інклюзію – створення "зеленої" економіки та робочих місць. EGD продовжує ці ініціативи, але з більш амбітними цілями – досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

Згідно з Європейською зеленою угодою, воднева енергетика має бути головним компонентом енергетичної системи ЄС з 2025-2030 роки, а в перспективі і до 2050 року [91] (рис. 1.5). В той же час, встановлена потужність електролізних установок має зрости щонайменше до 30 ГВт та 340 ГВт відповідно, згідно з технічними умовами.

Стратегія розвитку «Європа-2030» (EU 2030 Strategy) визначає проміжні цілі для досягнення повної декарбонізації до 2050 року. Основні напрями: скорочення викидів CO₂ на 55% до 2030 року (пакет Fit for 55); розширення частки ВДЕ до 42,5% у загальному енергобалансі; енергоефективність: скорочення споживання енергії на 11,7%;

декарбонізація транспорту – перехід на електромобілі, розвиток водневих технологій. Європейський зелений курс підтримує ці цілі шляхом впровадження нових законодавчих ініціатив, фінансування та інновацій.

Європейська зелена угода (EGD) є поточною стратегією зростання Європейського Союзу, яка встановлює політичні цілі та інструменти для досягнення економічного зростання на рівні ЄС, надає центральний пріоритет екологічним проблемам. Її метою є прискорення та підтримка переходу до економічної моделі, яка захистила б як природний капітал ЄС, так і європейських громадян, і цю мету називають «зеленим переходом». EGD як стратегічний план ЄС спрямований на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року передбачає комплекс заходів у сфері енергетики, транспорту, промисловості, сільського господарства та екології, що відображено поетапно у Дорожній карті (додаток К).

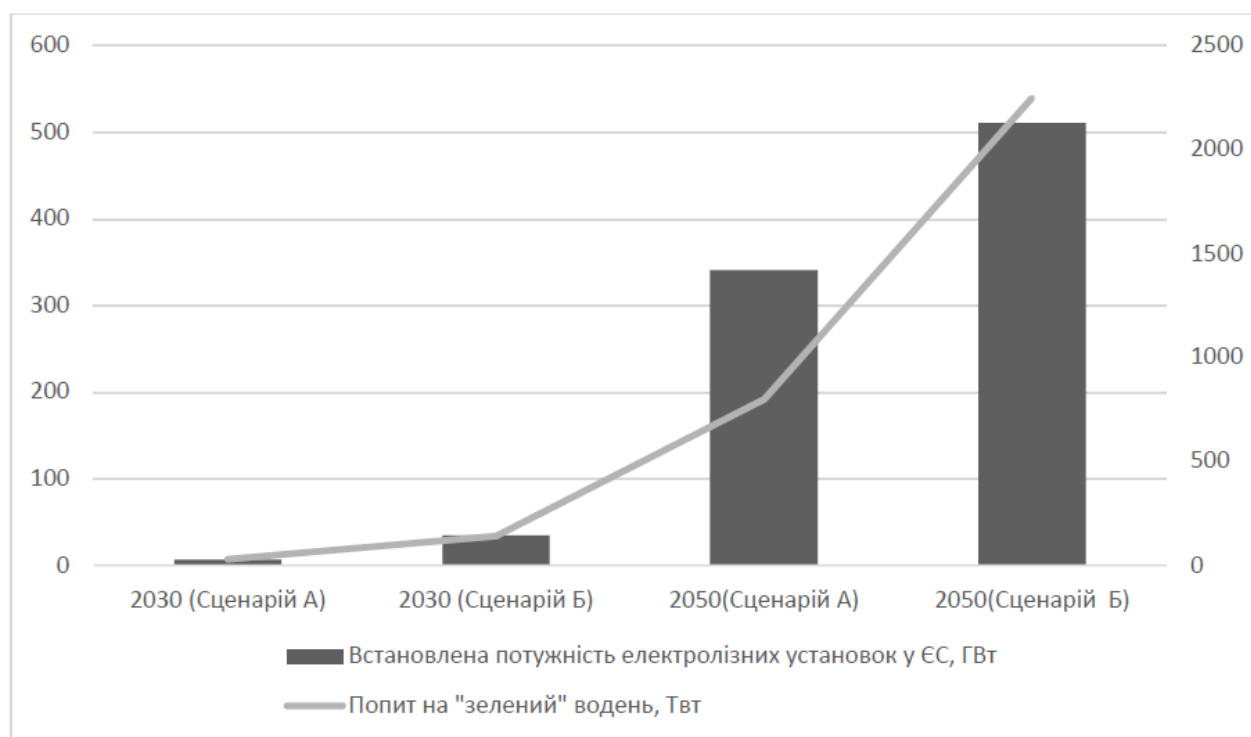


Рис. 1.5. Прогноз попиту на «зелений» водень у ЄС на 2030 та 2050 рр.

Дорожня карта Європейської зеленої угоди визначає комплекс дій у різних сферах політики, починаючи від кліматичної політики до промислової політики та захисту біорізноманіття. Реалізація комплексу заходів передбачає наступні засоби фінансування та підтримки: фонд справедливихого переходу – 100 млрд. євро для допомоги регіонам, які

залежать від викопного палива; програми на період 2021–2027 років HorizonEurope [92] та InvestEU [93] – фінансування досліджень, інновацій та зелених технологій (з бюджетом у 95,5 мільярдів євро); інвестування інновацій (372 мільярдів євро) на створення робочих місць, на проекти зеленого та цифрового переходу; збільшення вуглецевих податків та розширення ринку квот на викиди.

Таким чином, Європейський зелений курс є продовженням стратегій «Європа-2020» та «Європа-2030» і спрямований на досягнення кліматичної нейтральності через розвиток чистої енергетики, включаючи водневу економіку. Водень стане одним із ключових енергоресурсів, що замінить викопне паливо у важкій промисловості та транспорті. Стратегія EGD спрямована на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, що включає заходи щодо скорочення викидів парникових газів, підвищення енергоефективності та переходу на відновлювані джерела енергії. European Green Deal – це наймасштабніша екологічна та економічна реформа в історії ЄС (додаток Л). Вона вимагає активної участі урядів, бізнесу та громадян, спрямована на створення сталої економіки та боротьбу зі змінами клімату.

Воднева економіка є важливим елементом European Green Deal, сприяючи декарбонізації та екологічній трансформації Європи. Концептуально воднева економіка передбачає використання водню як основного джерела енергії в промисловості, транспорті та енергетиці. Водень може замінити викопні види палива та допомогти скоротити викиди CO₂. ЄС активно розвиває зелений водень (отриманий з води за допомогою електролізу на основі відновлюваної енергії) як ключовий елемент енергетичного переходу.

З метою привернення уваги до водню та популяризації цього енергоресурсу, в липні 2020 року Єврокомісія, у рамках Європейського зеленого курсу, ініціювала створення двох документів: Стратегії інтеграції енергетичної системи (EU Energy System Integration Strategy) та Водневої стратегії.

Європейська стратегія інтеграції енергетичної системи (EU Energy System Integration Strategy) є ключовою ініціативою в рамках Європейського зеленого курсу, спрямованою на створення більш ефективної та взаємопов'язаної енергетичної системи для досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року [94]. Цей стратегічний документ

покликаний посилювати рух до кліматично нейтральної економіки, включаючи конкретну політику та законодавчі заходи на рівні ЄС для переходу до більш інтегрованої та гнучкої енергетичної системи, що базується на вільному обміні між споживачами і виробниками в різних секторах кінцевого споживання. Інтеграція енергетичної системи підтримує енергетичний перехід, створюючи більш взаємопов'язану та скоординовану енергетичну мережу, яка краще використовує відновлювані ресурси та підвищує ефективність. Стратегія інтеграції енергетичної системи передбачає підвищення прямої електрифікації кінцевих секторів та використання різних існуючих і нових технологій, процесів та бізнес-моделей, таких як ІКТ та цифровізація, розумні мережі та лічильники, а також ринки гнучкості. Гнучка та децентралізована енергетична система, що ґрунтується на інтеграції енергетичних систем, щоб плавно поглинати додаткову генерацію відновлюваної енергії та досягати цілей ЄС щодо декарбонізації (додаток Л).

Воднева стратегія ЄС передбачає широке використання водню як енергоносія для галузей, які не можна електрифікувати, надаючи пріоритетність «зеленому» водню, та містить більш конкретний погляд на необхідні кроки задля перетворення водню на ключовий товар такої енергосистеми.

Для реалізації цієї стратегії Європейська Комісія 8 липня 2020 року створила Європейський альянс з чистого водню (European Clean Hydrogen Alliance) [95]. Його метою є сприяння розвитку водневої енергетики в Європі та досягненню кліматичної нейтральності до 2050 року. Альянс об'єднує національні та місцеві органи влади, громадянське суспільство, бізнес та інші зацікавлені сторони для реалізації нової європейської водневої стратегії.

Воднева стратегія ЄС (EU HydrogenStrategy) [96] була офіційно прийнята 8 липня 2020 року Європейською Комісією. Ця стратегія є ключовою частиною Європейського зеленого курсу, спрямованою на досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Вона має на меті розвиток чистого водню як ключового елемента декарбонізації економіки ЄС, передбачає поступовий розвиток виробництва та використання відновлюваного водню в енергетичній системі ЄС (табл. 1.3.).

Таблиця 1.3.

Реалізація Водневої стратегії Європейського Союзу

Роки	Стратегічні пріоритети
2020–2024 рр.	Встановлення електролізерів чистого водню потужністю 6 ГВт. Виробництво 1 млн тонн відновлюваного водню. Декарбонізація наявного виробництва водню з викопних джерел.
2025–2030 рр.	Інтеграція водню в енергетичну систему ЄС. Встановлення додаткових 40 ГВт електролізерів. Виробництво 10 млн тонн відновлюваного водню.
2030–2050 рр.	Масштабне використання відновлюваного водню в усіх секторах економіки. Створення самодостатньої та розповсюджені водневої економіки.

Джерело: складено автором на основі [97]

Європейська воднева стратегія, прийнята у липні 2020 року, визначає Україну як пріоритетного партнера для співпраці у сфері водневої енергетики. Серед українських учасників Альянсу — Міністерство енергетики України, НАК «Нафтогаз України», ДП «НАЕК «Енергоатом», Оператор Газо-транспортної системи (ГТС) України та Держенергоефективності. Їхня участь сприяє інтеграції України в європейський водневий ринок та розвитку спільних проєктів у сфері чистої енергетики.

Ключовою платформою для розвитку водневої економіки в Європі визначена діяльність організації Hydrogen Europe [98] як провідна європейська асоціація представляє інтереси понад 600 компаній та зацікавлених сторін, що прагнуть досягти нульових викидів шляхом впровадження водневих технологій. Організація активно сприяє розвитку водневої економіки в Європі, співпрацюючи з промисловістю, науковими установами та державними органами. Hydrogen Europe Research об'єднує провідні університети та дослідницькі організації для формування сталого майбутнього, заснованого на водневих технологіях. Вони зосереджені на просуванні наукових досліджень та інновацій у сфері водню, підтримуючи перехід до безвуглецевого суспільства. Щорічно організація проводить Європейський водневий тиждень, який збирає ключових гравців галузі для обговорення досягнень та майбутніх перспектив водневої енергетики. У 2024 році цей захід відбувся з 18 по 22 листопада, приділяючи особливу увагу дослідженням та інноваціям у водневій сфері.

Організацією Hydrogen Europe у березні 2020 року була офіційно представлена Ініціатива «2×40 ГВт» [99] як частина Європейської водневої стратегії, що спрямована на масштабне розширення виробництва відновлюваного водню (зеленого водню) в Європі

та сусідніх країнах, зокрема в Україні та Північній Африці. Україна визначена як ключовий партнер для виробництва та експорту відновлюваного водню до ЄС. Україна також розглядається як країна, яка може використовувати газову інфраструктуру для транспортування водню в Європу. Згідно з ініціативою «2×40 ГВт», Україна планує встановити 8 ГВт електролізерних потужностей для виробництва зеленого водню та 1,8 ГВт для аміаку до 2030 року [100]. У відповідь на ці плани, Міністерство енергетики України розробило проєкт Водневої стратегії до 2050 року [101], який передбачає виробництво до 1,3 млн тонн водню у 2035 році та до 3 млн тонн у 2050 році. Цей документ також акцентує увагу на можливості експорту водню до Європейського Союзу.

Країни Євросоюзу вже зробили перші кроки до переходу на альтернативну енергію. У 2021 році, в рамках ЄЗК, Єврокомісія запропонувала додатковий пакет законодавчих ініціатив – пакет «Fit for 55» [102], що закріпив більш широкий спектр цілей з питань клімату й енергетики для країн-членів ЄС (додаток М).

Пакет «Fit for 55» включає проєкти законодавства ЄС у галузі клімату та енергетики, які підкріплюють політичне зобов'язання блоку скоротити викиди парникових газів не менше ніж на 55% у 2030 році порівняно з рівнями 1990 року та досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Основні компоненти пакета «Fit for 55» наступні: 1) реформа системи торгівлі викидами (EU ETS) – включення нових секторів, скорочення безкоштовних квот та поступове підвищення цін на викиди CO₂; 2) механізм вуглецевого коригування імпорту (CBAM) – введення «вуглецевого мита» на імпорт енергоємної продукції (сталь, цемент, добрива, алюміній тощо); 3) посилення вимог щодо відновлюваної енергетики (Директива RED III) – підвищення частки ВДЕ в енергобалансі ЄС; 4) заборона продажу нових авто з ДВЗ з 2035 року – перехід на електромобілі та водневі авто; 5) енергетична ефективність (Директива EED) – підвищення вимог до економії енергії у будівлях та промисловості; 6) розвиток водневої інфраструктури – стимулювання виробництва та використання відновлюваного водню.

У відповідь на воєнну агресію росії проти України і, як наслідок, енергетичну кризу, Єврокомісія доповнила своє кліматичне регулювання планом RePowerEU [103], який спрямований на швидке зменшення залежності Європейського Союзу від російських викопних видів палива та прискорення переходу до чистої енергії. План

ставить за мету повністю позбутись залежності ЄС від російського газу до 2027 року та базується на трьох основних елементах: енергозбереженні, збільшенні виробництва чистої енергії (ВДЕ) й диверсифікації постачання природного газу. На противагу побоюванням певних стейкхолдерів, що викиди ПГ через таке рішення можуть зрости внаслідок заміни природного газу вугіллям, ЄС обрав шлях повної відмови від викопного палива росії через: створення центральної агенції, відповідальної за координацію закупівель природного газу; покращення екологічних практик; посилення рамок та цілей ЄЗК, амбіцій пакету «Fit for 55» та похідних від них стратегій, планів і проєктів.

У межах зусиль ЄС щодо досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року та диверсифікації енергетичних джерел у 2022 році було ініційовано створення Європейського водневого банку (ЄВБ). Цей інструмент, представлений президенткою Єврокомісії Урсулою фон дер Ляєн, має на меті стимулювати розвиток повного ланцюга вартості відновлюваного водню. ЄВБ спрямований на створення інвестиційних умов для виробників у ЄС і поза його межами. Серед ключових цілей — підтримка внутрішнього виробництва через аукціони (перший із бюджетом 800 млн євро стартував у листопаді 2023 року) та сприяння імпорту водню через міжнародні партнерства і фінансові стимули [104].

ЄВБ не є фізичною установою, а функціонує як фінансовий інструмент, керований службами Європейської комісії. Його діяльність базується на чотирьох основних напрямках: підтримка внутрішнього виробництва, сприяння імпорту, розвиток інфраструктури та створення ринкових умов для відновлюваного водню.

Європейськими країнами було оприлюднено щонайменше 11 аукціонних схем підтримки, які передбачають стимули для постачання відновлюваного та низьковуглецевого водню та після їх успішної реалізації можуть забезпечити до 2,5 ГВт потужності електролізерів до 2025 року.

Спільно з консорціумом великих європейських газотранспортних компаній, з метою адаптації інфраструктури природного газу для транспортування водню, ЄС започатковано ініціативу Європейської водневої магістральної мережі (European Hydrogen Backbone, ЕНВ) [105], яка була офіційно оголошеною у 2020 році. Мережа була представлена групою європейських операторів газової інфраструктури як ініціатива для

створення єдиної системи водневих трубопроводів, яка повинна забезпечити транспортування відновлюваного водню по всій Європі.

Ініціатива European Hydrogen Backbone (ЕНВ) передбачає створення розгалуженої водневої інфраструктури для підтримки енергетичного переходу в Європі. Планується розбудова понад 40 000 км трубопроводів, які охоплять ключові промислові регіони ЄС та 11 нових країн. Частина мережі буде інтегровано з існуючими газопроводами, що дозволить знизити витрати й пришвидшити реалізацію. Проєкт спрямований на розвиток ринку відновлюваного водню, забезпечуючи його ефективне транспортування до споживачів – від промисловості до енергетичного сектору.

Метою Європейської водневої магістральної мережі є забезпечення ефективного транспортування відновлюваного водню від виробників до споживачів, включаючи промислові підприємства та енергетичні станції, що сприятиме досягненню кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року. ЕНВ об'єднує операторів енергетичної інфраструктури з метою створення єдиної мережі водневих трубопроводів по всій Європі, охоплює більше 30 країн Європи, серед яких: Німеччина, Франція, Італія, Іспанія, Нідерланди, Польща, Бельгія, Австрія, Швеція, Данія, Фінляндія та інші. ЕНВ передбачає, що до 2040 року довжина мережі становитиме 53 тисячі кілометрів із 60 відсотків перепрофільованих газових трубопроводів і 40 відсотків нових трубопроводів (додаток Н).

В результаті проведеного нами дослідження виявлено широкий спектр європейських ініціатив, які формують кліматичну, енергетичну та економічну політику ЄС, а також підтримують перехід до сталого розвитку та водневої економіки. Основні стратегічно важливі документи систематизовано та представлено в додатку П.

Україна активно бере участь у міжнародних ініціативах, спрямованих на боротьбу зі зміною клімату. Україна підписала Рамкову конвенцію ООН про зміну клімату (РКЗК ООН) у червні 1992 року та ратифікувала її 29 жовтня 1996 року. Конвенція набула чинності для України 11 серпня 1997 року. Україна ратифікувала Кіотський протокол, взявши на себе зобов'язання щодо обмеження та зменшення викидів. Україна підписала Паризьку угоду 22 квітня 2016 року в штаб-квартирі ООН у Нью-Йорку, а ратифікувала її 14 липня 2016 року. У липні 2021 року Україна подала до секретаріату РКЗК ООН оновлений Національно визначений внесок до Паризької угоди, демонструючи свою

прихильність до міжнародних зусиль у боротьбі зі зміною клімату. У вересні 2015 року всі 193 члени ООН, включаючи Україну, ухвалили «Порядок денний 2030», який містить 17 Цілей сталого розвитку (ЦСР). Цілі спрямовані на подолання бідності, боротьбу з нерівністю, захист планети та забезпечення процвітання для всіх. Україна взяла на себе зобов'язання впроваджувати цілі на національному рівні. Такі кроки свідчать про активну участь України в глобальних ініціативах, спрямованих на протидію зміні клімату та зменшення викидів парникових газів.

Україна активно співпрацює з ЄС у питаннях водневої економіки, зокрема через участь у спільних ініціативах та інтеграцію своєї інфраструктури у водневі проєкти ЄС. Україна має потенціал стати важливим експортером зеленого водню завдяки своїм природним ресурсам і розвинутій газотранспортній системі (додаток Р). Синхронізуючи свою політику з ЄС, Україна має намір досягти кліматичної нейтральності до 2060 року.

Уряд України активно займається налагодженням співпраці з міжнародними партнерами задля розвитку виробництва водню в Україні.

За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності), на теперішній час Україна співпрацює з такими іноземними партнерами: Європейська Комісія (ЕК), Організація економічного співробітництва та розвитку (OECD), Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики (IRENA), Австрійське енергетичне агентство (AEA), Міжнародне енергетично агентство (IEA), Німецька урядова компанія Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Секретаріат Енергетичної Хартії, Німецьке енергетичне агентство (DENA), Французьке агентство з питань довкілля та енергоуправління (ADEME), Словацьке інноваційне енергетичне агентство (CIEA), Агентство США з міжнародного розвитку (USAID), Програма розвитку ООН (ПРООН), Організація Об'єднаних Націй з промислового розвитку (ЮНІДО), Українсько-Данський енергетичний центр (УДЕЦ) та Данське агентство міжнародного розвитку (ДАНІДА).

З метою сприяння розвитку сфери альтернативних джерел енергії та сфери енергоефективності, Державним агентством з енергоефективності та енергозбереження було підписано «Меморандуми про взаєморозуміння у сферах енергоефективності, відновлюваної енергетики та альтернативних видів палива» з наступними партнерами: з

Міністерством енергетики та промисловості Об'єднаних Арабських Еміратів, з Австрійським енергетичним Агентством, з Міністерством енергетики, торгівлі, промисловості та туризму Республіки Кіпр, з Міністерством закордонних справ Фінляндської Республіки, з Датським енергетичним агентством, з Національною енергетичною адміністрацією Китайської Народної Республіки, з Фондом з енергоефективності Республіки Молдова, з Національним директором енергетики та геології Португалії, з Міністерством охорони довкілля та енергетики Республіки Хорватія, а також було підписано Меморандум про співробітництво у сферах енергоефективності, енергозбереження та відновлюваної енергетики між Держенергоефективності та Словацьким інноваційним енергетичним агентством (СІЕА).

Необхідність забезпечення енергетичної безпеки держави, незворотне виснаження світових вуглеводневих запасів, зростаюча ціна на енергоносії, проблеми екологічного забруднення навколишнього середовища змушують більшість розвинутих країн формувати свої енергетичні стратегії, спрямовані на розвиток альтернативної енергетики.

Україна активно розробляє стратегічні документи для розвитку водневої економіки, враховуючи глобальні тенденції та власний потенціал у цій сфері (табл.1.4.). Стратегічні документи та ініціативи свідчать про прагнення України інтегруватися у європейський водневий ринок, сприяти розвитку відновлюваної енергетики та водневої економіки.

В Україні Воднева стратегія поки що на стадії розробки, проте «Енергетична стратегія», «Національна транспортна стратегія», «Концепція розвитку водневої енергетики» та «Дорожня карта широкого впровадження водневої енергетики в Україні» представляють міцну стратегічну основу для політики, спрямованої на збільшення частки відновлюваних джерел енергії в транспорті на основі біопалива, електроенергії і водню. В нашій державі «Енергетичною стратегією України до 2035р.» визначено, що освоєння альтернативних джерел енергії слід розглядати як важливий фактор підвищення рівня енергетичної безпеки [106].

«Національна транспортна стратегія України до 2030 року» [107] спрямована на створення інтегрованої, безпечної та ефективної транспортної системи, яка відповідає сучасним вимогам та сприяє економічному розвитку країни. Хоча в цьому документі

безпосередньо не згадується розвиток водневої економіки, впровадження водневих технологій у транспортному секторі є важливим напрямом для досягнення екологічних цілей та підвищення енергоефективності.

Таблиця 1.4.

Стратегічні документи України щодо розбудови водневої економіки

Назва документа	Дата прийняття	Основні положення	Міжнародний контекст
Енергетична стратегія до 2035	2017	Перехід на ВДЕ, розвиток водневої енергетики	Паризька угода, Зелений курс ЄС
Концепція розвитку водневої енергетики	2021	Напрями виробництва, транспортування, споживання водню	Співпраця з ЄС
Меморандум про Центрально-Європейський водневий коридор	2024	Транзит водню з України до ЄС	ГТС Словаччини, Чехії, Австрії, Німеччини
Воднева стратегія до 2050 (проект)	2024	Дорожня карта, пріоритети та інструменти	EU Hydrogen Strategy, REPowerEU
Національний план водневої економіки	очікується у 2025	Законодавча база, інвестиції, кластери	Європейська воднева дорожня карта

Джерело: систематизовано автором

2021 рік став початком активної роботи над формуванням концепції та стратегії розвитку водневої енергетики в Україні [108]. У 2021 році в Україні було розпочато активну роботу над формуванням концепції розвитку водневої енергетики. У серпні 2021 року Міністерство енергетики України створило робочу групу для розробки Водневої стратегії, а Держенергоефективності було призначено координатором цього процесу. У жовтні 2021 року USAID спільно з Міненерго розробили рекомендації щодо Водневої стратегії України, що стало важливим кроком у напрямі створення національної стратегії розвитку водневої енергетики.

Серед стратегічних документів у сфері кліматичної політики, питання водневих технологій розглядаються у Стратегії низьковуглецевого розвитку до 2050 року, першу версію якої було прийнято протокольним рішенням уряду в липні 2018 року. Цей документ визначав стратегічні напрями переходу економіки на траєкторію низьковуглецевого зростання відповідно до національних пріоритетів та міжнародних зобов'язань. Так, у Стратегії згадується промислове виробництво та використання водню серед політики впровадження інноваційних технологій в енергетиці, а також

стимулювання використання транспортних засобів, що можуть працювати на альтернативних видах моторного палива, зокрема на водні та водневих паливних елементах. У 2024 році, враховуючи нові виклики та цілі, Україна представила оновлену версію Стратегії. Цей документ повністю відповідає кліматичним цілям Європейського Союзу та Паризькій угоді. Він враховує виклики, пов'язані з війною, та визначає нові підходи до відновлення економіки та інфраструктури України. Стратегія також включає актуальні політики, заходи та інструменти для забезпечення «зеленого» відновлення економіки [109].

У березні 2021 р. було представлено проєкти Дорожньої карти для виробництва та використання водню і в Україні [110] та Дорожньої карти використання водню в Україні в сфері дорожнього транспорту [111], які було розроблено за підтримки Європейської Економічної Комісії ООН в рамках проєкту «Посилення потенціалу уряду України для розвитку інфра- структури для виробництва та використання водню з метою підтримки зеленого відновлення після Covid-19». У проєкті Дорожньої карти для виробництва та використання водню наведено огляд найкращих міжнародних практик та водневих технологій, перспективних до застосування в Україні, а також представлено ризики та проблеми, що потребують розв'язання. У документі запропоновано розгортання водневих технологій у чотирьох напрямках, зокрема в енергетиці, промисловості, транспортному секторі, а також використання ГТС. Окрім того, окреслено найважливіші кроки та заходи на національному та локальному рівні, які необхідно втілити для стимулювання розвитку водневих технологій в країні. У документі наголошується, що виробництво саме «зеленого» водню має бути пріоритетним для України, тоді як інші технології доцільно розглядати лише на етапі перехідного періоду. Проєкт Дорожньої карти використання водню в Україні в сфері дорожнього транспорту включає аналіз найкращих міжнародних практик та планів використання водню у автотранспортному секторі з фокусом на міському громадському транспорті. У документі також наведено огляд релевантної законодавчої та нормативної бази та надано рекомендації уряду щодо розвитку водневих технологій у транспортному секторі, а також представлено політики та заходи, що мають стати частиною загальної «дорожньої карти» для виробництва та використання водню.

У лютому 2024 року Україна підписала Меморандум про взаєморозуміння щодо створення Центрально-Європейського водневого коридору [112]. Цей документ передбачає виробництво відновлюваного водню в Україні з використанням значного потенціалу відновлюваної енергетики країни. Водень буде транспортуватися через існуючу газотранспортну систему, частину якої планується перепрофілювати під водень, до Словаччини, Чехії, Австрії та Німеччини. Це забезпечить надійне та конкурентоспроможне постачання «зеленого» водню для регіону Центральної Європи після 2030 року.

«Воднева стратегія України на період до 2050 року» [113], проєкт якої оприлюднено у травні 2024 року визначає основні напрями використання водню в Україні, включаючи промисловість, електроенергетику, транспорт та інші сектори. Стратегія передбачає поетапний розвиток водневої економіки з акцентом на виробництво «зеленого» водню, отриманого з відновлюваних джерел енергії. Вона також окреслює цілі, пріоритети та завдання для інтеграції водневих технологій у національну економіку. Відповідно до проєкту Дорожньої карти, розбудову водневої економіки передбачається здійснити у три етапи, що ґрунтуються на чинній Енергетичній стратегії України до 2035 року. На першому етапі (2021-2023) планується проведення оцінки національної економіки щодо перспектив впровадження водневих технологій та запуск початкових проєктів, втілення «зеленого» енергетичного переходу та запуск водневої економіки. На другому етапі (2024-2026) передбачається впровадження пріоритетних політик та розвиток водневого ринку. Протягом третього етапу (2027-2029) очікується розвиток стратегічних водневих проєктів та подальше реформування нормативно-правової бази. Дорожня карта наголошує на важливості виробництва саме «зеленого» водню та окреслює кроки для стимулювання розвитку водневих технологій у країні.

Формування національної моделі водневої економіки України передбачає створення інтегрованої системи виробництва, транспортування, зберігання та використання водню з урахуванням міжнародного досвіду та європейських стратегічних ініціатив. Вона повинна бути спрямована на забезпечення енергетичної незалежності, скорочення викидів CO₂, розвиток інноваційних технологій та інтеграцію у водневий ринок ЄС (додаток С).

Україна активно готує Національний план розвитку водневої економіки як складову національної енергетичної стратегії. План передбачає визначення стратегічних цілей і пріоритетів, що охоплюють виробництво, зберігання, транспортування та використання водню. Особлива увага приділяється формуванню нормативно-правової бази для стимулювання розвитку інфраструктури та залучення інвестицій. План також включає створення інвестиційних механізмів, що поєднують державні ресурси, приватний капітал і міжнародну підтримку.

Реалізація вищезазначених стратегічних пріоритетів сприятиме інтеграції водневих технологій у національну економіку, підвищенню енергетичної безпеки та підтримці сталого розвитку України.

Висновки до першого розділу

Концепція водневої економіки сформувалась як відповідь на енергетичні та екологічні виклики. Вона інтегрує економічні, технологічні й екологічні аспекти розвитку енергетики. Її започаткував Джон Бокслон у 1970-х роках. Його ідеї стали основою подальших наукових досліджень.

Науковці трактують водневу економіку як інструмент сталого розвитку. Вона передбачає виробництво, зберігання та використання водню для декарбонізації. Українські дослідники адаптували світовий досвід до національних реалій. Вони вбачають у водневій економіці шлях до енергетичної безпеки.

Філософія В. Вернадського узгоджується з принципами водневої економіки. Його ідеї про ноосферу та екологічну відповідальність знаходять практичне втілення у водневих технологіях. Сучасні школи – технократична, екологічна, економічна – дають різні підходи до розуміння цього явища.

Воднева економіка пов'язана з енергетичним переходом, декарбонізацією та зеленою трансформацією. Вона може стати основою майбутнього енергетичного розвитку України.

Розбудова водневої економіки є комплексним процесом. Вона охоплює технологічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Водень виступає перспективним енергоносієм у глобальному енергетичному переході. Його фізико-хімічні властивості формують основу для широкого застосування. Він забезпечує високу енергоефективність та мінімальний екологічний вплив.

Становлення водневої економіки має наукові, історичні та геополітичні витоки. Світовий досвід свідчить про поступову зміну домінуючих джерел енергії. Сучасні виклики прискорили потребу у декарбонізації та диверсифікації енергопостачання. Розвиток водневих технологій підтримується урядами, бізнесом і наукою. Перші концепції водневої економіки були сформовані у 1970-х роках. Надалі ідеї еволюціонували до міждисциплінарної системи.

Воднева економіка базується на чотирьох етапах: виробництві, зберіганні, транспортуванні та споживанні. Її реалізація вимагає інфраструктури, інвестицій і нормативної бази. Ключовими складовими є електролізери, транспортна логістика, водневі долини та хаби. Різні види водню (зелений, синій, сірий) відрізняються за джерелами енергії та рівнем екологічності.

Передумови водневої економіки включають доступ до ВДЕ, наявність інфраструктури та підтримку інновацій. Детермінанти визначають темп і масштаби її впровадження. Серед них – вартість виробництва, регуляторна політика, інституційна спроможність. Синергетичні ефекти виникають на стику галузей. Вони стимулюють розвиток суміжних секторів і економічне зростання.

Україна має потенціал стати активним учасником водневого ринку. Її географія, науковий ресурс та співпраця з ЄС створюють умови для цього. Необхідними є державна стратегія, інвестиції та міжсекторальна координація.

Національна модель водневої економіки має враховувати міжнародні кліматичні угоди. Ключовими орієнтирами виступають Рамкова конвенція ООН, Кіотський протокол, Паризька угода та Agenda 2030. Ці документи сформували нормативну основу для декарбонізації економіки. Вони заклали глобальний вектор переходу до низьковуглецевих технологій.

Цілі сталого розвитку, зокрема ЦСР 7 і ЦСР 13, визначають пріоритети розвитку водневої енергетики. Україна адаптувала ці цілі до національного контексту. Вона інтегрувала принципи сталого розвитку у державну політику. Стратегія до 2030 року передбачає зелений перехід та енергетичну незалежність.

Європейський зелений курс визначає рамки екологічної трансформації. Водень посідає в ньому ключове місце. Стратегія передбачає розвиток інфраструктури, електролізерів та водневого транспорту. Документи Fit for 55, REPowerEU та Hydrogen Strategy конкретизують напрямки декарбонізації. Україна бере активну участь у цих процесах.

Україна обрана стратегічним партнером ЄС у сфері водню. Вона має відповідний ресурсний, технічний і транзитний потенціал. Україна інтегрується у європейський водневий простір через проекти Hydrogen Europe, ЕНВ, ініціативу «2×40 ГВт». Національна транспортна стратегія та Енергетична стратегія формують вітчизняне бачення енергетичного переходу.

В Україні формується нормативна й інституційна база водневої політики. Основні документи – Концепція розвитку водневої енергетики, Воднева стратегія до 2050 року, Національний план розвитку (у розробці). Вони встановлюють цілі, етапи реалізації, механізми підтримки та інвестиційні пріоритети.

Національна модель має поєднувати функції виробника, експортера і технологічного інтегратора. Україна здатна постачати «зелений» водень до ЄС через свою ГТС. Вона може створити кластери та долини для розвитку водневого бізнесу. Важливо забезпечити відповідність технічних стандартів, тарифної політики та нормативного регулювання.

Воднева економіка сприятиме зниженню викидів, модернізації інфраструктури та зміцненню енергетичної безпеки. Вона є частиною глобального зеленого переходу, який вимагає міжнародної координації, інвестицій та інновацій.

Основні результати розділу опубліковані в наукових працях: [114; 115; 116].

РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ, ПРОБЛЕМ ТА ПЕРСПЕКТИВ РОЗБУДОВИ ВОДНЕВОЇ ЕКОНОМІКИ В СВІТІ ТА УКРАЇНІ

2.1. Аналіз стану та ефективності розвитку водневої економіки в країнах світу

Світова економіка зазнає глибокої енергокризи, спричиненої війною в Україні, пандемією та іншими чинниками. Ці фактори викликали інфляцію, енергетичну бідність, уповільнення зростання економіки та переорієнтацію ринків енергоносіїв. У цих умовах зростає потреба у технологіях, що сприяють стійкості та декарбонізації енергетичного сектора [117]. Причини та наслідки енергокризи наведено в додатку Т.

Енергетична криза, спричинена сукупністю глобальних факторів – пандемією COVID-19, геополітичними конфліктами (зокрема війною в Україні), зниженням інвестицій у традиційну енергетику та кліматичною політикою – стала потужним викликом для світової економіки. Її наслідки включають інфляцію, сповільнення зростання, порушення постачання енергоносіїв і зростання вартості життя. Водночас криза активізувала перехід до відновлюваних джерел енергії та інноваційних технологій, спрямованих на енергетичну незалежність і декарбонізацію.

Енергетична криза, що розпочалася на початку 2020-х років, суттєво вплинула на світову економіку (додаток III). У 2020–2024 роках глобальна економіка пережила масштабні потрясіння, зумовлені пандемією, енергетичною кризою та геополітичними конфліктами. Після рецесії 2020 року спостерігалось часткове відновлення у 2021 році, однак уже в 2022–2023 роках темпи зростання знизилися. Інфляція досягла пікових значень у 2022 році через різке зростання цін на енергоносії. Рівень безробіття залишався нестабільним, особливо у країнах, залежних від імпорту енергії. Показники державного боргу у більшості країн зросли, зумовивши фіскальний тиск.

Сучасна трансформація міжнародних енергетичних ринків базується на перебудові паливно-енергетичного балансу, зміні світових центрів споживання вуглеводнів і енергії в цілому, безперервній хвилі технологічних проривів [118].

Світовий енергетичний баланс за останні три роки (2021–2023) зазнав значних змін, зокрема через глобальну енергетичну кризу, викликану геополітичними подіями, такими як війна в Україні [119]. Загальний огляд змін у глобальному енергетичному балансі, включаючи показники по споживанню, виробництву та викидам CO₂, а також інформацію про ціни на основні енергетичні ресурси, представлено в додатку ІІІ.

У 2021–2023 роках світове споживання первинної енергії поступово зростало, досягнувши 620 ексаджоулів у 2023 році. Попри часткове збільшення частки ВДЕ (до 12%), викопне паливо зберігає домінування в енергобалансі (понад 81%). Зростання споживання призвело до рекордного рівня викидів CO₂ – 40 гігатонн у 2023 році. Енергетична інтенсивність знижувалася повільніше, ніж у попередні роки, що ускладнює виконання кліматичних зобов'язань.

В результаті проведеного аналізу динаміки визначальних чинників світового енергетичного балансу за 2021–2023 роки нами визначено наступні висновки: збільшення попиту на енергію, зокрема внаслідок економічного відновлення, сприяло зростанню глобального споживання енергоресурсів; незважаючи на зростання частки відновлювальних джерел енергії, викопне паливо продовжує домінувати в енергетичному балансі, що збільшує викиди CO₂ і створює труднощі для досягнення кліматичних цілей; ціни на нафту і природний газ продовжують коливатися через глобальні політичні та економічні фактори, що робить енергетичні ринки нестабільними. Ці факти підкреслюють важливість прискорення переходу до відновлювальних джерел енергії та підвищення енергоефективності на глобальному рівні для забезпечення сталого розвитку в майбутньому.

Після значного зниження енергоспоживання у 2020 році, у 2021 році спостерігалось відновлення попиту на енергію, що призвело до зростання глобального енергоспоживання. Відновлення економіки сприяло підвищенню цін на нафту, газ та вугілля, що вплинуло на глобальні енергетичні ринки. Війна в Україні у 2022 році призвела до порушення постачання енергоносіїв, особливо природного газу та нафти, що

спричинило енергетичну кризу в Європі та інших регіонах. Через обмеження постачання та санкції проти Росії, ціни на енергоносії досягли рекордних рівнів, що вплинуло на глобальну економіку. У відповідь на кризу, багато країн посилили інвестиції у відновлювальні джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергетика. У 2023 році глобальне споживання первинної енергії досягло рекордного значення у 620 ексаджоулів (ЕДж), що на 2% більше порівняно з попереднім роком. Попри рекордне споживання викопного палива в абсолютних значеннях, його частка у загальному енергоспоживанні знизилася до 81,5% порівняно з 81,9% у 2022 році. Збільшене використання вугілля та нафти призвело до рекордного рівня викидів CO₂, які вперше перевищили 40 гігатонн CO₂ еквівалентів. Частка електроенергії в кінцевому споживанні становить 20,6%. Глобальна енергетична інтенсивність знизилася лише на 1%, що є нижчим за середній показник 2010–2019 років (-1,8% на рік) і недостатньо для досягнення цілей щодо обмеження глобального потепління.

За період 2021-2023 рр. виявлено такі основні тенденції: відновлення після пандемії COVID-19; зростання цін на енергоносії; глобальна енергетична криза; збільшення використання відновлювальних джерел енергії; рекордне споживання первинної енергії; зниження частки викопного палива; зростання викидів CO₂; стагнація частки електроенергії у кінцевому енергоспоживанні; зниження енергетичної інтенсивності. Тобто, фактичні дані свідчать про складні тенденції у світовому енергетичному балансі, зокрема про необхідність прискорення переходу до відновлювальних джерел енергії та зниження викидів парникових газів для досягнення кліматичних цілей.

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відіграють ключову роль у сучасній енергетиці, забезпечуючи сталий розвиток та зменшення викидів парникових газів. Використання ВДЕ для виробництва водню є перспективним напрямком, який активно розвивається як у Європейському Союзі (ЄС), так і в Україні [120]. Детальніший розподіл джерел енергії доцільно проаналізувати на основі дослідження відповідної структури енергетичного балансу (табл. 2.1.).

Таблиця 2.1.

Структура первинного енергетичного балансу у світі, ЄС та Україні, 2023 р., %

Джерело Енергії	Світовий баланс		ЄС		Україна	
	Mtoe*	Частка	Mtoe*	частка	Mtoe*	частка
Вугілля	3600	26%	500	14%	20	10%
Нафта	4200	30%	1,200	34%	30	15%
Природний газ	3500	25%	900	25%	40	20%
Відновлювані джерела:	1800	13%	800	23%	50	25%
- Сонячна енергетика (СЕС)	850	47%	300	38%	15	30%
- Вітрова енергетика (ВЕС)	750	42%	350	44%	20	40%
- Біоенергетика	120	6.5%	100	12%	10	20%
- Геотермальна енергетика	50	2.8%	30	3.8%	5	10%
- Припливна, хвильова Енергетика	30	1.7%	20	2.5%	-	-
Гідроенергетика	1100	8%	200	6%	30	15%
Ядерна енергетика	900	6%	400	11%	60	30%
Водень	20	0.13%	5	0.13%	1	0.5%
Разом	15100	100%	4,000	100%	200	100%

Джерело: складено автором на основі [121]

Примітка: *Мтоє (мільйон тонн нафтового еквіваленту) визначається як кількість енергії, яка виділяється при спалюванні одного мільйона тон нафти, що приблизно дорівнює 41,868 ГВт·год (гіга-ват годин).

Енергобаланси світу, ЄС і України суттєво відрізняються (2023). Світова економіка зберігає залежність від нафти, газу та вугілля, тоді як ЄС активно збільшує частку ВДЕ (особливо вітрової та сонячної енергетики). Україна, попри війну, демонструє високий відсоток ВДЕ (25%) та значну роль ядерної енергетики (30%). Частка водню поки залишається мінімальною у всіх трьох випадках, але потенціал зростання, особливо в Україні та ЄС, є суттєвим. Детальний розподіл подано у табл. 2.4 та на рис. 2.1–2.2 [122].

За результатами проведеного аналізу нами сформульовано конкретні висновки. ЄС активно інвестує в розширення ВДЕ та водневої економіки, підвищуючи частку відновлюваних джерел та водню. Україна зробила значний прогрес у розвитку ВДЕ і планує подальше зростання, особливо в сонячній та вітровій енергетиці. Водночас, воднева економіка в Україні перебуває на етапі формування, але вже зараз є потенціал для інтеграції з європейським ринком.

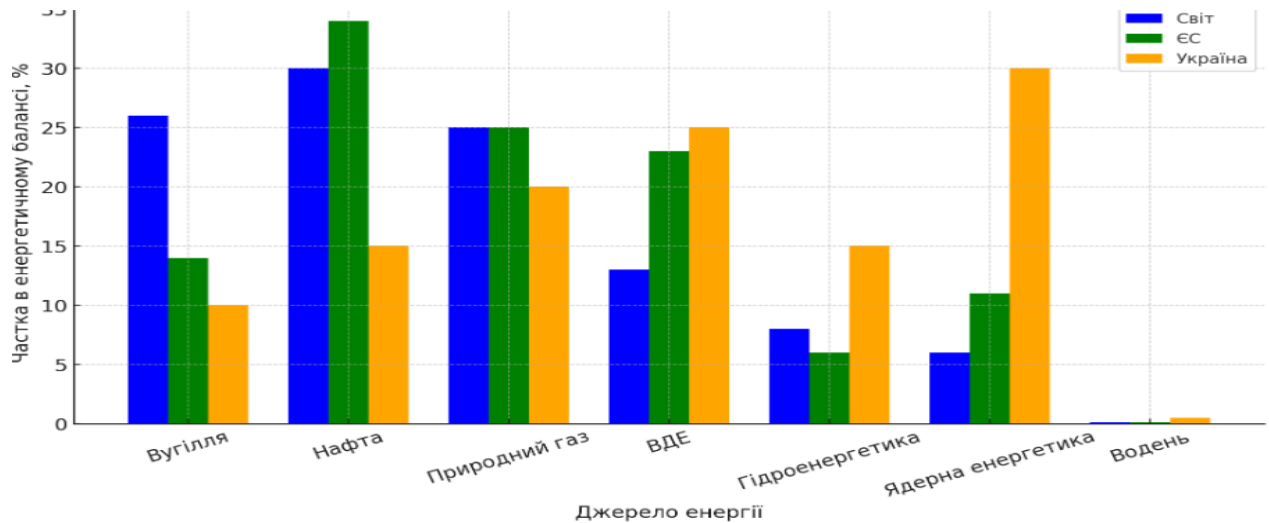


Рис. 2.1 – Енергетичний баланс: Світ, ЄС, Україна (2023)

Джерело: побудовано автором на основі [146]

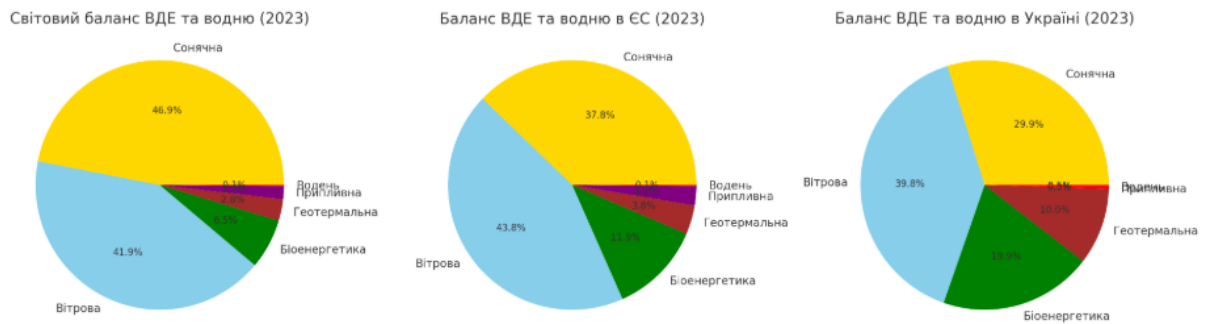


Рис. 2.2 – Розподіл відновлюваних джерел ВДЕ та водню у світовому енергетичному балансі, балансі ЄС та України у 2023 році

Джерело: побудовано автором на основі [147]

А на глобальному рівні ВДЕ та водень розвиваються повільніше, ніж у ЄС, проте частка цих джерел енергії зростає завдяки технологічним інноваціям та кліматичним ініціативам. Тобто, ЄС є лідером у розвитку ВДЕ та водню, з амбітними планами щодо досягнення кліматичних цілей, зокрема через активне використання сонячної та вітрової енергетики та розвитку водневої економіки. Україна також демонструє значний прогрес у розвитку ВДЕ, особливо в сонячній та вітровій енергетиці, хоча воднева економіка в Україні ще знаходиться на початковому етапі, але є потенціал для подальшого розвитку. Світ загалом має невелику частку ВДЕ та водню в загальному енергетичному балансі, однак, розвивається напрям водневої економіки, що зростатиме в майбутньому завдяки глобальним зусиллям у боротьбі зі змінами клімату.

Таким чином, проведений аналіз показує різницю в пріоритетах та перспективах розвитку енергетичних систем у різних регіонах, зокрема щодо відновлюваних джерел та водню. Світовим трендом визначено, що сонячна та вітрова енергетика домінують, а водень поки що має незначного внеску. В ЄС спостерігається високий розвиток вітрової та біоенергетики, а також підтримка водневих технологій та подальша інтеграція ВДЕ у промисловість. Для України характерною є значна частки біоенергетики та вітрової енергетики, а також більша частка водню порівняно з ЄС та світом. Україні варто зосередитися на подальшому розвитку біоенергетики, розширенні вітрової генерації та запуску водневих проєктів.

Глобальний енергетичний ринок є ключовим елементом світової економіки, оскільки забезпечує енергоресурсами всі галузі виробництва та споживання. Цей ринок зазнав суттєвих змін під впливом пандемії COVID-19, енергетичної кризи 2022 року, санкцій проти Росії, технологічних інновацій та активного розвитку відновлюваної енергетики (табл. 2.2.).

Ключові зміни у світовій енергетиці за останні п'ять років (табл. 2.2.). Загальне енергоспоживання зросло з 556 EJ у 2020 році до 630 EJ у 2024 році (+13%). Це пояснюється відновленням економік після пандемії, зростанням чисельності населення та розвитком промисловості. Виробництво електроенергії зросло на 16,7% (з 27 000 до 31 500 ТВт·год). Розширення електричних мереж та генераційних потужностей є ключовим трендом енергетики. Сукупна потужність ВДЕ значно зросла з 2 799 ГВт у 2020 році до 4 560 ГВт у 2024 році (+63%). Частка ВДЕ зросла з 29% (2020) до 42% (2024).

Відновлювана енергетика розвивається швидкими темпами, що сприяє зменшенню залежності від викопного палива. Споживання нафти відновилося після пандемії та досягло 101,5 млн барелів/день у 2024 році (+11,5% від 2020). Споживання природного газу також зросло з 3,8 до 4,3 трлн м³ (+13%).

Частка зрідженого природного газу (СПГ) у світовій торгівлі газом зросла з 32% до 40%, що свідчить про переорієнтацію ринків та зменшення залежності від трубопровідного газу. Попри зростання ВДЕ, нафта та газ залишаються важливими джерелами енергії, але збільшується роль СПГ як більш гнучкого джерела постачання.

Таблиця 2.2.

Основні показники світового енергетичного ринку за 2020–2024 роки

Показник	Роки				
	2020	2021	2022	2023	2024
Загальне споживання енергії (Ексаджоулі, EJ)	556	580	595	610	630
Виробництво електроенергії (ТВт·год)	27000	28200	29000	30000	31500
Потужності ВДЕ (ГВт)	2799	3050	3500	4000	4560
Частка ВДЕ у виробництві електроенергії (%)	29%	32%	35%	38%	42%
Споживання нафти (млн. бар./день)	91,0	97,0	99,8	100,3	101,5
Споживання природного газу (трлн. м³)	3,8	4,0	4,1	4,2	4,3
Частка зрідженого природного газу (СПГ) у світовій торгівлі газом (%)	32%	35%	37%	38%	40%
Викиди CO ₂ (млрд.тонн)	34,0	35,2	36,5	37,0	37,2

Джерело: побудовано автором на основі [147]

Викиди вуглекислого газу зросли з 34,0 млрд тонн у 2020 році до 37,2 млрд тонн у 2024 році (+9,4%). Це свідчить про те, що перехід до чистої енергетики поки що не компенсує зростання попиту на енергію. Необхідні більш активні заходи щодо декарбонізації економіки та скорочення використання вуглеводнів.

В цілому, глобальна енергетика зростає, причому основний приріст припадає на електроенергію, ВДЕ розширюються рекордними темпами, але їх недостатньо для швидкого скорочення викопного палива, СПГ відіграє ключову роль у зміні структури ринку газу, особливо в Європі та Азії, Викиди CO₂ продовжують зростати, що ставить під загрозу кліматичні цілі. За прогностичними експертними оцінками очікується подальше зростання електроспоживання, збільшення інвестицій у ВДЕ та ядерну енергетику, а також поступове зниження попиту на нафту до кінця десятиліття.

Проте важливим, на наше переконання, слід визнати дослідження не лише ринкових показників світового енергетичного ринку, а й його секторального аналізу (додаток У).

Сегменти світового енергетичного ринку тісно взаємопов'язані, і зміни в одному з них суттєво впливають на інші. Серед ключових глобальних тенденцій виокремлюються декарбонізація та енергетичний перехід, що передбачає активне впровадження ВДЕ з метою скорочення викидів CO₂. Геополітичні чинники, зокрема санкції проти Росії, трансформують структуру постачання енергоресурсів. Європа переорієнтовується на LNG із США та Катару, що зміцнює її енергетичну безпеку. Водночас зростає інтерес до водневої енергетики, яка розглядається як перспективна альтернатива природному газу, що спричиняє активне розгортання інфраструктури електролізу.

Енергетичний ринок змінюється у напрямі скорочення використання викопного палива, розвитку відновлюваних джерел енергії та енергетичних технологій нового покоління. Глобальні тенденції спрямовані на перехід до сталої та екологічно чистої енергетики.

Протягом останніх 3–5 років світовий енергетичний ринок демонструє стійке зростання інвестицій у відновлювану енергетику, зумовлене глобальними зусиллями щодо переходу до відновлюваних джерел енергії.

Індекс привабливості для інвестицій у відновлювану енергетику (RECAI), розроблений компанією *Ernst & Young*, оцінює провідні країни світу за здатністю залучати капітал у сферу ВДЕ. У 2021–2023 роках лідерами стабільно залишаються США та Китай, які мають найбільші обсяги інвестицій і масштабні державні програми. Європейські країни (Німеччина, Велика Британія, Франція, Іспанія) демонструють поступове зростання позицій завдяки сприятливій політиці у сфері зеленої енергетики.

Україна, попри нестабільність, досягла 6-го місця за темпами розвитку ВДЕ у 2019 році, що свідчить про потенціал енергетичного сектору. Деталізовану динаміку рейтингу RECAI подано у Додатку Ю, табл. Ю.2.7 [123; 124; 125].

Глобальний ринок водню стрімко розширюється як ключовий інструмент енергетичного переходу. За даними Deloitte, обсяг світового ринку чистого водню може зрости з \$184 млрд у 2024 році до \$1,4 трлн у 2050-му. Очікується, що 85% водню буде

"зеленим", отриманим з відновлюваних джерел. Основний попит припадає на промисловість (металургія, цемент, хімія) та важкий транспорт (авіація, судноплавство), де водень стане незамінним для досягнення декарбонізації.

Реалізація такого сценарію потребує масштабного нарощування виробничих потужностей, інфраструктури для транспортування та зберігання, а також державної підтримки. Потенціал «зеленого» водню в Україні, ЄС і країнах із доступом до дешевої ВДЕ є значним, однак ринок досі формується і стикається з проблемами: високою вартістю, нестачею сертифікації, відсутністю глобального індексу цін і обмеженою інфраструктурою. Прогнозні дані і сценарії представлено у рис. 2.3–2.8 [126; 127; 128; 129; 130; 131].

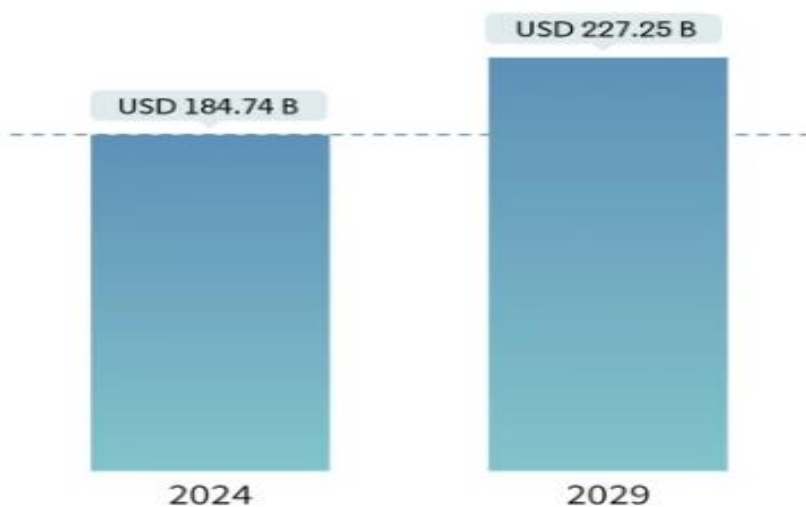


Рис. 2.3 – Розмір ринку водневої генерації за 2024-2029 рр.

Джерело: побудовано автором на основі [151]

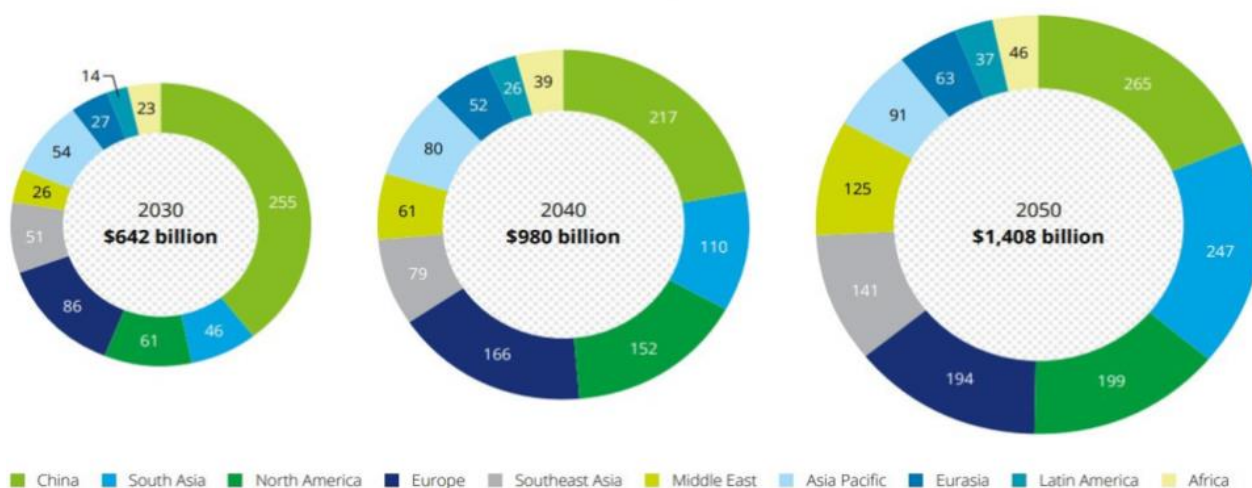


Рис. 2.4 – Розмір глобального ринку чистого водню в 2030-2050 рр., млрд. дол. США на рік

Джерело: побудовано автором на основі [132]



Рис. 2.5 – Зменшення викидів парникових газів за допомогою чистого водню в 2030-2050 рр.

Джерело: побудовано автором на основі [133]

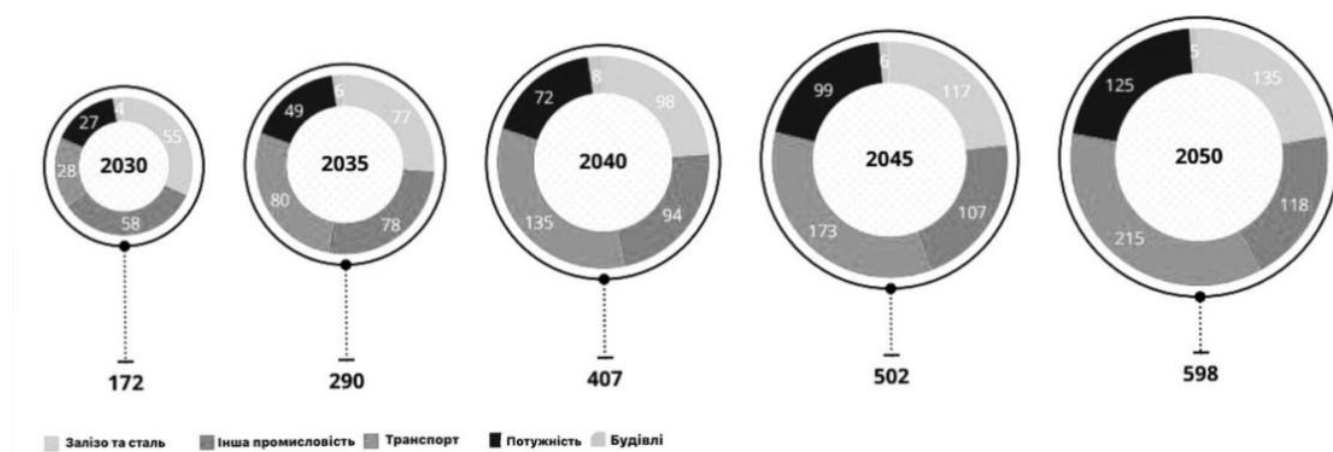


Рис. 2.6 – Еволюція попиту на чистий водень за секторами економіки в 2030-2050 рр., МтН₂eq

Джерело: побудовано автором на основі [134]

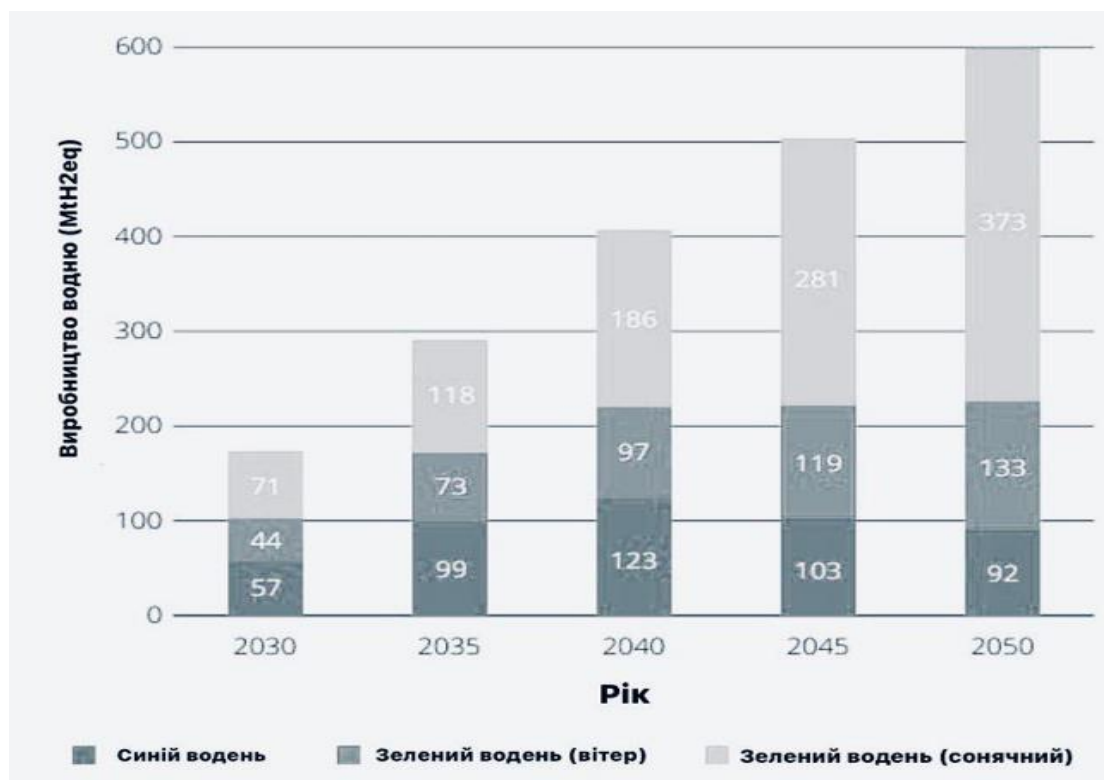


Рис. 2.7 – Постачання чистого водню в 2030-2050 рр.

Джерело: побудовано автором на основі [135]

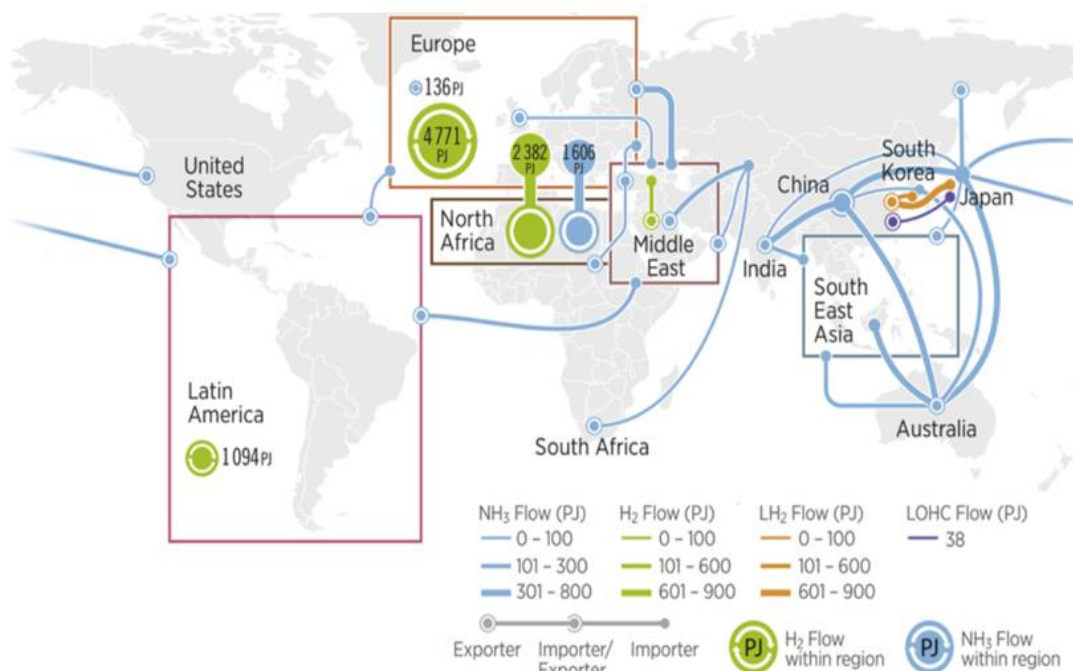


Рис. 2.8 – Глобальні потоки торгівлі воднем за оптимістичних технологічних припущень у 2050 році

Джерело: побудовано автором на основі [136]

На наше переконання, науково-практичний інтерес викликає дослідження, яке спрямоване на виконання компаративного аналізу (за даними характеристик традиційної звітності) розвитку водневої економіки в країнах світу, ЄС, Україні: виявлення лідерів, аутсайдерів та характеристика національних особливостей.

За останні 3-5 років багато країн зробили значні кроки у розвитку водневої економіки, впроваджуючи національні стратегії, інвестуючи у дослідження та розвиток, а також створюючи необхідну інфраструктуру. Ефективність цих зусиль залежить від державної підтримки, міжнародного співробітництва та технологічних інновацій. Країни-світові лідери у розвитку водневої економіки активно інвестують у водневі технології, інфраструктуру та дослідження. Вони мають національні стратегії, які спрямовані на декарбонізацію економіки та створення водневих кластерів (табл. 2.3.).

Провідні економіки світу активно впроваджують національні стратегії розвитку водневої енергетики. Японія та Південна Корея роблять ставку на імпорту водню і розвиток транспорту на паливних елементах. США зосереджуються на децентралізованому виробництві «зеленого» водню, підтримуючи інновації через закон «Inflation Reduction Act».

Таблиця 2.3.

**Реалізація національних стратегічних ініціатив щодо розвитку
водневої економіки у країнах-лідерах**

Країна	Воднева ініціатива (стратегічний документ)	Основні інвестиції	Ключові проєкти	Основний фокус
Японія	Воднева стратегія (2017, оновлена 2023)	3,4 млрд. \$ щороку, державні субсидії	ToyotaMirai, водневі заправки, імпорт H ₂ з Австралії	Водневий транспорт, електролізери
Південна Корея	Воднева дорожня карта (2019)	37 млрд. \$ до 2040 року	HyundaiNexo, водневі автобуси, водневі міста	Водневі автомобілі, публічний транспорт
Країни ЄС	Європейська воднева стратегія (2020), REPowerEU (2022)	500 млрд. Євро до 2050 року	H2Global, HyDealAmbition, імпорт водню з України, Африки	Масштабна інтеграція водню в енергетику та промисловість
США	Hydrogen Shot Initiative (2021)	8 млрд. \$ на водневі хаби	Водневі заправки Каліфорнії, синій водень у Техасі	Дешева вартість водню, транспорт, енергетика
Китай	Воднева стратегія (2022)	200 млрд. \$ до 2035 року	Масове виробництво водневих автобусів, імпорт водню	Масове виробництво транспорту, дешевий H ₂

Джерело: систематизовано автором

ЄС просуває масштабну інфраструктуру і сертифікацію, водночас Китай нарощує виробництво, орієнтуючись на внутрішній попит і технологічне лідерство (Додаток Ф).

Діагностика стану водневої економіки в світі оцінюється за кількома ключовими індикаторами виробництва водню, розвитку водневої інфраструктури, інвестиції та фінансування, розробка та впровадження стратегій, технологічні досягнення та інновації, екологічний ефект.

Для порівняльного аналізу стану водневої економіки в різних країнах світу доцільно використовувати кілька основних показників міжнародної статистики, які дозволяють за логічною послідовністю визначити показники як

кількісні характеристики вищезазначених ключових індикаторів (Додаток Х). Зазначені показники можуть змінюватися залежно від регіональних і глобальних ініціатив, тому для точних прогнозів слід слідкувати за офіційними звітами та стратегічними документами, які публікують уряди та міжнародні організації.

Розвиток водневої економіки є важливим кроком для досягнення енергетичної незалежності та зменшення викидів парникових газів, що сприятиме сталому розвитку та екологічній безпеці на глобальному рівні. Воднева економіка продовжує розвиватися в різних країнах світу, і хоча конкретні її кількісні показники можуть змінюватися з часом, загальні тенденції залишаються актуальними. За результатами проведеного нами аналізу стану водневої економіки серед світових лідерів (крім країн ЄС) було узагальнено його характеристики, які представлено в табл. 2.4.

США та Китай є світовими лідерами за обсягами виробництва водню, значною мірою завдяки потужній індустрії та масштабному використанню природного газу. Водночас ці країни інвестують у розвиток трубопроводів і водневої інфраструктури, а Китай також реалізує міжнародні проєкти, зокрема в Африці та країнах, що розвиваються. Частка «зеленого» водню в їхньому портфелі наразі невелика.

США та Китай є світовими лідерами за обсягами виробництва водню, значною мірою завдяки потужній індустрії та масштабному використанню природного газу. Водночас ці країни інвестують у розвиток трубопроводів і водневої інфраструктури, а Китай також реалізує міжнародні проєкти, зокрема в Африці та країнах, що розвиваються. Частка «зеленого» водню в їхньому портфелі наразі невелика. Японія і Південна Корея мають менший рівень виробництва, але останнім часом роблять акцент на зеленому водні – завдяки розвитку ВДЕ.

Таблиця 2.4.

Порівняльна характеристика стану водневої економіки світових лідерів за основними показниками 2021-2024 рр.

Показник	Країни			
	США	Китай	Японія	Південна Корея
Обсяг виробництва водню (млн тонн)	15-20	30-35	5-7	2-3
Частка "зеленого" водню (% від загального виробництва)	5-6	3-5	6-8	6-8
Інвестиції в водневі технології (млрд дол.)	8-10	12-15	5-7	3-4
Кількість водневих заправних станцій	100-150	50-100	120-150	50-80
Кількість водневих транспортних засобів	7,000-10,000	1,000-3,000	3,000-5,000	300-500
Кількість водневих трубопроводів (км)	300-500	1,000-1,500	200-300	100-200
Викиди CO ₂ , знижені за рахунок водневих технологій (млн тонн)	15-20	50-60	10-15	6-8
Інвестиції в міжнародні водневі проекти (млрд дол.)	1-2	3-4	1-2	1-2

Джерело: побудовано автором на основі [161]

Особливо виділяється Японія, яка лідирує у встановленні водневих заправок та впровадженні водневого транспорту (Toyota, Hyundai). Корея активно розвиває екологічні технології та інфраструктуру для зеленого водню.

Таким чином, США і Китай домінують за масштабами виробництва та капіталовкладень, тоді як Японія та Корея демонструють прогрес у зеленому сегменті, інфраструктурі і транспорті. Усі країни поступово збільшують частку «зеленого» водню та інвестиції в глобальні ініціативи, що підтверджує їхній стратегічний інтерес у водневій економіці та декарбонізації.

Науково-практичний інтерес представляють й результати порівняльного аналізу стану водневої економіки в країнах Європейського Союзу та України (табл. 2.5.). Враховуючи загальний стан водневої економіки в країнах ЄС, доцільно, на наш погляд, виділити та акцентувати увагу на прогресі найбільших успішних «гравців» в водневій сфері, таких як Німеччина, Франція, Нідерланди, Іспанія, Італія, Швеція.

Таблиця 2.5.

**Порівняльна характеристика стану водневої економіки в країнах ЄС та
Україні за основними показниками 2021-2024 рр.**

Показник	Країни							
	ЄС	Німеччина	Франція	Нідерланди	Іспанія	Італія	Швеція	Україна
Обсяг виробництва водню (млн тонн)	8-10	5-6	2-3	1.5-2	1-1.5	0.8-1	0.5-0.7	0.5-0.7
Частка "зеле-ного" водню (% від загально-го виробництва)	6-8	8-10	8-10	6-7	4-5	4-5	4-5	3-5
Інвестиції в водневі технології (млрд дол.)	5-6	4-5	2-2.5	1.5-2	1-1.5	0.8-1	0.5-0.7	0.2-0.3
Кількість водневих заправних станцій	300-500	200-250	100-110	70-90	50-70	40-60	30-50	2-3
Кількість водневих транспортних засобів	5.000-6.000	3.000-4.000	400-500	300-500	150-200	150-200	100-150	300-500
Кількість водневих трубопроводів (км)	300-350	100-150	70-100	50-70	30-50	30-50	20-30	10-20
Викиди CO ₂ , знижені за рахунок водневих технологій (млн тонн)	5-6	3-4	0.7-1	0.5-0.7	0.5-0.7	0.3-0.5	0.2-0.3	0.2-0.3
Інвестиції в міжнародні водневі проекти (млрд дол.)	3-4	2-3	0.7-1	0.5-0.7	0.5-0.7	0.5-0.7	0.3-0.4	0.2-0.3

Джерело: побудовано автором на основі [161]

Узагальнені результати проведеного порівняльного аналізу, представлені в таблиці 2.5, дають чітке уявлення про темпи розвитку водневої економіки в окремих країнах ЄС, а також в Україні. Загальні дані по ЄС враховують сукупний розвиток водневої економіки в рамках Європейського Союзу. Динаміка виробництва водню, інвестицій та інфраструктури включає всі країни-члени ЄС. Україна зазначена окремо, оскільки її воднева економіка розвивається в умовах обмежених інвестицій та технологічних можливостей порівняно з лідерами ЄС. Зокрема, Україна робить перші кроки в напрямку розвитку водневих технологій, зокрема зосереджуючи увагу на використанні зеленого водню для промисловості та транспорту.

В країнах ЄС спостерігається постійне зростання обсягів виробництва водню. Така тенденція зростання відображає активні зусилля країн ЄС, спрямовані на збільшення виробництва водню, зокрема з використанням відновлювальних джерел енергії,

таких як вітрові та сонячні станції. Німеччина, Франція та Нідерланди виділяються як основні виробники водню в ЄС. Франція та Нідерланди також продовжують збільшувати виробництво.

Частка зеленого водню в загальному обсязі виробництва водню в ЄС має чітку тенденцію до збільшення. Це показує, що країни ЄС активно сприяють розвитку відновлювальних джерел енергії для виробництва водню, що є важливою частиною політики декарбонізації. Це відображає значний прогрес у впровадженні технологій для використання відновлювальних джерел для виробництва водню. Франція та Нідерланди також демонструють зростання частки зеленого водню, що свідчить про успіхи в реалізації національних програм із зелених технологій.

Німеччина та Франція є лідерами в розбудові інфраструктури водневих заправок. В Україні водневі заправні станції тільки починають з'являтися.

В країнах ЄС інвестиції в водневі технології демонструють сталий ріст, що пов'язано з першими спробами залучити інвестиції для розвитку водневої інфраструктури та технологій.

В ЄС кількість водневих транспортних засобів значно зростає де Німеччина залишається лідером серед країн ЄС. Це відображає розпочатий процес впровадження водневого транспорту.

Збільшується в країнах ЄС й кількість водневих трубопроводів, що сприяє інтеграції водневої економіки в енергетичні мережі ЄС. Німеччина та Франція лідирують у розвитку трубопроводів для транспортування водню, з великими проектами, орієнтованими на міждержавне постачання водню. Україна має намір ввести в експлуатацію перші водневі трубопроводи, з досягненням 20-30 км на кінець 2030 року.

За рахунок розвитку водневих технологій в ЄС значно зменшується кількість викидів CO₂, що є важливою частиною зобов'язань ЄС щодо декарбонізації. Зниження викидів CO₂ від водневих технологій в Німеччині має бути одним з найбільших в ЄС, з досягненням 5-6 млн тонн у 2024 року. У порівнянні з іншими країнами ЄС, Україна все ще на початковому етапі щодо зниження викидів CO₂, з очікуваним зниженням викидів до 0.3-0.5 млн тонн у 2024 році.

Протягом 2021-2025 років країни ЄС активно залучають інвестиції для участі в міжнародних водневих проектах, що дозволяє інтегрувати водневі технології в глобальну економіку. Німеччина залишається головним гравцем у міжнародних водневих проектах, прогнозується інвестиції до 3 млрд дол. у 2024 році. Україна почала інвестувати в міжнародні водневі проекти, з очікуваними інвестиціями в 0.2-0.3 млрд дол. у 2024 році.

В цілому, країни ЄС активно інвестують в розвиток водневої економіки, що сприяє зростанню кількості водневих заправок, транспортних засобів та виробництва водню. Німеччина продовжує лідирувати, але інші країни, такі як Франція та Нідерланди, також демонструють суттєві результати. Україна знаходиться на ранній стадії розвитку водневої економіки, однак показує позитивні тенденції в зростанні обсягів виробництва водню, інфраструктури та кількості водневих транспортних засобів. Україна має значний потенціал для розвитку водневої економіки в майбутньому, зокрема в контексті міжнародних партнерств та інвестицій.

На наше глибоке переконання, оцінювання ефективності розвитку водневої економіки важливо оцінювати комплексно відповідно до широкого спектру даних міжнародної статистики, експертних та прогнозних оцінок. Доцільно виділяти показники, індикатори та критерії розвитку водневої економіки, між якими існує суттєва різниця, хоча ці категорії тісно взаємопов'язані.

Під показниками слід розуміти конкретні вимірювані величини або дані, які використовуються для вимірювання чи оцінки певних аспектів розвитку водневої економіки. Вони можуть бути як кількісними, так і якісними. Показники є основними вимірювальними одиницями, за якими можна оцінити поточний стан або тенденції розвитку. Проте індикаторами є комплексні характеристики, які базуються на декількох показниках і дозволяють оцінити загальний прогрес у розвитку водневої економіки або її певних аспектів. Індикатори можуть бути агрегованими значеннями кількох показників і служити для оцінки комплексних процесів чи досягнень. Індикатори часто використовуються для більш стратегічних та узагальнених оцінок. Критерії – це більш загальні та широкі стандарти чи вимоги, які визначають успішність або досягнення в конкретній області розвитку водневої економіки. Критерії визначають, яким чином потрібно оцінювати чи оцінюється рівень розвитку водневої економіки або конкретних її

компонентів. Критерії можуть бути специфічними для кожної країни чи регіону, залежно від політики, цілей і пріоритетів.

Взаємозв'язок між показниками, індикаторами та критеріями ефективності розвитку водневої економіки полягає в їхній послідовній аналітичній ролі. Показники забезпечують базові вимірювання окремих параметрів, що відображають конкретні аспекти процесу. Індикатори формуються шляхом агрегування показників і слугують для оцінки загального стану та динаміки розвитку. Критерії виступають як нормативні орієнтири, за якими здійснюється оцінка досягнення стратегічних цілей і результативності впровадження водневої економіки. Таким чином, кожен рівень (показники, індикатори та критерії) взаємопов'язаний і допомагає формувати комплексну оцінку розвитку водневої економіки (додаток ІІ).

Систематизація існуючих характеристик дозволила нам чітко окреслити їх призначення в оцінюванні ефективності: критерії визначають загальні напрямки та стандарти, які визначають успіх або досягнення у певній сфері водневої економіки; індикатори є конкретними елементами, що допомагають оцінити прогрес у досягненні цих критеріїв; показники є вимірюваними величинами, які можна конкретно оцінити і порівняти для отримання даних про ситуацію на поточний момент.

Оцінювання прогресу в розвитку водневої економіки базується на даних із різноманітних джерел, що забезпечують точність і своєчасність інформації. До міжнародних належать звіти IEA і IRENA щодо тенденцій водневої енергетики, аналітика ВООЗ про вплив викидів CO₂, документи Єврокомісії та глобальні огляди Global Hydrogen Council. На національному рівні – звіти міністерств та статистичних служб (наприклад, України чи США), а також регіональні доповіді про інфраструктуру та пілотні програми.

Наукові публікації, такі як International Journal of Hydrogen Energy, технічні звіти дослідницьких центрів і університетів забезпечують глибинне розуміння технологій виробництва, зберігання і транспортування водню. Інвестиційні видання (Goldman Sachs, JP Morgan) та звіти стартапів і Green Bond допомагають оцінити економічну привабливість і фінансові механізми. Приватний сектор, асоціації (Hydrogen Europe,

Linde, Shell, Toyota) та консалтингові компанії (McKinsey, BloombergNEF, PwC) додають огляди новацій і ринкових прогнозів.

Також важливі екологічні й соціальні дослідження в рамках UNFCCC, COP, World Resources Institute, що висвітлюють роль водню в декарбонізації й забезпеченні сталості. Спеціалізовані медіа та міжнародні форуми (Hydrogen Fuel News, World Hydrogen Summit, H2EXPO) дозволяють оперативно моніторити нові досягнення, технології та тренди.

Завдяки використанню різноманітних джерел можна отримати комплексну і точну картину щодо розвитку водневої економіки в різних країнах та регіонах. Одним із основних рушіїв розвитку водневої економіки є необхідність досягнення глобальних цілей по зниженню викидів парникових газів та боротьби зі змінами клімату.

Водень, особливо «зелений» (отриманий за допомогою відновлювальних джерел енергії), є важливим інструментом для декарбонізації різних секторів економіки. Водень може стати основним елементом у системах збереження енергії, зокрема у поєднанні з відновлювальними джерелами енергії (сонце, вітер), де він може зберігати надлишкову енергію для подальшого використання. Водень є перспективною альтернативою для важких транспортних засобів (автоперевезення, залізниця, авіація) завдяки високій енергетичній щільності. Водень може бути використаний для високотемпературних процесів у важкій промисловості (наприклад, металургія, хімічна промисловість), що уможливлює зменшити залежність від вугілля та природного газу.

Технології водневої економіки стрімко розвиваються. Існують різноманітні технології виробництва водню (електроліз, парогазова конверсія метану, біомаса), а також новітні інновації в сфері транспортування, зберігання і використання водню. Прогрес у цих сферах робить водень перспективним варіантом для енергетичних та промислових застосувань.

Розвиток водневої економіки має значний економічний потенціал. Воднева економіка створює нові можливості для інвестицій та технологічних стартапів. Вона також сприяє розвитку нових галузей, зокрема в енергетичному, транспортному та промисловому секторах. Водень може стати дешевим джерелом енергії, особливо якщо виробляти його з відновлювальних джерел енергії за допомогою дешевих технологій

електролізу. Воднева економіка дає змогу країнам і компаніям зменшити залежність від традиційних енергетичних ресурсів, таких як нафта і газ, і знизити вразливість до змін у світових цінах на енергоносії.

Водень має стратегічне значення для забезпечення енергетичної безпеки. Для країн, які не мають значних запасів нафти та газу, воднева економіка може стати важливим інструментом для забезпечення енергетичної автономії. Водень має потенціал для експорту, що дозволяє країнам-експортерам створити нові торгові маршрути і посилити економічну співпрацю з іншими державами.

Воднева економіка має значний екологічний потенціал, особливо в контексті боротьби зі змінами клімату. Водень як джерело чистої енергії може суттєво знизити викиди CO₂ в різних секторах економіки, особливо в важкій промисловості та транспорті. Водень може стати основою для створення сталих енергетичних систем, де основну роль відіграють відновлювальні джерела енергії та збереження енергії.

Для успішного розвитку водневої економіки необхідно створити сприятливі політичні та регуляторні умови. Розвиток водневої економіки потребує політики підтримки у вигляді пільгових податків, субсидій, державного фінансування досліджень і розробок. Важливо, щоб країни співпрацювали між собою для створення єдиного глобального ринку водню та визначення спільних стандартів.

Проте важливо враховувати в стратегуванні розбудови водневої економіки ризики та виклики: високі капітальні витрати на інфраструктуру (розвиток водневої інфраструктури потребує великих капіталовкладень, що може бути перешкодою для швидкого впровадження технологій); технічні бар'єри: потребує вирішення ряд технічних проблем, таких як зниження вартості виробництва водню, зберігання і транспортування водню на великі відстані.

Стратегічне планування розвитку водневої економіки ґрунтується на кількох ключових концептуальних засадах. Насамперед, країни мають формувати національні водневі стратегії з урахуванням власного потенціалу, доступу до відновлювальної енергії та стану інфраструктури. Такі документи визначають пріоритети розвитку, механізми підтримки та інтеграції водневих технологій в енергетичну систему. Другий аспект – це інвестування в науково-технічний прогрес. Продовження фінансування досліджень і

розробок у сфері водневих технологій, а також підтримка міжнародних наукових проєктів, дозволяють стимулювати інновації та знижувати технологічні бар'єри. Третій – активна міжнародна співпраця. Участь у глобальних водневих ініціативах, створення міждержавних альянсів і розвиток спільної інфраструктури сприяють формуванню єдиного ринку водню, посиленню інвестиційної привабливості та гармонізації стандартів.

Розвиток водневої економіки має величезний потенціал, як з точки зору економічного зростання, так і з огляду на екологічну і енергетичну безпеку. Для цього необхідно створити сприятливі політичні, економічні та технічні умови, які б стимулювали інвестиції в цю галузь та сприяли реалізації інноваційних водневих проєктів.

Таким чином, у відповідь на масштабну енергетичну кризу та кліматичні виклики, країни світу активно трансформують свої енергетичні стратегії. Відновлювані джерела енергії, нові технології та зокрема розвиток водневої енергетики стають ключовими факторами для забезпечення сталого економічного зростання, енергетичної безпеки та досягнення кліматичних цілей.

2.2. Контент-аналіз стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки різних країн світу та України

У зв'язку з енергетичними та екологічними викликами XXI століття, провідні країни світу активно шукають альтернативу викопному паливу. Воднева економіка дедалі частіше розглядається як стратегічний напрямок забезпечення сталого розвитку, енергетичної безпеки та зменшення викидів парникових газів.

Енергетична стратегія сучасних держав фокусується на трьох основних безпека, ефективне використання ресурсів, екологічна відповідальність. Піраміда енергетичної політики К. Фрая демонструє послідовність цих пріоритетів – від доступу до енергії до впровадження екологічно чистих технологій. Водночас

країни вже здійснюють перехід до інноваційних, низьковуглецевих джерел енергії (рис. 2.9).

Зелений водень, що виробляється з використанням відновлюваних джерел, привертає увагу урядів, бізнесу та науковців. Низка країн розглядає його як інструмент досягнення кліматичної нейтральності. З 2018 року водневі урядові стратегії набули стрімкого поширення: лише у 2020 році було оголошено понад 10 національних програм [137; 138].



Рис. 2.9 – Піраміда потреб енергетичної політики за К. Фраєм

Джерело: сформовано автором

Відповідно припущень К. Фрая застосування передових технологій в енергетиці стає доступним лише країнам з високим рівнем технологічного розвитку, які фактично переходять на інноваційний та інтенсивний шлях розвитку власної енергетики, тоді як країни, що розвиваються змушені забезпечувати потреби економічного зростання розробляючи відносно дешеві та доступні джерела енергії. На найвищому щаблі цілей політики у сфері енергетики – проблема відповідності прийнятої моделі енергосистеми країни поточним потребам суспільства (як приклад – вплив мережі енергетичних об'єктів на навколишнє середовище, застосування переважно відновлюваних та невичерпних джерел енергії).

Останніми роками водень визнано альтернативним енергоносієм завдяки його його потенціалу вирішення проблем зміни клімату, забруднення повітря та енергетичної

енергетичної безпеки. Зокрема, інтерес наукової, політичної та економічної зосереджений на зеленому водні, який можна виробляти за допомогою джерел енергії, таких як сонячна, вітрова та гідроенергія. У багатьох країнах водень стратегічно оцінюється як один з основних інструментів для переходу до нейтральної економіки.

Воднева економіка виступає стратегічним пріоритетом забезпечення енергетичної безпеки, досягнення економічної вигоди, зниження вуглецевих викидів та сталого розвитку у світі.

Стрімке зростання взаємозалежності національних економік країн світу в сучасних умовах масштабного поширення глобалізаційних процесів, а також нерівномірність розміщення природних багатств на планеті обумовлюють необхідність взаємного узгодження політичних, економічних та соціальних інтересів країн-виробників і країн-споживачів, що підсилює пріоритетність їх партнерської взаємодії.

Уряди різних країн світу активно розробляють національні стратегічні ініціативи або приймають участь в міжнародних ініціативах щодо водневих технологій, які передбачають стимулювання виробництва, зберігання, транспортування та використання водню як палива. Водневі урядові стратегічні ініціативи почали активно формуватися урядами різних країн світу з 2018 року по 2020 рік (рис. 2.10).



Рис. 2.10 – Урядові стратегічні ініціативи розвитку водневої економіки, оголошені у 2018-2020 рр.

Джерело: сформовано автором на основі [139]

Під урядовою стратегічною ініціативою слід розуміти масштабну державну програму або проєкт, спрямований на реалізацію довгострокових національних цілей, покращення економіки, безпеки, соціальної сфери чи інших ключових аспектів розвитку країни. Ключовими риси урядових стратегічних ініціатив є наступні: 1) відповідає державній стратегії – узгоджується з національними програмами та планами розвитку; 2) охоплює широкий спектр питань – може включати економічні, соціальні, екологічні та безпекові аспекти; 3) має довгостроковий ефект – впливає на розвиток країни на багато років вперед; 4) фінансується з державного бюджету або міжнародних фондів; 5) передбачає міжвідомчу співпрацю – залучає різні міністерства, органи влади та громадськість.

До урядових стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки прийнято відносити наступні стратегічні документи, розроблені, оголошені та офіційно прийняті на національному рівні: звіти з НДДКР (Науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт) щодо водневих технологій; аналітично-статистичні та експертні огляди з водню; водневі дорожні карти; водневі стратегії. Такі стратегічні документи охоплюють комплекс політик, програмі заходів, спрямованих на створення екосистеми виробництва, транспортування, зберігання та використання водню як екологічно чистого енергетичного ресурсу. Основна мета урядових водневих стратегій та ініціатив – скорочення викидів CO₂, декарбонізація економіки (промисловості, транспортного сектору), розвиток нових енергетичних ринків, забезпечення енергетичної незалежності держави.

Алгоритм формування урядових стратегічних ініціатив традиційно передбачає організацію логічної послідовності основних етапів (рис. 2.11).

Контент-аналіз урядових стратегічних ініціатив у сфері водневої економіки є ефективним інструментом для системного вивчення державної політики щодо розвитку водневих технологій. Він дає можливість комплексно оцінити стратегічні пріоритети, виявити політичні, економічні та екологічні орієнтири урядів, а також визначити ступінь відповідності національних підходів міжнародним стандартам сталого розвитку.

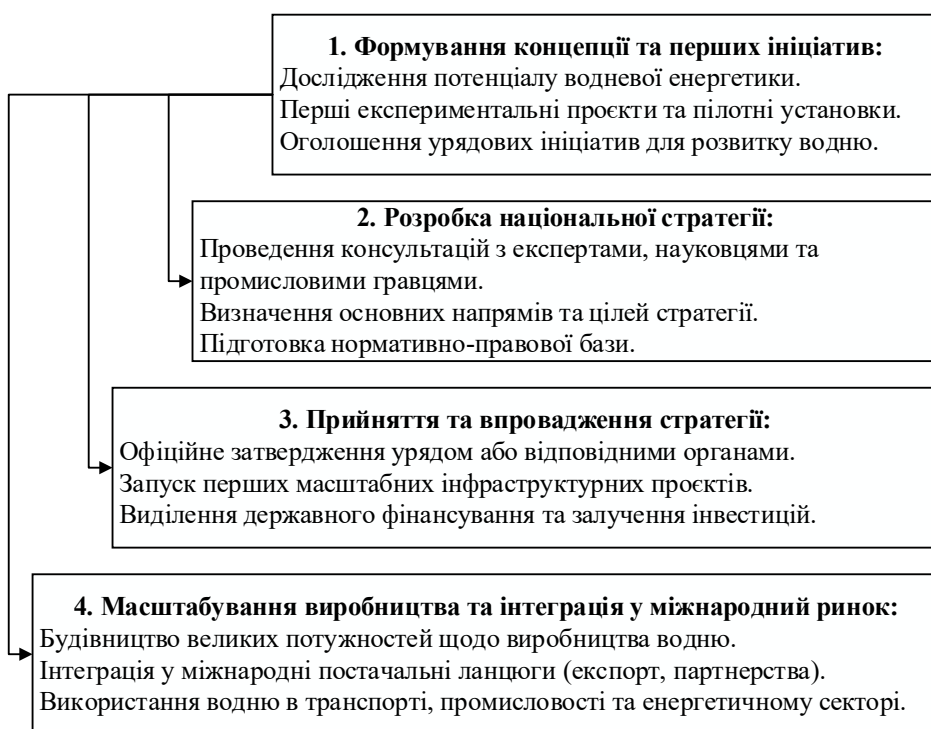


Рис. 2.11 – Основні етапи формування урядових стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки

Джерело: сформовано автором за результатами власних досліджень

Такий аналіз підвищує прозорість державної політики, допомагає формувати обґрунтовані рекомендації щодо удосконалення стратегій та виявляти прогалини у нормативно-правовій і інституційній базі. Особливо актуальним цей метод стає в умовах посиленої уваги до питань декарбонізації, енергетичної безпеки та міжнародного співробітництва, адже забезпечує прийняття рішень на основі об'єктивного аналізу змісту політичних документів.

У 2023 році урядами 28 країн було офіційно оголошено національні водневі стратегії. Ці документи включають комплекс заходів з розвитку інфраструктури, стимулювання виробництва «зеленого» водню, підтримки інновацій і залучення інвестицій. В усіх проаналізованих стратегіях простежується акцент на екологічну складову – зменшення викидів CO₂, а також на економічні вигоди від розвитку водневої енергетики.

Усі країни-учасниці дослідження мають національні стратегії; понад 60% залучають приватні інвестиції, а кожна четверта країна використовує міжнародне фінансування. Основні напрями розвитку: енергетика, транспорт, промисловість, інфраструктура виробництва водню та експорт.

Україна, попри війну та обмежені ресурси, також активно розробляє національну стратегію водневої енергетики, інтегруючись у європейський ринок. З 2021 року розпочато реалізацію дорожньої карти, розробленої ІВЕ НАН України, з чіткими етапами розвитку до 2030 та 2050 років. Ключові завдання: розвиток відновлюваного водню, модернізація газотранспортної системи, створення нормативної бази, залучення міжнародного капіталу.

На наш погляд, роль контент-аналізу в останні роки зростає, оскільки щороку кількість та спектр урядових стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки стрімко збільшується.

Для проведення контент-аналізу стратегічних ініціатив станом на 2023 рік нами було використано офіційні документи, стратегічні плани та програми розвитку водневої економіки різних країн, а також аналітичні звіти міжнародних організацій, таких як Міжнародне енергетичне агентство (IEA), Міжнародне агентство з відновлюваних джерел енергії (IRENA) та Міжнародне партнерство для водню та паливних елементів в економіці (IPHE).

В результаті систематизації інформації про водневі стратегії та ініціативи, які прийняті урядами різних країн світу за 2017-2023 рр., була сформована відповідна їх загальна характеристика в хронологічній послідовності офіційного представлення та наголошення (Додаток Я).

За узагальненою характеристикою водневих стратегій та ініціатив, які прийняті урядами різних країн світу за 2017-2023 рр., було здійснено їх кількісний аналіз з урахуванням відповідних ознак (Додаток А1).

За результатами проведення кількісного аналізу водневих стратегій та ініціатив, прийнятих урядами різних країн світу за 2017-2023 рр. сформульовано наступні висновки.

Тільки одна країна, Японія, прийняла водневу стратегію в 2017 році, що свідчить про те, що водневі стратегії почали з'являтися на міжнародному рівні тільки наприкінці 2010-х років. У 2019 році дві країни (Австралія, Південна Корея) оприлюднили свої стратегії, що свідчить про виникнення інтересу до водневої економіки. Найбільша кількість 10 стратегій була прийнята в 2020 році, що становить понад 35% від загальної кількості та свідчить про швидке зростання впровадження водневих стратегій, ймовірно,

через нагальну потребу у трансформації енергетичних систем та боротьбі з кліматичними змінами. Сім країн оприлюднили стратегії в 2021 році, що є значною частиною (25 %) від загальної кількості, хоча і меншою, ніж у 2020 році. Це може свідчити про період стабільного впровадження водневих ініціатив після початкового сплеску. Шість країн прийняли стратегії в 2022 році, що також вказує на продовження процесу стабілізації впровадження, але й на незначне зниження темпів порівняно з попередніми роками.

Лише дві країни прийняли стратегії в 2023 році, що може вказувати на активізацію процесу реалізації ініціатив у сфері розбудови водневої економіки, де визначальні стратегічні напрямки вже розподілено.

За ознакою поширення урядові стратегічні ініціативи згруповані за такою їх специфікою: національна – стратегія діє в межах однієї країни; європейська – частина спільної європейської водневої стратегії, що підтримується ЄС; міжнародна – країна бере участь у глобальних ініціативах та партнерствах з водневої економіки. Встановлено, що всі 28 країн мають національні стратегії, що є свідченням того, що всі країни сфокусовані на національному рівні для досягнення своїх цілей у водневій економіці. Проте 12 країн, які мають європейські стратегії, вказують на наявність європейських ініціатив, але цей відсоток більш ніж на половину менший порівняно з кількістю стратегій національного рівня. Сім країн мають статус міжнародного поширення, що може свідчити про певний глобальний підхід до водневої економіки, однак більшість країн зосереджуються на національних чи європейських рамках.

Характеристика стратегічних ініціатив за сегментами показує, які напрями розвитку водневої економіки є пріоритетними для країн. Основні сектори: енергетика (декарбонізація електростанцій, інтеграція з ВДЕ), транспорт (водневе паливо для різних видів транспорту), промисловість (використання у хімічній та металургійній галузях), виробництво (інфраструктура для зеленого водню), експорт (орієнтація на міжнародний ринок).

Більшість країн (26) акцентують увагу на енергетиці як ключовому сегменті. У 17 стратегіях (64,3%) водень застосовується в транспорті, у 60,7% — в промисловості. Лише 10 країн готові розвивати виробництво зеленого водню та розглядають його як

експортний ресурс. Це свідчить про поступове формування сегментованих стратегій відповідно до національних можливостей і пріоритетів.

Загальна характеристика стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки в різних країнах надає також повне уявлення про такі типи інвестування та фінансування як: державні інвестиції – фінансування, що надається державними установами для розвитку водневої інфраструктури та технологій; приватні інвестиції – капітал, залучений від приватних компаній або інвесторів для розвитку водневих проектів; міжнародне фінансування – фінансування з міжнародних джерел, таких як міжнародні фінансові інститути, гранти чи співпраця з іншими країнами або регіональними організаціями. Всі 28 країн включають державні інвестиції в свої стратегії, що підтверджує важливість державної підтримки для розвитку водневої економіки. Більше половини країн (19) залучають приватні інвестиції, що вказує на активну участь приватного сектора в розвитку водневої інфраструктури. Чверть країн (7) використовують міжнародне фінансування, що свідчить про важливість міжнародної співпраці в водневій економіці.

При встановленні цілей та стратегічних пріоритетів виявлено, що всі 28 країн включають екологічні цілі в свої ініціативи, що вказує на загальну спрямованість водневих стратегій на зниження викидів CO₂ і боротьбу з кліматичними змінами. 24 країни, що вказано у практично у всіх стратегічних ініціативах (85,71%), ставлять пріоритет на енергетичну безпеку, що є дуже важливим для забезпечення стабільності енергетичних систем в умовах змін клімату. Переважна більшість країн (22 або 78,57 % від загальної кількості) націлені на економічний розвиток через розвиток водневої інфраструктури, що створює нові робочі місця і можливості для промисловості. Більше половини країн (15) включають інфраструктурні цілі, що свідчить про важливість розвитку водневої інфраструктури для забезпечення надійного постачання водню.

За термінами реалізації стратегічні ініціативи розвитку водневої економіки розподіляються наступним чином. Більшість країн (19, майже 68% від загальної кількості) планують завершити реалізацію своїх стратегій до 2030 року, що вказує на швидкий темп змін і потребу в короткострокових результатах. Вісім країн (28%) мають плани щодо реалізації своїх стратегій у період з 2030 по 2040 роки. Лише одна країна

(Чилі) має стратегію на період понад 2040 рік, що може бути результатом довгострокових проєктів, орієнтованих на фундаментальні зміни в енергетичних і економічних системах.

В цілому, урядові водневі стратегічні ініціативи набули значного поширення з 2020 року, з найбільшою кількістю стратегій, оприлюднених у 2020 році. Переважно країни орієнтуються на національні стратегії, з великим акцентом на енергетику та транспорт. Стратегічно воднева економіка націлена на екологічні та енергетичні цілі, з значною частиною стратегій, що включають державні інвестиції. Найбільша частина країн планує реалізацію своїх стратегій до 2030 року, що свідчить про високий рівень терміновості і пріоритетності цих ініціатив. Така ситуація демонструє, що воднева економіка є стратегічним напрямом для більшості країн, і вони активно працюють над її впровадженням з метою досягнення сталого розвитку, економічної вигоди та енергетичної безпеки.

За результатами проведених нами досліджень на основі контент-аналізу стратегій та ініціатив розвитку водневої економіки в різних країнах, загальна характеристика яких представлена в таблиці 2.15, встановлено, що уряди 28 країн за 2017-2023 рр. різні стратегічні підходи для впровадження водневих технологій, залежно від ресурсної бази, економічних можливостей та міжнародної співпраці.

До основних стратегічних підходів, що характеризують пріоритети в розвитку водневої економіки, доцільно включити цілий їх спектр (додаток Б1).

При здійсненні контент-аналізу стратегічних ініціатив різних країн доцільно сфокусувати увагу на з'ясуванні спектру стратегічних підходів до визначення пріоритетів розвитку водневої економіки на національному.

Усі 28 країн-учасниць мають державне фінансування водневої економіки. Понад половина залучає приватний капітал, а кожна четверта – міжнародну фінансову підтримку. Найбільші інвестиції:

- США — \$4–5 млрд (Green Hydrogen Initiative);
- Китай — \$5,5 млрд (Hebei Hydrogen Project);
- Німеччина, Японія — \$2–3 млрд (національні програми);
- Україна — \$0,2–0,5 млрд (Hydrogen Valley Ukraine).

Детальну інформацію про масштаби інвестицій, потенціал виробництва водню та створення робочих місць наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6.

Ключові водневі проєкти у світі та в Україні: інвестиції, потужності та соціально-економічний ефект (2021–2023 рр.)

Країна	Проект	Рік	Потужність (тис. т/рік)	Робочі місця
США	Green Hydrogen Initiative	2022	500	5000
Китай	Hebei Hydrogen Energy	2023	700	8000
Німеччина	National Hydrogen Strategy	2021	200	2500
Україна	Hydrogen Valley Ukraine	2023	50	300

Джерело: складено автором

Більшість країн планують реалізацію стратегій до 2030 року. Україна ставить скромніші, але досяжні цілі:

потужність виробництва – 2–5 ГВт;

100 водневих заправок;

збільшення експорту до 500 млн євро;

участь у щонайменше 5 міжнародних проєктах.

Загальносвітова тенденція переходу до водневої економіки свідчить про формування нового енергетичного порядку. Найбільш активні країни поєднують інвестиції, інновації, інфраструктуру та співпрацю.

Україна, попри виклики війни, має потенціал стати активним учасником європейського водневого ринку, якщо забезпечить ефективне правове регулювання, розвиток інфраструктури й міжнародне партнерство.

Таким чином, кожна країна використовує різні стратегічні підходи залежно від власних ресурсів та геополітичного положення. Воднева економіка є ключовим компонентом майбутнього енергетичного переходу до екологічно чистих джерел енергії. Уряди різних країн та регіонів інвестують значні ресурси у розвиток водневих технологій як засобу декарбонізації своїх економік, зменшення залежності від викопного палива та підвищення енергетичної безпеки.

Україна також прагне долучитися до світових тенденцій розвитку водневої економіки. Уряд України розробляє національну водневу стратегію, яка передбачає

розвиток водневих технологій з метою зміцнення енергетичної незалежності та досягнення екологічних цілей. Водночас, перед країною постають численні виклики, пов'язані з обмеженими фінансовими ресурсами, недостатньо розвиненою інфраструктурою та відсутністю досвіду у впровадженні водневих технологій.

Україна розробляє власну національну водневу стратегію, яка передбачає інтеграцію до європейської водневої економіки.

Базовим прототипом першого проєкту національної водневої стратегії, активною розробкою якого опікувалися науково-дослідні інститути та уряд України, вважалась Воднева стратегія ЄС (Hydrogen Roadmap Europe 2019, fch.europa.eu) та низка інших. Мотивацією до розроблення водневої стратегії в Україні, крім власних енергетичних та екологічних проблем, були й міжнародні зобов'язання. Перший самостійний проєкт Дорожньої карти впровадження водневих технологій було розроблено в Інституті відновлюваної енергетики Національної Академії наук України (ІВЕ НАН України) у 2019 році. Було враховано останні технологічні розробки вітчизняних та зарубіжних науковців, результати роботи дослідновипробувальної бази Інституту проблем матеріалознавства та Інституту відновлюваної енергетики НАН України для виробництва водню за допомогою вітроустановок і електролізера, розробленого в Інституті проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. Для ефективного впровадження водневих технологій було передбачено виконання низки основних завдань, які потребують наукового супроводу, зокрема: удосконалення законодавчо-правової та нормативно-технічної бази; організація науково-технічного забезпечення; організація інформаційного забезпечення та освіти; створення методичного забезпечення. Важливу роль у просуванні наукових досягнень відіграють урядові установи, енергетичні агентства, університети й національні лабораторії. Передбачено поширення результатів наукових досліджень і передача знань до приватного сектору для комерційного застосування. Проєкт «Дорожньої карти для виробництва та використання водню в Україні» було представлено у січні 2021 року експертами Європейської економічної комісії (ЄЕК ООН) [140]. У Проєкті було запропоновано ключові позиції для України: 1) зменшити загальний обсяг викидів парникових газів ($> 50\%$ у 2030 році); 2) збільшити частку відновлюваної енергії до 70% ; 3) стати кліматично нейтральною до 2050 року

(синхронізовано з ЄС). У цій Дорожній карті було зазначено, що водень надає широкий спектр можливостей для розбудови національної моделі водневої економіки.

Дорожня карта визначає чотири сектори (базові принципи) для впровадження водневих технологій в Україні: 1) трансформація систем електропостачання та опалення; 2) використання тепла, що виділяється в процесі виробництва; 3) трансформація транспортного сектору; 4) модернізація газотранспортної системи та поетапне збільшення обсягів виробництва, зберігання й транспортування водню.

Нова ситуація в економіці України, обумовлена Covid-19 та іншими вітчизняними і світовими обставинами, спонукала до перегляду попередніх проєктів. У 2021 році Інститут відновлюваної енергетики запропонував оновлену редакцію Водневої стратегії України [141]. Загальною метою Водневої стратегії визначено створення водневої енергетики як важливого елемента нової моделі енергетичної системи України для забезпечення значної частки потреб в екологічно чистому енергоносії енергетичної, промислової та транспортної галузей України. Це сприятиме розвитку безвуглецевої економіки як пріоритетного напрямку державної політики і, відповідно, зменшенню споживання органічного палива та поліпшенню стану довкілля. Формування водневої енергетики України передбачалось проводити поетапно:

- 1-й етап, або короткострокові цілі (2022–2025 рр.) – закладання фундаменту водневої енергетики і запуску експортного ринку зеленого водню;
- 2-й етап, або середньострокові цілі (2026–2030 рр.) – диверсифікація первинних енергоносіїв за рахунок зростання обсягів виробництва водню;
- 3-й етап, або довгострокові цілі (2031–2050 рр.) – швидке розширення ринку, зокрема експортної складової.

На базі розрахунків та пропозицій Інституту відновлюваної енергетики у 2022 році, перед самим початком масштабного воєнного вторгнення, було представлено проєкт ДАЕР України «Стратегія розвитку водневої енергетики в Україні на період до 2030 року» [142].

Проєкт Водневої стратегії України на період до 2050 року (далі – Стратегія) [143] розроблено групою експертів за активної участі фахівців ІВЕ НАН України та представлено на розгляд уряду на початку літа 2024 року. Проєкт визначає основні сфери

використання водню в Україні: промисловість, електроенергетика, транспорт, теплопостачання, включно з можливостями експорту, які охоплюють процеси його виробництва, зберігання та транспортування [144].

Метою Стратегії є формування основних засад розвитку водневої галузі в Україні до 2050 року, визначення основних етапів та стратегічних цілей, шляхів і способів їх досягнення. На цей час українським законодавством не врегульовані правові, економічні та організаційні засади для виробництва, транспортування, зберігання й використання водню за секторами. Крім того, відсутні визначені стандарти та нормативні вимоги, що регулюють якість, безпеку та екологічні аспекти застосування водневих технологій. У серпні 2024 року урядом представлено Національний план дій з розвитку відновлюваної енергетики на період до 2030 року, який матиме вплив на створення передумов для розвитку водневої енергетики в Україні [145]. Зазначено, що виробництво та споживання відновлюваного водню є новим перспективним напрямом розвитку відновлюваної енергетики, а Інститутом відновлюваної енергетики Національної академії наук розраховано потенційно можливий обсяг виробництва відновлюваного водню в Україні з використанням електричної енергії вітро- та фотоелектричних станцій. Пріоритетні напрями виробництва та використання водню в Україні, зокрема, відновлюваного, мають визначатися у Водневій стратегії України на період до 2050 року.

Ключовими аспектами Стратегії у сфері водневої енергетики є, зокрема: - узгодження процедури сертифікації відповідно до вимог ЄС щодо імпорту водню та інших синтетичних газів; - виявлення та усунення адміністративних, технічних та регуляторних бар'єрів для виробництва, транспортування, зберігання й використання водню та інших синтетичних газів, включно з ліцензуванням, дозвільною документацією і технічними вимогами; - створення нормативно-правових та адміністративних засад розвитку виробництва і споживання водню та інших синтетичних газів в Україні, конкурентних і прозорих транскордонних ринків та торгівлі.

Для розвитку водневої галузі в Україні необхідно розроблення нормативно-правової бази, яка визначатиме правила та стандарти для виробництва, зберігання, транспортування й використання водню. Основними аспектами цієї бази мають бути такі: - встановлення енергетичних та екологічних стандартів для виробництва й використання

водню; - розроблення технічних та безпекових стандартів для виробництва, зберігання, транспортування й використання водню; - визначення фінансових механізмів та економічних стимулів для підтримки розвитку водневої галузі; - внесення змін до законодавства України, що сприятимуть розвитку інфраструктури для виробництва, зберігання, транспортування та споживання водню, включно із заправними станціями та мережами трубопроводів; - встановлення правил та стандартів, які відповідають міжнародним нормам. Широке використання водню як високоефективного і екологічно прийняттого енергоносія, а також паливних комірок, здатних з мінімальними втратами перетворювати хімічну енергію водню на електричну, останніми роками розглядається як найперспективніший шлях до істотного скорочення шкідливих викидів в атмосферу [146].

В додатку В1 представлена характеристика стратегіми (визначальні аспекти розвитку) водневої економіки в різних країнах в порівнянні з Україною за ключовими критеріями її розбудови (національні стратегії, інвестиції, виробництво та використання водню, технологічні досягнення). Країни обирають різні стратегічні підходи до розвитку водневої економіки. Наприклад, Німеччина і Японія приділяють велику увагу транспорту та енергетиці, тоді як США та Китай зосереджуються на промисловості та зменшенні викидів. Китай, США та Японія інвестують значні суми в розвиток водневої інфраструктури, що дозволяє їм лідирувати в цьому напрямку. Китай є лідером у виробництві водню, тоді як Німеччина активно розвиває інфраструктуру для зеленого водню. Кожна країна фокусується на певних технологічних розробках, як-от водневі паливні елементи для автомобілів і вантажівок (США), водневі заправні станції (Німеччина), або інфраструктура для експорту водню (Австралія).

У розвинутих країнах, таких як Німеччина, Японія, Південна Корея та Австралія, стратегічні ініціативи розвитку водневої економіки передбачають інвестування значних ресурсів у дослідження та розробки, створення водневої інфраструктури, а також стимулювання приватного сектора до впровадження інновацій. Наприклад, Німеччина вже затвердила національну водневу стратегію, яка передбачає інвестування понад 9 мільярдів євро у розвиток водневих технологій до 2030 року. Японія та Південна Корея

активно розвивають водневі автомобілі та планують створення національної мережі водневих заправних станцій [147].

Німеччина фокусується на інвестиціях у дослідження та інфраструктуру, що включає будівництво водневих електролізерів і розширення інфраструктури для підтримки водневої економіки. Німеччина планує збільшити виробництво «зеленого» водню до 5 ГВт. Це допоможе забезпечити країну чистим воднем для промисловості та транспорту, сприяючи досягненню кліматичних цілей. Японія зосереджена на розвитку водневого транспорту та створенні інфраструктури для водневих заправних станцій. Це включає розширення мережі водневих заправок і підтримку виробництва водневих автомобілів. Японія планує створити 200 водневих заправок та досягти 800 тисяч водневих автомобілів. Це має на меті сприяти популяризації водневого транспорту та зниженню викидів CO₂ [148]. Австралія фокусується на розвитку експорту водню, включаючи розробку технологій для ефективного виробництва та транспортування водню. Австралія має намір збільшити експорт водню до 10 млрд доларів. Це допоможе країні стати провідним постачальником водню на світовому ринку, використовуючи свої природні ресурси та технологічний потенціал. Наведені ініціативи демонструють різні підходи до розвитку водневої економіки в залежності від специфіки кожної країни, що включає як внутрішнє споживання, так і міжнародний експорт водню [149].

Відповідно до урядових ініціатив основні стратегічні пріоритети розвитку водневої економіки в Україні у порівнянні з провідними розвиненими країнами світу представлено у додатку Г1 Розвиток водневої економіки стає ключовим елементом стратегій багатьох країн, що прагнуть до декарбонізації своїх економік та зменшення залежності від викопного палива. Хоча підходи і темпи розвитку водневої інфраструктури різняться, спільною метою є створення стійкої та конкурентоспроможної енергетичної системи, заснованої на використанні водню як екологічно чистого джерела енергії. Міжнародне співробітництво та інвестиції у водневі технології є ключовими факторами успішного розвитку цієї галузі у майбутньому [150].

Обсяги залучення інвестицій у розвиток водневої економіки та результати запровадження водневих проєктів суттєво відрізняються по країнам (рис. 2.12). США та Китай є лідерами за загальним обсягом інвестицій у водневі проєкти. Німеччина і Японія

також мають значний рівень інвестицій, відповідно 11,2 млрд. USD і 9,3 млрд. USD. Це свідчить про активну участь цих країн у розвитку водневої економіки, але з меншими обсягами в порівнянні з США і Китаєм.

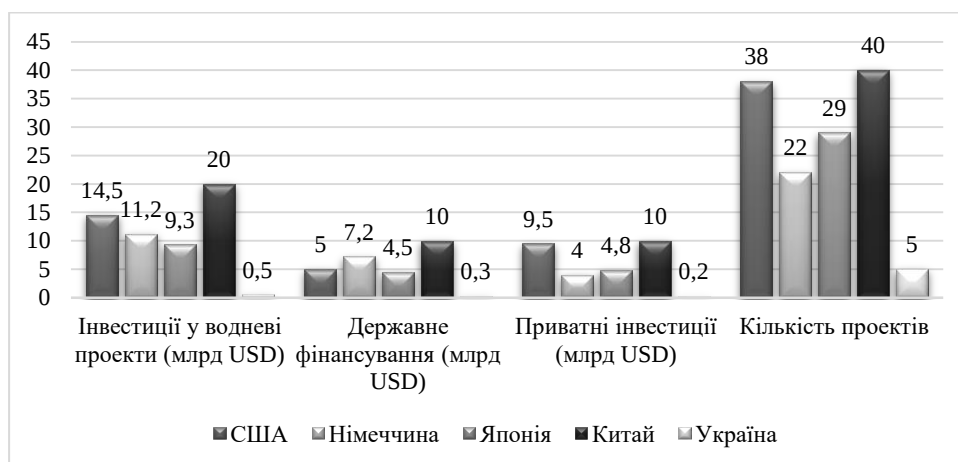


Рис. 2.12 – Цільове інвестування розвитку водневої економіки в Україні та економічно розвинених країнах за 2021-2023 рр.

Джерело: складено автором на основі [151]

Україна має найменші обсяги інвестицій у водневу економіку – 0,5 млрд. USD. Це вказує на те, що розвиток водневої економіки знаходиться на початковому етапі або потребує додаткових стимулів для залучення більшого обсягу інвестицій. Державне фінансування є суттєвою частиною інвестицій у всіх країнах. Китай має найбільшу кількість водневих проектів (40), що підтверджує його провідну роль у розвитку водневої економіки. США також активно розвивають водневі проекти (38 проектів), що свідчить про масштабні інвестиції у дану галузь. Німеччина і Японія мають меншу кількість проектів (22 і 29 відповідно), що може відображати більш зосереджений підхід до розвитку конкретних напрямків водневої економіки. Україна має лише 5 проектів, що вказує на початковий етап розвитку водневої економіки в країні.

Результативність розвитку водневої економіки в різних країнах доцільно оцінювати за цільовими індикаторами (рис. 2.13).

Китай є найбільш амбітною країною в планах розвитку водневої економіки, демонструючи найвищі показники за всіма критеріями. США активно підтримують розвиток водневих технологій, зосереджуючись на значному виробництві водню і скороченні викидів. Німеччина та Японія обрали більш зважений підхід, що

передбачає значний розвиток інфраструктури та помірне скорочення викидів CO₂.

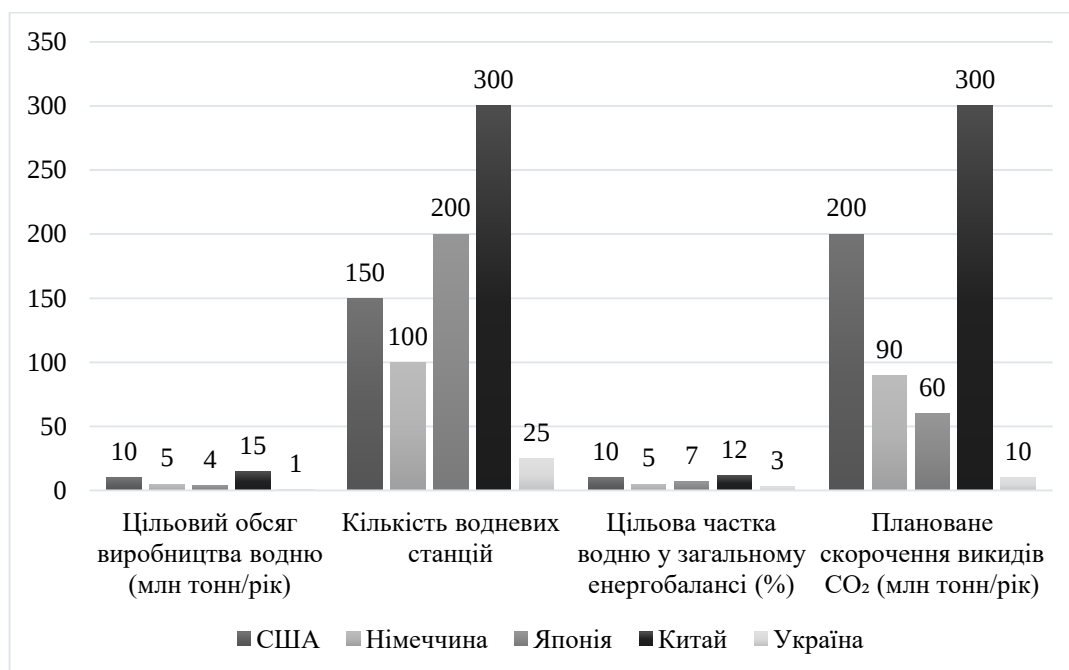


Рис. 2.13. – Цільові індикатори розвитку водневої економіки в Україні та розвинених країнах світу до 2030 року

Джерело: складено авторами на основі [152]

Україна знаходиться на початковому етапі розвитку водневої економіки, і її цілі вказують на потребу в залученні додаткових ресурсів і інвестицій для досягнення більш амбітних показників. Ключові водневі проєкти та їх вплив на економіку за 2021-2023 рр. (табл. 2.7.).

Китай і США є лідерами в інвестиціях і потенціалі виробництва водню, що підкреслює їхні амбітні плани в розвитку водневої економіки. Вони мають значний вплив на глобальний ринок водню та економіку. Німеччина і Японія демонструють помірний рівень інвестицій і потенціалу, але їхні проєкти є важливими для їхніх національних стратегій у галузі відновлюваної енергетики. Україна знаходиться на початковій стадії розвитку водневої економіки і потребує значних додаткових інвестицій та підтримки для досягнення більш амбітних цілей у цій сфері.

Воднева економіка активно розвивається в усьому світі, і водень, вироблений методом електролізу з використанням вітрової або сонячної енергії,

має перспективи для широкого застосування в різних сферах економічної діяльності.

Таблиця 2.7.

Ключові водневі проекти України та розвинених країн світу, їх вплив на економіку за 2021-2023 рр.

Країна	Проект	Рік запуску	Інвестиції (млрд USD)	Потенціал виробництва водню (тис. т/рік)	Створення робочих місць
США	Green Hydrogen Initiative	2022	4,0	500	5000
Німеччина	National Hydrogen Strategy	2021	2,5	200	2500
Японія	Fukushima Hydrogen Project	2021	1,8	150	1800
Китай	Hebei Hydrogen Energy Project	2023	5,5	700	8000
Україна	Hydrogen Valley Ukraine	2023	0,2	50	300

Джерело: складено автором на основі [153]

Для зменшення викидів парникових газів, насамперед двоокису вуглецю, країни все більше орієнтуються на використання «зеленого» водню як кліматично нейтрального джерела енергії та активно розробляють національні водневі стратегії. За прогнозами експертів, до 2050 року попит на водень в Європі може зрости вісім разів порівняно з 2020 роком, досягнувши 2500 ТВт·год на рік [154].

Державна підтримка в країнах виступає значним стимулом розвитку водневої економіки (табл. 2.8.). Китай і США мають найвищі рівні державної підтримки, включаючи субсидії та інфраструктурні інвестиції, що допомагає їм бути лідерами у розвитку водневої економіки. Німеччина також проявляє сильну підтримку через субсидії і пільгові кредити, разом з амбітними цілями щодо скорочення викидів. Японія акцентує увагу на інноваціях у сфері досліджень і розробок, що підтримує її водневу економіку. Україна має обмежені ресурси та цілі, що вказує на початкову стадію розвитку водневої економіки та необхідність значного збільшення інвестицій і державної підтримки для досягнення значущих результатів.

Таблиця 2.8.

Державна підтримка розвитку водневої економіки в різних країнах

Країна	Субсидії на виробництво (млн. USD)	Податкові пільги	Інфраструктурні інвестиції (млрд USD)	Цілі щодо скорочення викидів CO₂ (%)
США	500	Знижка на корпоративний податок	3,0	30
Німеччина	300	Пільговий кредит для інвесторів	2,0	40
Японія	400	Відшкодування витрат на R&D	1,5	20
Китай	700	Податкові знижки для виробників	5,0	25
Україна	20	Пільговий тариф на електроенергію	0,1	10

Джерело: складено автором на основі [155]

Розвиток водневої економіки в Україні є перспективним напрямком у контексті переходу до відновлюваних джерел енергії та зменшення залежності від викопного палива. Проте, війна, яка розпочалася в 2022 році, значно вплинула на енергетичний сектор країни, зокрема на розвиток водневих технологій. Попри складні умови, Україна продовжує розробляти стратегії розвитку водневої економіки, які можуть допомогти у відновленні та трансформації енергетичного сектору [156].

Війна призвела до значних руйнувань енергетичної інфраструктури України, що створило необхідність відновлення та модернізації енергетичної системи. Одним із ключових напрямків є інтеграція водневих технологій у процес відновлення. Впровадження водневих електролізерів та паливних елементів дозволяє створювати децентралізовані системи виробництва та зберігання енергії, що підвищує стійкість енергетичної інфраструктури до зовнішніх загроз та забезпечує енергетичну безпеку регіонів.

Україна має значний потенціал для виробництва «зеленого» водню завдяки наявності значних ресурсів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), таких як вітрова та сонячна енергія. Попри виклики, пов'язані з війною, Україна може розглядатися як потенційний експортер «зеленого» водню до країн Європейського Союзу (ЄС), які активно розробляють свої водневі стратегії. Відповідно до угоди про асоціацію з ЄС,

Україна вже включена до планів ЄС щодо створення спільного водневого ринку, і це створює додаткові можливості для залучення інвестицій у водневі проекти [157].

В умовах війни Україна активно шукає міжнародну підтримку для реалізації водневих проєктів. Європейські країни, а також міжнародні організації, такі як Світовий банк та Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР), готові інвестувати у розвиток водневої економіки в Україні. Україна вже бере участь у кількох європейських ініціативах та проєктах, спрямованих на розвиток водневих технологій. Крім того, в Україні створюються нові механізми залучення приватних інвесторів, зокрема через запровадження спеціальних економічних зон та сприяння залученню «зелених» інвестицій. Це сприяє розвитку інноваційних водневих технологій та залученню нових учасників до цього ринку [158].

Україна наразі розробляє власну національну водневу стратегію, яка передбачає інтеграцію до європейської водневої економіки. Важливим кроком є розробка та реалізація проєктів з виробництва «зеленого» водню з використанням відновлюваних джерел енергії, таких як вітрові та сонячні електростанції. Однак, на сьогоднішній день, ключовими викликами залишаються фінансування, розробка інфраструктури та налагодження співпраці з міжнародними партнерами (табл. 2.9.).

Основні напрямки розвитку водневої економіки в Україні включають розвиток виробництва водню, інфраструктуру зберігання та транспортування водню, а також створення нормативно-правової бази для стимулювання водневих інвестицій. Під час війни важливим напрямком є розвиток водневої інфраструктури, включаючи будівництво водневих заправних станцій, сховищ для водню, модернізацію газопроводів для транспортування водню та встановлення водневих електролізерів на підприємствах. Українські науково-дослідні інститути та університети також продовжують дослідження у сфері водневої енергетики, зокрема щодо нових методів зберігання водню, підвищення ефективності його виробництва та транспортування.

Війна в Україні значно ускладнила розвиток водневої економіки, проте країна продовжує шукати можливості для впровадження водневих технологій у своїй енергетичній системі. Інтеграція водню в процес відновлення інфраструктури, розвиток «зеленого» водню для експорту, використання водню в промисловості та транспорті,

залучення міжнародної підтримки і розвиток водневої інфраструктури є основними напрямками розвитку водневої економіки України під час війни. Продовження цих зусиль дозволить Україні зміцнити свою енергетичну незалежність, знизити викиди парникових газів та інтегруватися у європейський водневий ринок [159].

Таблиця 2.9.

Основні напрями розвитку водневої економіки в Україні

Напрямок	Змістовна характеристика	Цільові показники до 2030 р.
Виробництво водню	Виробництво з ВДЕ	2–5 ГВт потужностей
Інфраструктура	Зберігання та транспорт	+50% до існуючої інфраструктури
Водневий транспорт	Громадський і приватний	100 заправних станцій
Нормативна база	Законодавство й стимули	Національна стратегія
Наука та інновації	Фінансування НДДКР	10% держфінансування
Міжнародна співпраця	Партнерства з ЄС	Участь у 5+ проєктах
Експорт водню	Поставки до ЄС	500 млн євро/рік

Джерело: складено авторами на основі [160]

Україна активно розробляє національну водневу стратегію з урахуванням сучасних енергетичних викликів, міжнародних зобов'язань і перспективної інтеграції в європейський водневий ринок. Основним орієнтиром є «Hydrogen Roadmap Europe 2019», адаптований під українські реалії з урахуванням досліджень НАН України.

Проєкти стратегічних документів передбачають поетапну реалізацію розвитку водневої економіки. На короткостроковому етапі (2022–2025 рр.) основна увага зосереджена на створенні інституційної бази та запуску пілотних проєктів. У середньостроковій перспективі (2026–2030 рр.) акцент робиться на розширенні виробничих потужностей і розвитку інфраструктури. Довгостроковий етап (2031–2050 рр.) передбачає зміцнення експортного потенціалу та повноцінну інтеграцію України у європейські водневі ринки.

Ці плани передбачають поступове створення умов для виробництва «зеленого» водню, використання його в енергетиці, транспорті та промисловості. Особлива увага приділяється створенню нормативно-правової бази, ліцензуванню, технічним стандартам і залученню інвестицій.

У 2024 році презентовано оновлений проєкт Стратегії до 2050 року, який визначає ключові сектори: електроенергетика, транспорт, промисловість, теплопостачання, а також

напрями експортної діяльності. Пріоритетами є сертифікація за стандартами ЄС, модернізація газотранспортної системи для водню, формування конкурентного ринку.

Найбільші бар'єри – нестача фінансування, нерозвинена інфраструктура, слабе нормативне забезпечення. Однак співпраця з ЄС, ЄБРР, міжнародними фондами та запровадження пільгових механізмів відкривають перспективи для масштабування галузі. Стратегія також передбачає участь у щонайменше 5 міжнародних проєктах, розвиток 100 водневих заправок і потенціал виробництва 2–5 ГВт «зеленого» водню до 2030 року.

Таким чином, національна стратегія водневої енергетики до 2050 року закладає підґрунтя для переходу України до декарбонізованої енергетичної моделі, інтегрованої з європейським водневим ринком [161].

Таким чином, за результатами контент-аналізу вітчизняних стратегічних ініціатив слід констатувати, що Україна продовжує активно розвивати водневу економіку, реалізуючи національні стратегії, інвестуючи в інфраструктуру та активно співпрацюючи з міжнародними партнерами. Цільові стратегічні орієнтири спрямовані на досягнення сталого розвитку, зменшення викидів парникових газів та інтеграцію в глобальні водневі ринки.

Воднева економіка стає важливим інструментом для переходу до сталого розвитку та досягнення цілей енергетичної безпеки. Аналіз стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки в різних країнах світу показав, що існує значна різноманітність підходів та стратегій, які відрізняються за обсягом фінансування, акцентом на дослідженнях та розвитком інфраструктури. Україна, хоча і перебуває на початкових етапах розробки власної водневої стратегії, має великий потенціал для розвитку цієї галузі за умови активної співпраці з міжнародними партнерами та залучення інвестицій.

Для розвитку водневої галузі в Україні необхідна передусім державна підтримка у вигляді гармонізованого з європейськими нормами законодавства та прозорих правил під час отримання необхідної дозвільної документації. Розвиток водневої енергетики виступає необхідним елементом післявоєнного відновлення країни, що має відбуватися з урахуванням принципів «зеленої» економіки, при цьому позиціонування України у новій світовій водневій економіці має враховувати насамперед національні інтереси.

2.3. Оцінювання потенціалу розвитку водневої економіки в Україні в розрізі її окремих складових (виробництво, зберігання, транспортування, споживання). Проблеми інтеграції ВДЕ в емпіричну енергосистему Євросоюзу

Україна володіє значним технічним потенціалом для виробництва зеленого водню завдяки високому рівню сонячної інсоляції на півдні, наявності вітрових ресурсів в приазовських та причорноморських регіонах, а також наявності великої кількості сільськогосподарських земель, які можуть використовуватись для розвитку біоенергетики [162]. Згідно з оцінками Держенергоефективності, потенціал виробництва водню в Україні за допомогою ВДЕ може перевищувати 5 млн тонн на рік, що дає можливість Україні стати експортером водню в межах Європейського водневого коридору [163].

У рамках форсайт-аналізу енергетичних сценаріїв до 2050 року, водень розглядається як ключовий інструмент для декарбонізації енергетики, особливо в транспортному, хімічному та металургійному секторах [164]. Аналіз світових трендів уможлиблює передбачити зростання глобального попиту на зелений водень до 600 млн тонн у 2050 році, при цьому частка України може становити до 5% за умови реалізації стратегічних інвестиційних проєктів [165].

Ключовим викликом залишається інтеграція великомасштабної генерації з ВДЕ в нестабільну електромережу та необхідність розвитку гнучких систем управління навантаженнями та зберігання енергії. У цьому контексті водень виконує роль акумулятора енергії, здатного збалансувати пікові навантаження, підвищити надійність енергосистеми та забезпечити сезонне зберігання [166].

Підвищення ефективності виробництва водню можливе за рахунок розвитку електролізних установок нового покоління, зокрема твердооксидних електролізерів (SOEC), які мають вищу ефективність перетворення енергії порівняно з традиційними лужними та PEM-електролізерами [166].

Для розвитку зеленого водню в Україні потрібне стратегічне планування з форсайт-інструментами. Синій водень – це проміжна технологія на шляху до повної декарбонізації енергетики, що базується на паровому риформінгу природного газу з уловлюванням CO₂ (CCS). Україна має для цього відповідні передумови: розгалужену ГТС, ресурси біометану, та геологічні формації, придатні для зберігання вуглекислого газу (до 400 млн тонн CO₂) [167].

За оцінками НАН України, потенціал виробництва синього водню – 1,5–2 млн тонн на рік. Сучасні установки забезпечують до 95% уловлювання CO₂, що дозволяє значно знизити вуглецевий слід [168]. У форсайт-сценаріях до 2035 року частка синього водню в балансі ЄС – 20–30%, що може бути релевантним і для України.

Однак ефективна реалізація цього напрямку потребує модернізації інфраструктури, створення регуляторного поля та іноземних інвестицій, особливо в сфері CCS [169]. Сценарне планування та інтеграція в стратегічні моделі водневої економіки повинні враховувати роль синього водню як перехідного ресурсу [170; 171; 172].

Однак, реалізація потенціалу синього водню вимагає створення відповідного регуляторного середовища, стимулів для залучення інвестицій та партнерств з міжнародними компаніями, які вже мають практичний досвід у впровадженні CCS-проектів. Важливо також інтегрувати синій водень у форсайт-моделі стратегічного розвитку водневої економіки України, з урахуванням сценаріїв декарбонізації, безпеки постачань та енергетичної автономії в умовах воєнних і післявоєнних ризиків [173].

Географічні особливості України створюють умови для формування регіональних центрів виробництва водню. Південь (Одещина, Миколаївщина, Херсонщина) має найкращі умови для сонячної генерації; південний схід (Запоріжжя, Дніпропетровськ, Донецщина) — для вітрової енергетики та синього водню з використанням промислових викидів CO₂.

У центральних регіонах можливе виробництво біоводню на основі сільгоспвідходів та біометану, а західні області мають геологічні формації для зберігання CO₂ та вигідну транскордонну інфраструктуру. Північ може бути перспективною зоною для підземного зберігання водню (соляні каверни, відпрацьовані газові родовища).

Просторове форсайт-картування має враховувати наявність ВДЕ, промислових вузлів і логістики для децентралізованої генерації водню. До 2035 року прогнозується створення 5–6 регіональних хабів у кооперації з міжнародними партнерами [174; 175;]. Географічний розподіл ресурсної бази для виробництва водню в регіонах України, з акцентом на типи водню, джерела енергії, інфраструктурні передумови та можливості експорту наведені в додатку Д1.

Україна має значний потенціал для виробництва зеленого водню завдяки високій сонячній інсоляції на півдні (1500–1600 кВт·год/м²/рік), вітровим ресурсам Приазов'я та Причорномор'я, а також біомасі в центральних областях. Згідно з оцінками Держенергоефективності, потенціал виробництва водню з ВДЕ — понад 5 млн тонн/рік, що дозволяє Україні стати експортером у рамках Європейського водневого коридору.

До 2050 року, за умов стратегічних інвестицій, частка України у світовому ринку зеленого водню може сягнути до 5%. Водночас інтеграція ВДЕ в енергосистему вимагає розвитку гнучких систем зберігання та управління, де водень може виступати акумулятором та засобом сезонного балансування енергії [176; 177; 178; 179; 180].

Україна має обмежену, але наявну промислову базу для виробництва водню, зокрема в хімічній і металургійній галузях, де водень використовується як вторинний продукт. Однак більшість інфраструктури застаріла та потребує модернізації [181; 182; 183].

Машинобудівні підприємства мають потенціал для виготовлення компонентів водневої інфраструктури (електролізери, компресори, турбіни). Сучасні виклики вимагають інтеграції інноваційних технологій, цифровізації та автоматизації — в межах Індустрії 4.0 [184].

Згідно з форсайт-дослідженнями, до 2030–2040 років за умови держпідтримки та трансферу технологій можливе створення технологічних кластерів для розвитку водневої інфраструктури. Підприємства потребують модернізації потужностей і адаптації до нових технологій із доступом до капіталу й міжнародного партнерства [185]. Регіональна оцінка технологічної готовності до масштабного виробництва водню в Україні наведена в додаток Е1.

Таким чином, Україна має часткову технологічну готовність до масштабного виробництва водню, однак для повноцінного розвитку цього напрямку необхідна модернізація виробничих потужностей, адаптація до нових технологій і створення інноваційно-промислових кластерів із доступом до капіталу, знань і міжнародного партнерства.

Вартість виробництва водню в Україні залежить від типу технології, регіону та масштабу. За оцінками, зелений водень (електроліз з ВДЕ) коштує 2,5–4,5 євро/кг, а синій водень (риформінг із уловлюванням CO₂) – 1,8–2,2 євро/кг. Собівартість сірого водню вища – 3,0–4,0 євро/кг, через високий вуглецевий слід [186; 187].

До 2035 року за умови розвитку ВДЕ, масштабування електролізу та підтримки держави, вартість зеленого водню може знизитись до 1,5–2 євро/кг, що зробить його конкурентоспроможним для внутрішнього ринку та експорту [188; 189; 190]. Деталізація вартісної ефективності різних моделей виробництва водню в Україні наведена в табл. 2.10.

Таблиця 2.10.

Порівняльна вартість виробництва різних моделей водню в Україні

Модель виробництва водню	Технологія	Вартість виробництва (євро/кг)	Особливості
Зелений водень	Електроліз води за допомогою ВДЕ	2.5–4.5	Використовує енергію з ВДЕ, без викидів CO ₂
Синій водень	Риформінг природного газу + уловлювання CO ₂	1.8–2.2	Використовує існуючу інфраструктуру, потребує технологій уловлювання CO ₂
Сірий водень	Риформінг природного газу	3.0–4.0	Найбільш доступна за технологією, але без уловлювання CO ₂

Джерело: розроблено та побудовано автором на основі [191; 192; 193; 194; 195]

Таким чином, форсайт-орієнтоване оцінювання вартісної ефективності демонструє доцільність поступового переходу до зелених моделей за умови активної інституційної підтримки, регіональної оптимізації виробництва та інтеграції з європейським ринком водню.

Ефективне зберігання водню – критичний елемент водневої економіки, особливо через сезонні коливання виробництва ВДЕ. В Україні можлива адаптація частини

інфраструктури Укртрансгазу, а також використання підземних сховищ у соляних кавернах і відпрацьованих газових родовищах (Закарпаття, Прикарпаття) [196; 197].

Сценарії розвитку передбачають потребу у сховищах на 0,5–1 млрд м³/рік до 2050 року. Це потребує поєднання локальних резервуарів і масштабних підземних сховищ [198; 199].

Інноваційні способи зберігання (металогідриди, наноматеріали, графен) розробляються в Україні, однак потребують державної підтримки для комерціалізації.

Порівняння типів зберігання водню, доповнене європейськими показниками для порівняння з українськими реаліями наведені в додатку Ж1. Ця таблиця дає змогу зіставити можливості розвитку інфраструктури зберігання водню в Україні з практиками ЄС у контексті форсайту.

Таким чином, ефективне вирішення питання зберігання водню вимагає не лише технічного оновлення, а й довгострокового стратегічного планування, побудованого на форсайт-прогнозуванні технологічних, економічних і безпекових сценаріїв.

Україна має потенціал для транспортування водню завдяки наявній газотранспортній системі (понад 38 тис. км трубопроводів), частину якої можливо адаптувати для водневих сумішей. Згідно з оцінками GTSOU, близько 30% трубопроводів можуть передавати до 20% H₂ без значної модернізації [200; 201; 201; 202].

Крім того, перспективним є використання залізничного та автомобільного транспорту для перевезення водню в стиснутому або рідкому стані, особливо на локальному рівні або в напрямку портів [203; 204].

Сценарне планування передбачає поступову модернізацію газової інфраструктури, створення спеціалізованих вузлів перевалки водню та розвиток «останньої милі» логістики [205]. Детальне порівняння транспортних рішень наведено в табл. 2.11.

Таким чином, Україна має інфраструктурний потенціал для транспортування водню, особливо через газову систему, проте реалізація цього потенціалу потребує суттєвих інвестицій у модернізацію, гармонізацію стандартів та інтеграцію з європейською водневою логістикою. Форсайт-інструменти дозволяють визначити оптимальні шляхи розвитку інфраструктури з урахуванням національних пріоритетів і міжнародного ринку.

Українська ГТС – одна з найбільших у Європі, з протяжністю понад 38 тис. км. З огляду на спад транзиту природного газу та європейський курс на декарбонізацію, вона може стати основою для транспортування водню або H_2 - CH_4 сумішшю [206; 207; 208; 209].

Таблиця 2.11.

Порівняння методів транспортування водню в Україні за ключовими параметрами

Параметр	Газопроводи	Залізниця	Автомобільний транспорт
Технічна зрілість	Висока (при транспортуванні CH_4); середня для H_2	Середня (потребує модернізації складу)	Середня (існують пілотні проекти)
Необхідність модернізації	Висока для чистого H_2 (через крихкість металів)	Висока (спеццистерни, термоізоляція)	Помірна (композитні балони)
Обсяг перевезення	Дуже високий (1000+ т/день)	Високий (200–500 т/рейс)	Низький (до 20 т/рейс)
Інвестиційні витрати	Високі (особливо при модернізації)	Середні (розвиток вузлів, інфраструктури)	Низькі для пілотних проектів
Операційні витрати	Низькі при використанні суміші CH_4+H_2	Середні	Високі при далеких перевезеннях
Гнучкість маршруту	Низька (фіксована інфраструктура)	Середня (обмежена мережею УЗ)	Висока (будь-який напрямок)
Безпека транспортування	Висока при малій концентрації H_2	Середня (необхідні додаткові заходи)	Середня (залежить від стану контейнерів)
Екологічний вплив	Мінімальний (при герметичності)	Мінімальний (електровози)	Середній (ДВЗ або електротяга)
Перспективи розвитку	Високі (європейські інтеграційні проекти)	Високі для внутрішніх перевезень	Високі для локальних потреб

Джерело: розроблено та побудовано автором на основі [210; 211; 212; 213; 214; 215]

Пілотні дослідження свідчать, що до 30% водню в суміші можуть передаватися без значної модернізації на окремих ділянках. Основними технічними викликами є: переатестація трубопроводів, модернізація компресорних станцій, а також встановлення точного обладнання для обліку водню [216; 217].

У рамках форсайт-підходу адаптація ГТС передбачає поступове підвищення частки водню в суміші до 20% до 2035 року, з подальшим переходом деяких напрямків на транспортування чистого водню [218; 219; 220]. Порівняння варіантів адаптації різних ділянок газотранспортної системи (ГТС) України до транспортування водню за

основними технічними критеріями, з урахуванням регіональних особливостей наведено в додатку З1.

Таким чином, технічна адаптація ГТС України є технічно здійсненою у коротко- та середньостроковій перспективі за умови реалізації поетапного плану модернізації, що ґрунтується на форсайт-моделюванні ризиків, витрат та соціально-економічних вигод.

Україна має високий експортний потенціал у сфері водню, завдяки стратегічному розташуванню, наявності потужної ГТС та портів на Чорному морі. Основними ринками збуту є країни ЄС (насамперед Німеччина, Польща), а також Східна Азія (Японія, Південна Корея), які планують значне нарощування імпорту водню до 2030 року [221].

Проект H2-Ukraine передбачає адаптацію частини ГТС для експорту водню до Європи, що може суттєво знизити логістичні витрати. Також розглядається транспортування водню в рідкому або аміачному вигляді через порти Одеси, Миколаєва, Чорноморська [222; 223].

Експортна стратегія має враховувати технічну готовність інфраструктури, економічну доцільність і відповідність екологічним стандартам ЄС та Азії. За умов масштабного виробництва та підтримки інвестицій, ціна українського водню може знизитись до 1,5–2 €/кг, що забезпечить його конкурентоспроможність на зовнішніх ринках.

Технічні виклики при транспортуванні водню через наявну газотранспортну систему України включають необхідність її адаптації до транспортування газу з високим вмістом водню. Це вимагає модернізації трубопроводів, компресорних станцій та обладнання для безпечного транспортування водню. Окрім цього, Україні необхідно розвивати логістичні маршрути для транспортування водню в рідкому вигляді через порти Чорного моря, що потребує значних інвестицій у будівництво нових терміналів та спеціалізованих суден для водню [224].

Економічні виклики зводяться до необхідності забезпечення конкурентоспроможних цін на водень для експорту. Прогнози щодо вартості водню в Україні залежать від розвитку внутрішніх виробничих потужностей, рівня підтримки інвестицій та розвитку інфраструктури. Як зазначають експерти, ціна на водень в Україні

може знизитися до 1,5–2 доларів за кг при впровадженні технологій масштабного виробництва та інтеграції з європейським ринком [225].

Внутрішній попит на водень в Україні формується в трьох основних секторах: енергетиці, транспорті та промисловості. У сфері енергетики водень може використовуватись як акумулятор надлишкової енергії з відновлюваних джерел, а також як паливо для електростанцій, зокрема у газових турбінах і ТЕЦ. Згідно з прогнозами, до 2030 року водень здатен покривати до 5% енергетичних потреб України. У транспортному секторі перспективними є залізничні проєкти (наприклад, H2-Train), водневі автобуси та вантажівки. Уже реалізовано пілотний проєкт із водневими автобусами в Києві. За умови розбудови інфраструктури та стимулювання попиту частка водневого транспорту може значно зрости до 2030 року [226; 227].

У промисловості водень має потенціал для застосування у виробництві аміаку, метанолу, а також у процесах декарбонізації важкої індустрії, зокрема в металургії. Заміна коксу воднем у доменному виробництві сталі дозволяє суттєво зменшити викиди CO₂ або повністю їх уникнути. Цементна промисловість також може скоротити вуглецевий слід шляхом використання водню як палива в процесах випалювання. Таким чином, внутрішнє споживання водню є стратегічно важливим напрямом для кліматичної трансформації української економіки [228; 229; 230].

За прогнозами, водень буде використовуватися для виробництва зеленого аміаку, що дозволить Україні стати важливим гравцем на світовому ринку добрив, де попит на «зелений» аміак продовжує зростати. Перехід до водневих технологій у промисловості також буде стимулювати розвиток інфраструктури та створення нових робочих місць у секторі виробництва водню [231].

Основними перешкодами для швидкого розвитку внутрішнього ринку водню в Україні є високі витрати на виробництво та транспортування водню, а також відсутність необхідної інфраструктури для зберігання і розподілу водню. Зокрема, необхідно значно інвестувати в розвиток водневої інфраструктури, будівництво водневих заправок для транспорту та модернізацію промислових об'єктів [232].

Одним із найбільш перспективних напрямів у контексті зменшення викидів парникових газів є використання водню для декарбонізації важкої промисловості.

Металургія та цементна промисловість займають ключові позиції серед найбільших забруднювачів атмосфери через високі рівні CO₂, що утворюються в процесі виробництва сталі, цементу та інших матеріалів [233].

Металургія є одним із найбільших джерел промислових викидів. Для виробництва сталі традиційно використовується коксовий пічний процес, що є основним джерелом CO₂. Водночас водень здатний замінити кокс в ролі відновлювача в процесах виробництва сталі, таких як водневе відновлення заліза (H₂-DRI – Hydrogen-based Direct Reduction Iron) [234].

Застосування водню дозволяє знизити викиди CO₂ до нуля, що є значним кроком у боротьбі з глобальним потеплінням. Наразі є кілька перспективних досліджень у світі, що підтверджують ефективність водневих технологій у металургії. В Україні спостерігається певний інтерес до цих технологій, зокрема в контексті державних програм з розвитку «зеленого» водню [235].

Цементна промисловість також є значним джерелом викидів CO₂, оскільки основний процес – це кальцинація вапняку при температурі понад 900°C, що супроводжується виділенням CO₂. Для зменшення цього процесу пропонуються різні методи, зокрема використання водню як палива для випалу вапняку. Цей підхід дозволяє зменшити споживання вуглецевих джерел енергії та знижує викиди CO₂ в атмосферу [236].

Дослідження показують, що при використанні водню в цементному виробництві можна істотно знизити викиди, досягнувши значних екологічних вигод. Українські цементні підприємства також можуть інтегрувати водневі технології, однак для цього необхідно розробити відповідну інфраструктуру та здійснити технічне оснащення виробництва [237].

Використання водню в декарбонізації важкої промисловості, зокрема металургії та цементного виробництва, дозволяє суттєво зменшити викиди CO₂ за рахунок заміни викопного палива. Як висококалорійне паливо, водень підвищує енергоефективність технологічних процесів. Окрім екологічного ефекту, впровадження водневих технологій створює нові економічні можливості — зокрема розвиток інфраструктури виробництва, зберігання та транспортування, що сприятиме створенню нових робочих місць.

Попри значний потенціал водневих технологій, їх широке впровадження стримується низкою технічних та економічних бар'єрів. Насамперед це висока вартість виробництва, особливо «зеленого» водню, що потребує значних інвестицій у технології та інфраструктуру. Іншою проблемою є недостатня розвиненість систем зберігання і транспортування, які вимагають складних технічних рішень і значних капіталовкладень. Також більшість промислових підприємств поки що не мають готової бази для інтеграції водню у виробничі процеси. Оцінка потенціалу використання водню в декарбонізації важкої промисловості (металургія, цемент) наведена в додатку Л1.

Ці джерела забезпечують основні дані та висновки, які підтверджують теоретичну та практичну доцільність використання водню для декарбонізації важкої промисловості в Україні. Технічні, економічні та екологічні аспекти цієї технології повинні стати основою для розробки відповідних стратегій на національному рівні, щоб зменшити залежність від традиційних джерел енергії та викидів парникових газів.

Також однією з найбільш перспективних складових водневої економіки є водневий транспорт, оскільки водень як джерело енергії може стати альтернативою традиційним видам пального для автомобілів, автобусів, вантажівок, залізничного транспорту, а також для морського та авіаційного транспорту. Переваги водневих транспортних засобів включають високий енергетичний потенціал водню, екологічність (відсутність викидів CO₂), а також можливість швидкої заправки, що значно знижує час, необхідний для поповнення палива у порівнянні з електричними транспортними засобами. Однак для повномасштабного розвитку водневого транспорту потрібно вирішити ряд проблем, зокрема, з інфраструктурою водневих заправок та розвитком технологій зберігання водню.

В Україні технології водневого транспорту перебувають на стадії початкового розвитку. Однак на державному рівні вже відзначено важливість інтеграції водневих технологій у транспортну інфраструктуру країни. Перші пілотні проєкти включають дослідження можливості використання водневих технологій для міського та міжміського транспорту, зокрема для автобусів та вантажівок. Зокрема, у Києві був реалізований проєкт з використання водневих автобусів, який показав наявність високого потенціалу для зниження викидів у містах [238].

На рівні пілотних проєктів вже існують спільні розробки з використання водню для транспорту в Україні. Зокрема, досліджуються можливості створення водневих заправних станцій та розширення мережі водневих транспортних засобів на основі міжнародних досліджень, таких як досвід Німеччини та Японії.

Розвиток водневого транспорту базується на трьох ключових технологічних компонентах. По-перше, використання водневих паливних елементів забезпечує високу енергоефективність і значну дальність пробігу транспортних засобів. По-друге, критичним є створення інфраструктури заправки: наразі в Україні діє лише кілька пілотних станцій, однак планується їхнє розширення. По-третє, необхідним є впровадження ефективних технологій зберігання водню — у стиснутому або рідкому вигляді — що дозволяє зменшити габарити та масу резервуарів, адаптуючи їх до транспортних потреб.

Досвід пілотних проєктів демонструє практичну ефективність водневого транспорту. В Україні перші водневі автобуси були запущені в Києві як частина експериментальної програми з використання паливних елементів у міському середовищі. Це дозволяє оцінити доцільність впровадження водневих технологій у громадському транспорті великих міст. На міжнародному рівні прикладом є програма «H2 Mobility» у Німеччині, в межах якої вже створено понад 100 водневих заправних станцій і активно розвивається парк автобусів і вантажівок на водні. Випробування в рамках цієї програми підтверджують високу ефективність і екологічну безпеку водневого транспорту [239; 240].

Перспективи розвитку водневого транспорту в Україні пов'язані з трьома ключовими напрямками. Насамперед необхідно розвивати інфраструктуру заправки на основі вже реалізованих пілотних проєктів, що дозволить знизити експлуатаційні витрати. Важливо також залучати інвестиції — як державні, так і приватні — для підтримки інновацій та розгортання повноцінної водневої екосистеми. Окрему увагу слід приділити стимулюванню попиту через державні програми, зокрема субсидування купівлі водневого транспорту та створення сприятливих умов для його використання.

У промисловості водень має потенціал для застосування у виробництві аміаку, метанолу, а також у процесах декарбонізації важкої індустрії, зокрема в металургії. Заміна

коксу воднем у доменному виробництві сталі дозволяє суттєво зменшити викиди CO₂ або повністю їх уникнути. Цементна промисловість також може скоротити вуглецевий слід шляхом використання водню як палива в процесах випалювання. Таким чином, внутрішнє споживання водню є стратегічно важливим напрямом для кліматичної трансформації української економіки.

У промисловості водень має потенціал для застосування у виробництві аміаку, метанолу, а також у процесах декарбонізації важкої індустрії, зокрема в металургії. Заміна коксу воднем у доменному виробництві сталі дозволяє суттєво зменшити викиди CO₂ або повністю їх уникнути. Цементна промисловість також може скоротити вуглецевий слід шляхом використання водню як палива в процесах випалювання [241; 242]. Таким чином, внутрішнє споживання водню є стратегічно важливим напрямом для кліматичної трансформації української економіки.

Однією з ключових перешкод для розвитку водневої економіки в Україні є відсутність чітких стандартів і процедур сертифікації для водневих технологій. Національне законодавство поки не враховує специфіку виробництва, зберігання та транспортування водню, а стандарти безпеки, екологічності й технічної сумісності залишаються неузгодженими з європейськими та міжнародними нормами. Це обмежує впровадження водневих рішень, створює бар'єри для інвестицій і ускладнює інтеграцію України в європейський водневий ринок [243].

Для подолання цих обмежень необхідно розробити національні стандарти та адаптувати їх до вимог ЄС (зокрема стандартів ISO та CEN), а також забезпечити прозорі процедури сертифікації обладнання, інфраструктури та самого водню. Участь України в міжнародних організаціях, що займаються стандартизацією, є критично важливою для гармонізації нормативної бази та відкриття доступу до єдиного європейського ринку [244; 245; 246; 247; 248]. Порівняння основних аспектів стандартизації та сертифікації водневих рішень наведено в додатку ІІ.

Для подолання існуючих проблем в Україні необхідно розробити національні стандарти для водневих технологій і пристосувати їх до вимог ЄС. Важливим кроком є участь України в міжнародних організаціях, що займаються стандартизацією водневих технологій, таких як ISO та CEN. Це дозволить активно впливати на розробку

міжнародних стандартів і адаптувати їх до українських умов. Успішний розвиток водневої економіки в Україні вимагає від уряду підтримки інновацій у галузі сертифікації водневих рішень. Це включає фінансову підтримку підприємств, що займаються розробкою водневих технологій, а також створення експертних груп для розробки стандартів і сертифікаційних процедур, що відповідатимуть європейським вимогам.

Попри значний потенціал розвитку водневої економіки, Україна стикається з низкою економічних бар'єрів, які стримують реалізацію проєктів у цій сфері. Насамперед це висока собівартість водневих технологій, зокрема виробництва зеленого водню, що наразі поступається за ціною традиційним енергоносіям. Відсутність стимулюючої державної політики – як національних субсидій, так і податкових пільг – робить проєкти економічно не вигідними на початковому етапі [249; 250].

Також існує обмежений доступ до довгострокового капіталу і високі фінансові ризики, пов'язані з технологічною новизною та відсутністю гарантій повернення інвестицій. Недостатній розвиток внутрішнього ринку водню не дозволяє створити ефективну модель «локального попиту», що необхідна для масштабування [251; 252].

Проблемою залишається і низький рівень обізнаності учасників ринку, зокрема малого та середнього бізнесу, а також відсутність демонстраційних проєктів, які могли б підтвердити життєздатність водневих технологій. Подолання цих бар'єрів потребує комплексної політики підтримки – через пілотні програми, державне співфінансування, участь міжнародних фінансових інституцій та формування чіткої нормативно-правової бази.

Для того, щоб подолати ці економічні бар'єри, Україні необхідно розробити комплексну стратегію, яка включатиме не лише розвиток водневої інфраструктури, а й адаптацію тарифної політики. У рамках стратегічного планування водневої економіки важливо врахувати не тільки технологічні аспекти, а й економічні: здатність держави підтримувати такі проєкти через інвестиції, пільгові кредити та розвиток зелених облігацій. Тому дослідження вартості переходу до водневої економіки і відповідної тарифної політики мають бути частиною форсайт-підходу, який уможливило оцінити потенціал водневої економіки в Україні в різних сценаріях розвитку.

Підсумовуючи, можна сказати, що економічні бар'єри впровадження водневої економіки в Україні є значними, зокрема через високі капітальні витрати на створення водневої інфраструктури та необхідність адаптації тарифної політики. Для подолання цих бар'єрів необхідно врахувати міжнародний досвід, активно розвивати інвестиційні програми та субсидії для водневої енергетики, а також сприяти розвитку відповідної нормативно-правової бази.

Важливим фактором для ефективного розвитку водневої економіки в Україні є нормативно-правове забезпечення, яке регулює використання новітніх водневих технологій. Оскільки воднева енергетика є порівняно новою галуззю, чинне законодавство не повною мірою враховує специфіку її розвитку. Регуляторні обмеження можуть стати значним бар'єром на шляху впровадження водневих технологій в Україні. Це стосується не тільки стандартів безпеки, а й екологічних, економічних та технологічних аспектів, що потребують адаптації на рівні законодавства [253]. Для того щоб забезпечити гармонійний розвиток водневої економіки, важливо розробити нові нормативні акти та адаптувати існуючі закони до нових реалій водневої індустрії [254].

Регуляторні обмеження є ключовим фактором, що впливає на розвиток водневої економіки в Україні. Однією з основних проблем є відсутність чітких стандартів безпеки для технологій виробництва, зберігання та транспортування водню. Ці процеси пов'язані з ризиками високого тиску та температури, тому необхідна адаптація національних норм до європейських стандартів, зокрема EN 17124:2019, та впровадження сертифікації обладнання [255; 256].

Крім безпеки, важливим напрямом є екологічне та технологічне регулювання. Сучасне законодавство потребує перегляду в бік підтримки зеленої енергетики. Законодавчі ініціативи мають стимулювати екологічно чисте виробництво водню, передбачаючи стандарти для зеленого водню, що виробляється з відновлювальних джерел енергії [257].

Не менш важливими є економічні інструменти. Для залучення інвестицій необхідно впровадити податкові пільги, субсидії та інші стимули для компаній, які займаються водневими технологіями. Це дозволить знизити вартість виробництва, розвинути інфраструктуру та збільшити попит на водень.

Окремо слід зазначити потребу у впровадженні механізмів зелених сертифікатів, які засвідчують походження водню з відновлювальних джерел. Такий підхід дозволить інтегрувати українську водневу енергетику у міжнародний ринок та підвищить її інвестиційну привабливість.

Для розвитку водневої економіки в Україні необхідно розробити та впровадити національні стандарти, які б відповідали міжнародним вимогам. Це включає стандарти на зберігання, транспортування та використання водню в різних секторах економіки. Важливо створити систему сертифікації водневих установок, що дозволить забезпечити високий рівень безпеки.

Адаптація законодавства також передбачає створення законодавчих умов для залучення інвестицій в галузь водневої економіки. Законодавчі ініціативи повинні включати податкові пільги для виробників водню, а також для компаній, що здійснюють його транспортування та зберігання. Це дозволить знизити бар'єри для приватних інвесторів та компаній, які готові розвивати водневу інфраструктуру в Україні.

Одним з важливих аспектів є створення нормативно-правових актів, що дозволяють регулювати ринок водню в Україні. Така регуляція має передбачати чітке визначення ролі держави в підтримці водневої економіки, розвиток внутрішнього ринку водню та забезпечення його ефективного використання в енергетичних, транспортних та промислових секторах.

Для успішного розвитку водневої економіки в Україні необхідно адаптувати національне законодавство до специфіки водневих технологій. Це включає розробку нових стандартів і нормативно-правових актів, що регулюють безпеку, екологічність, економічні стимули та сертифікацію водневих технологій. Тільки за умови законодавчої підтримки і чіткої регуляції ринку водню можна створити сприятливі умови для впровадження водневих технологій в Україну, що стане основою для розвитку конкурентоспроможної водневої економіки.

Розглядаючи інтеграцію відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) в енергосистему України, можна стверджувати, що це також є важливий етап у створенні стійкої і низьковуглецевої енергетичної інфраструктури. Проте ВДЕ характеризуються значною нестабільністю генерації, що зумовлено природними умовами: сонячна енергія залежить

від часу доби і погодних умов, а вітрова – від напрямку та інтенсивності вітру. Це ставить перед енергетичними компаніями та регуляторами серйозні виклики в контексті забезпечення стабільності об'єднаної енергосистеми України (ОЕС). Враховуючи, що Україна прагне до розвитку водневої економіки як частини стратегії енергетичного переходу, важливо врахувати особливості інтеграції ВДЕ та вплив нестабільності їх генерації на енергетичну систему [258; 259].

ВДЕ мають значну залежність від природних факторів, таких як сонячна радіація або сила вітру, що робить їх генерацію непередбачуваною та змінною. Наприклад, вітрові та сонячні електростанції можуть знижувати вироблення енергії в моменти низької активності вітру або хмарності. Для України, де частка ВДЕ в енергетичному балансі на даний момент становить близько 10% [260], ця нестабільність є серйозною проблемою. Традиційні електростанції, зокрема теплові та атомні, не завжди можуть забезпечити стабільність мережі при різких коливаннях виробництва з ВДЕ.

Існуюча енергетична інфраструктура України, включаючи електричні мережі, не була спроектована з урахуванням високого рівня інтеграції ВДЕ. Системи передачі та розподілу електроенергії можуть виявитися неготовими до значних коливань генерації та потребують модернізації. Враховуючи необхідність синхронізації потужностей для забезпечення стабільної роботи енергосистеми, відсутність таких адаптаційних технологій може призвести до перевантаження ліній та виникнення аварійних ситуацій [261].

Водневі технології можуть стати важливим інструментом для збереження та використання енергії, виробленої з ВДЕ. Однак для їх ефективного впровадження необхідно розробити стратегії синхронізації виробництва водню з періодами високої генерації з ВДЕ, що дозволить не лише оптимізувати використання зеленої енергії, а й забезпечити стабільність енергетичної системи в цілому [262].

Враховуючи нестабільність ВДЕ, важливим аспектом є розвиток технологій зберігання енергії, таких як акумулятори великої ємності або технології, що дозволяють зберігати водень у великих обсягах. Це дозволить зменшити залежність енергосистеми від непередбачуваних коливань генерації з ВДЕ [263].

Україна потребує розробки чітких нормативно-правових актів, які регулюватимуть інтеграцію ВДЕ в енергетичну систему. Це включає в себе прийняття стандартів для зберігання енергії, водневих технологій, а також механізмів регулювання використання ВДЕ на основі прогнозування. Регуляторні органи повинні вивчити досвід інших країн, таких як Німеччина чи Данія, де вже активно інтегруються ВДЕ, щоб адаптувати ці практики до українських реалій.

Важливим кроком до інтеграції України в європейський енергетичний простір стала Синхронізація об'єднаної енергосистеми України (ОЕС) з європейською мережею ENTSO-E. Цей процес відкриває значні можливості для України, зокрема в контексті експорту «зеленої» енергії та виробництва водню, однак водночас породжує цілу низку викликів. Актуальність цієї теми зростає з урахуванням геополітичних викликів, потреби у децентралізації енергосистеми та розвитку відновлюваної енергетики.

У фокусі форсайт-аналізу знаходяться довгострокові сценарії розвитку енергетичної системи, в яких враховуються адаптаційні здатності інфраструктури до технологічних трендів (зокрема, водневих технологій) та зовнішньополітичних орієнтирів України [264].

Європейська мережа ENTSO-E має жорсткі вимоги до параметрів частоти, напруги та стабільності, що істотно відрізняються від стандартів, за якими працювала ОЕС України в рамках колишньої синхронізації з енергосистемами РФ і Білорусі. В умовах зростання частки ВДЕ, що відзначаються нестабільністю генерації, забезпечення технічної сумісності потребує впровадження сучасних систем управління попитом, автоматизованого диспетчерського контролю та гнучких маневрових потужностей [265].

Для інтеграції нестабільної генерації з ВДЕ та майбутнього водневого сектору в енергосистему, синхронізовану з ENTSO-E, критично важливим є наявність ефективних систем балансування. У ЄС активно використовуються батарейні станції, системи перетворення електроенергії у водень (power-to-gas), тоді як в Україні цей потенціал лише починає розкриватися [266]. Особливо перспективним є використання надлишкової генерації з ВДЕ для електролізу води з метою зберігання енергії у вигляді водню та подальшого використання у паливних елементах або турбінах.

Європейська енергомережа характеризується високим рівнем цифровізації, автоматизації та використанням алгоритмів штучного інтелекту для передбачення навантажень. В Україні ж дотепер переважає ручне або напівручне регулювання, що створює технологічну прірву між українською системою і стандартами ENTSO-E. Щоб інтегрувати потоки від ВДЕ та водневих генерацій, необхідно впроваджувати smart-grid технології, системи моніторингу якості енергії та механізми швидкого реагування [267].

Поточна нормативно-правова база України не повністю гармонізована з європейським енергетичним законодавством. Зокрема, законодавче регулювання щодо інтеграції водню як енергоносія в енергосистему перебуває на початковому етапі. Необхідно якнайшвидше ухвалити технічні регламенти, стандарти безпеки, а також моделі ринку для водневої енергетики у відповідності до Регламенту (EU) 2021/1119 (Європейський кліматичний закон) [268].

У контексті форсайт-підходу важливо розглядати не лише технічні, а й стратегічні ризики. Серед них – кіберзагрози, атаки на критичну інфраструктуру, ризики надмірної залежності від окремих транзитних потужностей тощо. Підвищення стійкості до таких викликів передбачає розвиток децентралізованих енергетичних моделей, включаючи локальні водневі кластери [269].

Узагальнення ключових аспектів щодо викликів синхронізації української енергомережі з ENTSO-E в контексті ВДЕ та водню з урахуванням форсайт-методології таведено в додатку К1.

Успішна синхронізація з ENTSO-E вимагає не лише технічної модернізації ОЕС України, а й глибокої трансформації підходів до управління енергосистемою – з акцентом на цифровізацію, балансування ВДЕ, інтеграцію водню та гармонізацію законодавства. Форсайт-методологія дозволяє заздалегідь виявити критичні точки ризику та розробити адаптивні стратегії у відповідь на комплексні виклики енергетичного майбутнього.

З урахуванням викликів та потенціалу розвитку водневої економіки, перспективними є кілька напрямів адаптації. Йдеться про інтеграцію систем зберігання енергії, зокрема гібридних рішень на основі акумуляторів і електролізерів. Необхідно також розробити національні сценарії стійкого енергетичного переходу з урахуванням водневої інфраструктури та стандартів ENTSO-E. Важливими є адаптація технічних норм і цифрових протоколів для підключення виробників ВДЕ і водню, а також поглиблення

міжнародної співпраці з країнами ENTSO-E для обміну досвідом, технічної підтримки та реалізації спільних пілотних проєктів.

Ключовим елементом формування ефективної стратегії розвитку водневої економіки є оцінка науково-дослідного потенціалу України у сфері водневої енергетики. Саме наявність наукової бази, інноваційного середовища, кадрів і технічної інфраструктури забезпечує спроможність країни не лише інтегрувати готові технології, а й створювати власні рішення у межах глобального енергетичного переходу.

Україна володіє розвиненою мережею науково-дослідних інституцій, що працюють у сфері енергетики, матеріалознавства, хімії, електрохімії та новітніх технологій. До провідних інституцій належать Інститут відновлюваної енергетики НАН України, Інститут газу НАН України, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного, НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського", ХНУРЕ, ЛНТУ тощо [270].

Згідно з аналітичними матеріалами, протягом останнього десятиліття в Україні сформувалося щонайменше 15 дослідницьких осередків, що займаються тематиками, дотичними до водневої енергетики: електролізу, паливних елементів, водневої металургії, зберігання водню, виробництва синтетичного палива [271].

У контексті форсайту науковий потенціал доцільно оцінювати не лише за кількісними показниками (кількість установ, публікацій, патентів), а і за якістю передбачувального інтелекту: здатністю генерувати довгострокові науково-технологічні сценарії, здійснювати міждисциплінарне моделювання, розробляти технологічні дорожні карти, виявляти «ключові технології прориву» (key enabling technologies) [272].

Станом на 2024 рік в Україні виконуються понад 20 тематичних наукових проєктів, пов'язаних із водневою економікою – від фундаментальних досліджень у галузі водневих матеріалів до прикладних розробок електролізерів [273]. Водночас, варто відзначити, що більшість з них є фрагментарними, фінансуються епізодично, мають обмежену координацію на міжінституційному рівні. Це знижує ефективність трансформації знань у готові рішення.

Розвиток науково-дослідного потенціалу у сфері водневої енергетики в Україні стримується низкою бар'єрів. Передусім ідеться про недостатнє державне фінансування

НДДКР та прикладних інновацій, а також слабкий рівень комерціалізації наукових результатів і обмежений зв'язок між наукою та виробництвом. Окрім цього, українські наукові установи мають обмежений доступ до міжнародних програм, таких як Horizon Europe чи Clean Hydrogen Partnership. Ще однією проблемою є низька інтеграція наукових розробок у державну енергетичну, екологічну та інноваційну політику [274; 275].

Форсайт-орієнтований підхід передбачає створення національної дослідницької дорожньої карти водневої енергетики, формування консорціумів на базі університетів, наукових установ і промислових партнерів, запуск спеціальних програм грантової підтримки для досліджень у сфері ВДЕ та водню, а також активну участь України в європейських дослідницьких ініціативах з водневої тематики [276].

Деталізація компонентів оцінки науково-дослідного потенціалу України у сфері водневої енергетики наведена додатку М1.

Таким чином, науково-дослідний потенціал України у сфері водневої енергетики є вагомим, але потребує системного підходу до модернізації, стратегічної координації та форсайтного мислення. Лише за умови створення сприятливого інституційного і фінансового середовища можлива ефективна реалізація наукових здобутків у конкретні технологічні рішення, що посилить позиції України у водневій трансформації Європи.

Повномасштабна війна в Україні, розпочата Росією у 2022 році, завдала критичних ударів по енергетичній інфраструктурі, зруйнувала електростанції, підстанції, логістичні вузли та створила глибокі виклики для реалізації будь-яких довгострокових енергетичних стратегій, включаючи водневу економіку [277]. У цьому контексті воднева енергетика вимагає особливого підходу до оцінки ризиків у трьох аспектах: безпековому, інвестиційному та технологічному.

З огляду на форсайтну методологію, необхідно розглядати ймовірні сценарії розвитку геополітичної ситуації та їхній вплив на реалізацію водневих проєктів. Один зі сценаріїв – стратегічна інтеграція України до європейської енергетичної системи через ENTSO-E, що дозволить залучати інвестиції та технології в проєкти з виробництва зеленого водню для експорту [278].

Водночас існує ризик військових пошкоджень водневої інфраструктури, яка є високотехнологічною та потенційно вразливою до атак (електролізери, компресійні

станції, трубопроводи тощо). Форсайтне прогнозування має враховувати ризики створення цільових резервних систем, у тому числі розосереджених енергетичних кластерів [279].

Ще одним значним викликом є нестабільність інвестиційного клімату: більшість міжнародних донорів, попри декларації підтримки, очікують завершення бойових дій. Тому потрібні сценарії, які враховують післявоєнне відновлення з фокусом на інституційну довіру та зелену реконструкцію, як це передбачено в ініціативі «Rebuild Ukraine» [280].

Форсайт-підхід також дозволяє ідентифікувати можливості: відновлення енергетичного сектору після війни може бути використане як шанс для переструктуризації на базі нових технологій, включаючи зелені водневі кластери. За сценарним моделюванням, частка ВДЕ у балансі України може зрости до 50% до 2040 року, що створює сприятливий фундамент для водневої генерації [281].

Висновки до другого розділу

Проведений аналіз підтвердив, що глобальна енергетична криза 2020–2023 рр., спричинена пандемією, війною в Україні та геополітичними викликами, стала каталізатором переходу до відновлюваних джерел енергії. Незважаючи на часткове зростання ВДЕ, викопне паливо досі домінує, що ускладнює досягнення кліматичних цілей через зростання викидів CO₂. Європейський Союз демонструє лідерство у впровадженні водневої економіки, тоді як Україна, попри складні умови, нарощує частку ВДЕ та має потенціал для інтеграції з європейським ринком. Світові інвестиції у водень стрімко зростають, однак ринок залишається фрагментованим, із серйозними викликами у вигляді високої вартості, відсутності уніфікованої інфраструктури та сертифікаційних механізмів. Успішна розбудова водневої економіки потребує скоординованої політики, технологічних інновацій та глобального партнерства для подолання викликів енергетичної безпеки та кліматичних змін.

Розгляд провідних міжнародних практик у сфері водневої енергетики дозволив виявити спільні тенденції та національні особливості у формуванні стратегій переходу до вуглецево-нейтральної економіки. Зокрема, більшість країн орієнтуються на розвиток «зеленого» водню як ключового інструменту глибокої декарбонізації. У стратегіях ЄС,

особливо Німеччини, простежується комплексний підхід, що поєднує внутрішнє виробництво, імпорту водню з країн із потенціалом ВДЕ та створення єдиного ринку. Країни Східної Азії, як-от Японія та Південна Корея, роблять акцент на інфраструктурній модернізації, стандартизації та довгострокових технологічних пріоритетах. Китай демонструє швидке нарощування обсягів виробництва і споживання водню, інтегруючи водневі рішення у важку промисловість і транспорт. У США стимулювання водневих проєктів відбувається завдяки державній підтримці, податковим пільгам та регіональним ініціативам. Хоча підходи різняться, усі країни стикаються з викликами, серед яких – високі капітальні витрати, потреба у стабільному попиті, невизначеність у регуляторному середовищі. Ефективна реалізація стратегій потребує балансу між державним управлінням, приватними інвестиціями та науково-технічним розвитком.

Оцінка інституційного забезпечення розвитку водневої енергетики в Україні свідчить про наявність початкового нормативно-правового підґрунтя, однак рівень його зрілості та комплексності залишається недостатнім для ефективного формування водневої економіки. Прийнята у 2021 році Воднева стратегія України має декларативний характер, оскільки не супроводжується чітко визначеними механізмами реалізації, фінансування та відповідальності. Водночас позитивним є орієнтація на інтеграцію у європейський водневий ринок, що відображено у проєктах співпраці з ЄС, зокрема в межах ініціативи European Hydrogen Backbone. Незважаючи на включення водневої тематики до ключових стратегічних документів державної енергетичної політики, координація між відомствами є слабкою, а участь приватного сектору — обмеженою. Також відсутні спеціалізовані стандарти, сертифікаційні процедури та стимули для інвесторів. Україна має потенціал стати експортером «зеленого» водню, проте для цього необхідно розробити послідовну нормативну базу, визначити цільові сегменти ринку та створити сприятливе інституційне середовище. Успішна реалізація водневої політики потребує системного оновлення державного управління, з урахуванням найкращих практик ЄС та адаптації до умов післявоєнного відновлення.

Основні результати розділу опубліковані в наукових працях автора [282; 283; 284].

РОЗДІЛ 3

ІНСТРУМЕНТАРІЙ СТРАТЕГУВАННЯ РОЗБУДОВИ ВОДНЕВОЇ ЕКОНОМІКИ В УКРАЇНІ

3.1. Форсайт-підхід до стратегування економічного розвитку України в умовах невизначеності: аксіологічна місія, функціональні та індикативні компоненти

В умовах стратегічної невизначеності (війна, глобальні й технологічні зрушення) планування потребує адаптивних моделей, серед яких форсайт – ключовий інструмент. Це особливо важливо для України, яка перебуває в умовах системної трансформації та прагне до інтеграції в ЄС та ОЕСР [285; 286; 287].

Форсайт-підхід базується на комбінації кількісних (моделювання, статистика) та якісних методів (інтерв'ю, фокус-групи), що забезпечує гнучкість, глибину та контекст у стратегічному плануванні. Ключові інструменти – Delphi-опитування, тренд-аналіз, сценарне моделювання та стратегічні карти – уможливають адаптувати стратегії до динамічних викликів [288; 289]. Поєднання кількісних (моделювання, статистика) та якісних (інтерв'ю, фокус-групи) методів – одна з ключових переваг форсайту. Основні методи форсайту наведені в додатку У1. Проте, якісні методи, такі як глибинні інтерв'ю та експертні оцінки, дають можливість більш детально аналізувати соціальні, політичні та культурні аспекти, які не завжди піддаються точному вимірюванню, але спроможні істотно вплинути на розвиток країни .

Традиційні моделі стратегування мають обмеження, зокрема лінійність прогнозів, що ігнорує раптові події на кшталт «чорних лебедів» [290]. Часто спостерігається орієнтація на короткострокові цілі, що суперечить довгостроковій стійкості. Крім того, їм бракує мультиакторальності: до процесу стратегування рідко залучають ключових стейкхолдерів що негативно позначається на результатах [291; 292; 293]. Методологічні інструменти форсайту наведені в додатку Ф1.

Приклади застосування форсайту в Україні наведені в додатку Т1 Елементи системної невизначеності: джерела та наслідки наведені додатку Н.

Цей підхід формує аксіологічне ядро стратегій – набір ключових цінностей для довгострокового, стійкого та інноваційного розвитку [366]. Форсайт і аксіологія: механізми синтезу цінностей у стратегічному мисленні представлені в додатку П1 .

У межах форсайт-планування інклюзивне економічне зростання, що передбачає розвиток, за якого кожна соціальна група має рівний доступ до можливостей і вигод економіки, сприяючи зниженню нерівності та підвищенню соціальної згуртованості – це в свою чергу є ключовим орієнтиром для формування сценаріїв та індикаторів довгострокового розвитку [294; 295]. Інклюзивне зростання передбачає рівномірний розподіл доходів і ресурсів, зокрема для вразливих груп населення [296; 297]. Цей принцип повністю відповідає Цілі 10 сталого розвитку ООН – «Зменшення нерівності» [385].

Інтеграція інклюзивності у цей процес включає аналіз соціальних драйверів, таких як безробіття та вплив діджиталізації на зайнятість. Важливими є залучення стейкхолдерів через DELPHI-опитування та краудсорсинг. Сценарне моделювання охоплює прогноз до 2040 року за базовим, оптимістичним і песимістичним варіантами з оцінкою впливу політик на доходи. Індикативні інструменти включають індекси нерівності (Gini, коефіцієнт Пенда) та дорожні карти доступу до базових послуг [298; 299].

Технологічна суверенність передбачає спроможність держави самостійно розвивати критичні технології в енергетиці, ІТ та кібербезпеці без залежності від зовнішніх постачальників. У період геополітичної нестабільності вона стає гарантією безпеки та глобальної конкурентоспроможності. В енергетичному секторі це охоплює локалізацію виробництва «зелених» технологій, зокрема електролізерів і систем нагромадження енергії, що, згідно з енергостратегією України, може знизити імпортозалежність до 50 % до 2035 року. Цей підхід уможливорює виявлення технологічних обмежень й формування дорожніх карт розвитку. В ІТ-сфері важливо створювати власні дата-центри, хмарні платформи та мережі – за прикладом європейського проєкту GAIA-X. Реалізація технологічної суверенності потребує

впровадження методів прогнозування (Delphi, сценарії, roadmaps) та моніторингу показників, зокрема рівня локалізації, інвестицій у R&D та кіберстійкості [300; 301; 302; 303].

У XXI столітті стратегічне планування неможливе без урахування екологічного імперативу. Форсайт як інструмент передбачення майбутнього ґрунтується на довгостроковій орієнтації, яка включає кліматичні ризики, екосистемну рівновагу та необхідність переходу до циркулярної економіки. У цьому контексті ціннісна орієнтація на екологічну збалансованість виступає невід’ємною частиною аксіологічного підґрунтя цього підходу до стратегування економічного розвитку України, особливо в умовах її інтеграції до Європейського зеленого курсу (European Green Deal) [304; 305].

Воднева енергетика розглядається як ключовий інструмент декарбонізації промисловості, транспорту та енергетики. Але екологічна ефективність залежить від джерел, з яких отримують водень. Використання викопного палива для виробництва «сірого» водню без уловлювання викидів CO₂ може суперечити екологічним цілям. Тому форсайт-стратегія має акцентувати на розвитку «зеленого» водню, виробленого за допомогою ВДЕ – сонячної, вітрової, гідроенергетики – і формуванні відповідної інфраструктури [306].

Форсайт дозволяє змодельовати альтернативні сценарії розвитку водневої економіки України – від інноваційного прориву до технологічної стагнації – залежно від екологічних пріоритетів, політичної волі та рівня міжнародної інтеграції [307]. В свою чергу, індикативний блок цього підходу включає низку екологічних індикаторів, які дозволяють оцінити сталий розвиток водневої економіки. Основні індикатори: частка «зеленого» водню, викиди CO₂, інвестиції у ВДЕ, відповідність проєктів ЕІА. Згідно з ІЕА, для досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року частка «зеленого» водню має становити щонайменше 70%.

Оскільки Україна прагне інтегруватися у єдиний водневий ринок ЄС, важливо синхронізувати регулювання з директивами RED II та Fit for 55. Форсайт-інструменти дозволяють передбачати екологічні наслідки політик ще до їх імплементації, підтримуючи кліматичні цілі, збереження біорізноманіття й зменшення навантаження на довкілля [397; 400].

Інституційна довіра – критичний чинник ефективності форсайт-стратегій. Вона формується через залучення стейкхолдерів, прозорі процеси, дотримання принципів good governance (прозорість, підзвітність, участь) і підтримку з боку міжнародної спільноти. У період трансформацій довіра забезпечує легітимність політик і стимулює інвестиції у стратегічні проекти.

Сутнісною рисою форсайту є залучення ключових стейкхолдерів до формування візії майбутнього. Такий мультиакторний підхід сприяє створенню «епістемічної спільноти», яка має спільні цінності, орієнтації та прагнення. Завдяки цьому формується довіра як до результатів стратегування, так і до самих інституцій, які ці результати реалізують. За словами Г. Лассвелла, «ефективність політики зростає там, де є довіра до політичного процесу» [311]. Використання методів дельфі-опитування, сценарних семінарів, фокус-групових дискусій та відкритих хакатонів дозволяє формалізувати участь зацікавлених сторін і забезпечити інституційну легітимність стратегічних рішень [312].

Формування водневої економіки потребує великих інвестицій, високих технологій та довготривалих інфраструктурних проектів. Проте інвестори не вкладатимуть ресурси у державу або ринок, де відсутня передбачуваність дій регуляторів, немає захисту прав власності або не виконується зобов'язань. Як зазначають М. Олсон та Д. Норт, рівень економічного зростання прямо залежить від «інституційної якості» систем управління [313]. Форсайт, інтегруючи оцінку інституційних ризиків у прогнозні сценарії, дозволяє формувати стратегічні пріоритети не лише на основі економічного потенціалу, але й з урахуванням рівня довіри до виконавців. Саме це забезпечує адаптивність політики – її спроможність реагувати на зміни в суспільних очікуваннях.

Для вимірювання ефективності цього ціннісного компонента доцільно використовувати низку індикаторів, які відображають рівень відкритості, залучення та якості врядування. Індикатори інституційної довіри включають: соціологічні опитування (довіра до уряду), WGI, частку імplementованих форсайт-рішень та індекс залучення стейкхолдерів [314]. Довіра до українських інституцій також значною мірою залежить від підтримки з боку міжнародної спільноти. Інтеграція в європейські програми стратегічного планування (Horizon Europe, European Hydrogen Backbone) дозволяє не

лише отримувати ресурси, але й розділяти інституційні стандарти, що підвищує репутацію та сприяє трансферу довіри [401].

Однією з ключових функцій у форсайт-підході до стратегування економічного розвитку, особливо в умовах невизначеності, що притаманні сучасній Україні, є аналітична функція. Вона виявляє зміни, загрози і можливості. Функція забезпечує доказову основу стратегічних рішень [315].

Аналітична та прогностична функції форсайту забезпечують раннє виявлення слабких сигналів, що сигналізують про можливі зміни, та побудову альтернативних сценаріїв розвитку. Вони дозволяють визначати стратегічні вікна можливостей і адаптувати стратегії до динамічного середовища. На відміну від традиційного прогнозування, форсайт орієнтований не лише на передбачення, а й на активне формування майбутнього через сценарне моделювання та аналіз ризиків [316; 317; 318; 319; 320]. Аналітична функція реалізується за кількома напрямками, структура аналітичної функції наведена в додатку Р1.

У сфері розвитку водневої економіки аналітична функція форсайту відіграє ключову роль, оскільки уможливорює комплексно оцінити наявні в Україні технологічні компетенції, зокрема експертизу, науково-дослідні інститути та виробничі майданчики. Вона також дає змогу проаналізувати зовнішній попит на «зелений водень» у Європейському Союзі, побудувати карти технологічного прогнозу з урахуванням регіональної специфіки, ідентифікувати бар'єри регуляторного, фінансового та інфраструктурного характеру, а також сформувати основу для визначення перспективних «точок входу» у глобальні ланцюги доданої вартості [414].

У сучасному світі стратегічне планування дедалі частіше базується не на лінійному екстраполюванні минулих тенденцій, а на уявленні про ймовірні, можливі та бажані сценарії майбутнього. Одним із центральних інструментів реалізації прогностичної функції форсайту є сценарне моделювання. У практиці національного форсайту це методологічне підґрунтя реалізується через побудову кількох базових сценаріїв розвитку.

Типові сценарії для України в межах форсайт-досліджень можуть охоплювати базовий сценарій, що передбачає умовне продовження наявних тенденцій без суттєвих змін; оптимістичний або проривний сценарій, за якого відбувається технологічний чи

соціальний «ривок» завдяки ефективним реформам та інвестиціям; а також кризовий сценарій, який моделює розвиток подій у разі виникнення нових загроз або збереження деструктивних трендів [321]. Для кожного з них визначаються ключові показники (індикатори), такі як: темпи зростання ВВП, рівень енергетичної незалежності, показники інноваційної активності, рівень зайнятості, соціальна нерівність, тощо [322].

Форсайт-процеси спираються на цілий спектр методологій, що забезпечують гнучке та багатовимірне прогнозування майбутнього. Застосовуються сценарний аналіз, системна динаміка, картування майбутнього та інші цифрові методи прогнозування [323]. У контексті розвитку водневої економіки прогностична складова цього підходу відіграє ключову роль, оскільки дає змогу оцінити строки комерційної доцільності переходу на «зелений водень» [421], передбачити динаміку попиту на водневі технології як на внутрішньому, так і на зовнішньому ринках, а також змодельовати сценарії інфраструктурного розвитку, включаючи логістичні маршрути, трубопровідні мережі та формування енергетичних хабів. Крім того, форсайт уможливорює верифікувати потенційні ризики техногенного, екологічного чи політичного характеру [419]. Сценарне моделювання уможливорює також оцінювати мультиплікативний ефект від інвестицій у водневу енергетику, визначаючи точки синергії з іншими галузями – ІТ, машинобудуванням, освітою, фінансовими ринками [421].

Прогностична функція в системі форсайту виступає своєрідним мостом між теперішнім і майбутнім, забезпечуючи основу для зниження рівня стратегічної невизначеності. Вона уможливорює виявити оптимальні «вікна можливостей», обґрунтувати вибір політичних і економічних пріоритетів, а також сприяє розробці адаптивних, гнучких і реактивних стратегій, здатних до своєчасного коригування у відповідь на зміни зовнішнього середовища [324; 325; 326].

Формування таких майданчиків для діалогу дозволяє уникати фрагментованості стратегічних ініціатив, яка є типовою проблемою для трансформаційних економік, зокрема України. Участь усіх ключових акторів у створенні майбутніх сценаріїв уможливорює не лише узгоджувати пріоритети, а й забезпечує легітимізацію стратегічних рішень та зростання довіри до них [327]. Консолідуюча функція форсайту реалізується через низку інструментів та форматів, наведених в додатку X1.

Консолідуюча функція форсайту має низку суттєвих переваг, що роблять її важливим інструментом у стратегічному плануванні. Насамперед, вона забезпечує політичну нейтральність: фокус на майбутньому уможливорює зменшити конфронтаційність, пов'язану з поточними політичними розбіжностями [424]. Крім того, ця функція сприяє зниженню транзакційних витрат завдяки попередньому узгодженню цілей, що підвищує ефективність реалізації політик [328]. Вона також мобілізує ресурси, об'єднуючи зусилля держави, бізнесу та громадськості й відкриваючи доступ до ширшого спектру фінансових, організаційних і людських можливостей [425]. Нарешті, консолідуюча функція підвищує гнучкість та адаптивність, адже колективно сформовані рішення в умовах невизначеності є стійкішими до змін зовнішнього середовища [427].

У поствоєнному стратегічному контексті України важливо не лише визначити напрями відновлення, але й створити спільне бачення, яке буде поділятися усіма секторами. Без цього зростає ризик відтворення довоєнних дисбалансів, соціального відчуження та неефективного використання міжнародної допомоги. Форсайт у цьому випадку виконує роль фасилітатора соціального договору щодо майбутнього, де кожна група бачить себе суб'єктом змін, а не лише їх об'єктом [425].

Формування сценаріїв розвитку водневої енергетики в Україні є типовим прикладом потреби в реалізації консолідуючої функції форсайту. Цей процес передбачає врахування широкого спектра інтересів і позицій: державних пріоритетів у сфері енергетичної безпеки, екологічних цілей, що їх висуває громадськість, технічних спроможностей науково-дослідного сектору, інвестиційних намірів бізнесу, а також регіональних особливостей і потреб громад, які можуть стати безпосередніми учасниками водневих проєктів [427]. Без узгодження цих інтересів стратегія ризикує залишитися декларативною, тоді як ефективна форсайт-інтеграція дозволяє сформувати життєздатну дорожню карту трансформації [427].

Водночас, інноваційна складова форсайт-підходу в стратегуванні економічного розвитку полягає в здатності не лише відстежувати вже наявні технологічні тенденції, а й ідентифікувати проривні напрями розвитку, що можуть радикально трансформувати ключові галузі економіки [329]. У цьому контексті форсайт виступає як стратегічний

інструмент раннього виявлення майбутніх викликів і можливостей, які ще не мають масового прояву, але здатні сформувати нову парадигму економічного зростання [428].

У науково-технологічній політиці форсайт формує стратегічно обґрунтовані рішення. Він уможлиблює виявляти ключові технології загального призначення – як-от воднева енергетика, AI чи квантові обчислення – а також визначати напрями, де національна інноваційна система може досягти конкурентних переваг. Крім того, цей підхід орієнтує інвестиції в R&D відповідно до стратегічних пріоритетів і дозволяє використовувати технологічні «вікна можливостей» для здійснення leapfrogging – прискореного розвитку шляхом переходу до передових рішень [330; 331; 332; 333].

Форсайт сприяє переходу від реактивного до проактивного управління науково-технічним прогресом, забезпечуючи стратегічне бачення розвитку інноваційної сфери [429]. На відміну від підходів, орієнтованих виключно на ринковий попит або адміністративне планування, держава завдяки цьому підходу отримує інструменти для більш системного впливу. Це, зокрема, дає можливість планувати інноваційну інфраструктуру – технологічні парки, кластери, центри трансферу технологій – на основі сценаріїв майбутнього [432], розробляти стимулюючі програми підтримки досліджень і розробок (R&D) з урахуванням як глобальних, так і локальних трендів [432], а також налагоджувати партнерства між наукою, бізнесом і державними структурами через механізми спільного формування бачення майбутнього [432]. Інновації (зокрема у сфері енергії, IT, біотехнологій і безпеки) є критичними для конкурентоспроможності. Форсайт уможлиблює визначити національні ніші розвитку [429].

Інтеграція форсайту в систему прийняття рішень у сфері інноваційної політики передбачає оновлення технологічних дорожніх карт, розвиток платформ знань і підтримку foresight-центрів. У сфері енергетики це дає змогу позиціонувати водневу економіку як інноваційний хаб для електролізерів, накопичувачів і цифрових рішень, що відкриває можливості для інвестицій та міжнародної співпраці [431].

Однією з важливих, хоч і недооцінених, функцій форсайту є його навчальна роль, що полягає у залученні учасників до моделювання майбутнього та стратегічного мислення. У сучасних умовах невизначеності форсайт розвиває «майстерність майбутнього» (future literacy) – здатність уявляти та аналізувати можливі сценарії. Ця

функція має трансформаційний характер: вона змінює мислення залучених акторів, формує інноваційну культуру та посилює адаптивність до змін [334; 335].

Залучення до форсайт-форумів, сценарних майстерень і тренінгів зі стратегічного передбачення сприяє розвитку системного мислення та міждисциплінарного бачення [336], засвоєнню методів прогнозування й сценарного моделювання [433], оволодінню навичками колективного інтелекту та фасилітації [337], формуванню рефлексивного підходу до прийняття рішень [338], а також стимулюванню критичного мислення щодо технологічних, соціальних та економічних трендів [437].

Інституціалізація навчальної функції форсайту також сприяє створенню та підтримці спільнот практиків майбутнього (futures communities) [436]. Це ключові стейкхолдери, які виступають каталізаторами інновацій на локальному й національному рівнях [434], забезпечують трансфер знань між поколіннями та секторами [437], сприяють соціальному діалогу щодо майбутнього [436], а також підсилюють інституційну спроможність суспільства до прийняття складних рішень [437].

В Україні поступово розвиваються навчальні формати, засновані на форсайт-підходах. Серед них – освітні модулі у вищих навчальних закладах, присвячені foresight-studies, технологічному прогнозуванню та сценарному плануванню; школи майбутнього для державних службовців, громадських лідерів і підприємців [436]; форсайт-ігри та симуляції, які дозволяють відчувати вплив стратегічних рішень у змодельованих умовах [434]; а також інкубатори стратегічних ідей на базі університетів, де студенти розробляють сценарії майбутнього розвитку регіонів, секторів або технологій [436].

Для системної реалізації навчальної функції форсайту необхідно інтегрувати foresight-освіту у державні програми, створити національний центр передбачення, підтримувати мережі викладачів та розвивати адаптовані дидактичні інструменти. Освітній компонент є ключовим для формування стратегічного мислення, підвищення якості управління та підготовки суспільства до змін. У контексті невизначеності саме здатність навчатися на основі уявлень про майбутнє визначає національну конкурентоспроможність [437].

У структурі форсайт-підходу до стратегування економічного розвитку України в умовах невизначеності матриці сценаріїв відіграють роль важливого індикативного

інструменту. Їх призначення полягає в систематизації взаємодії між ключовими драйверами змін та невизначеностями, що мають значущий вплив на майбутнє соціально-економічної системи [339; 340]. У межах стратегічного планування вони забезпечують багатовекторний аналіз майбутніх варіантів розвитку, допомагаючи ухвалювати гнучкі й обґрунтовані управлінські рішення [341; 342].

Сценарні матриці у форсайті – це інструменти стратегічного планування, що базуються на комбінації двох критичних невизначеностей і формують чотири альтернативні сценарії розвитку. Для України, зокрема у сфері водневої енергетики, типовими є варіанти, що поєднують різні рівні міжнародної інтеграції та технологічної автономії. Матриці сприяють гнучкості стратегій, розвитку передбачувального управління та узгодженню рішень між акторами (додаток С1) [343; 443].

Кожен сценарій у межах матриці включає чітко визначені аналітичні елементи: опис домінуючого контексту, основні виклики й можливості, очікувані наслідки для економіки, суспільства, технологій та екології, а також необхідні політичні або інституційні реакції для адаптації до змін [441]. Таким чином, матриця слугує своєрідною картою орієнтації в майбутньому, де кожна вісь відображає критично важливі дилеми, що мають неоднозначний і важкопрогнозований характер [439].

У ситуації глибокої трансформації України сценарні матриці мають особливу аналітичну цінність. Вони дозволяють осмислювати альтернативні шляхи розвитку, співвідносити зовнішні ризики (війна, санкції, зміни у глобальних ланцюгах) з внутрішніми драйверами (інституції, людський капітал, ресурси), визначати ключові «точки впливу» для політики та виявляти «чорних лебедів» – рідкісні, але значущі події [344].

Важливою є також функція комунікації ідей: візуалізація сценаріїв майбутнього полегшує розуміння складних стратегічних альтернатив широким колом стейкхолдерів, сприяючи кращому включенню різних груп у процес прийняття рішень [443]. Нарешті, кожна сценарна модель містить у собі елементи SWOT-аналізу, що дає змогу здійснювати попередню оцінку ризиків і можливостей та обґрунтовано формулювати управлінські рішення в умовах багатофакторної невизначеності [443].

Для забезпечення повноцінного функціонування сценарних матриць як інструменту стратегічного передбачення в Україні доцільним є впровадження низки інституційних та методичних заходів. По-перше, необхідно створити спеціалізовані центри сценарного моделювання при ключових міністерствах і регіональних адміністраціях, які могли б здійснювати аналітичну підтримку процесів стратегічного планування та розробки політик [441]. По-друге, важливим кроком є розробка та затвердження державних методичних рекомендацій щодо побудови сценаріїв у межах стратегічних документів, що забезпечить уніфікацію підходів і підвищить якість стратегічного аналізу [443].

Крім того, доцільним є впровадження інтерактивних платформ, зокрема цифрових симуляторів, які дадуть можливість широкому колу зацікавлених сторін – від експертів до громадськості – брати участь у формуванні сценарних моделей та обговоренні альтернативних варіантів розвитку [443]. Такий підхід сприятиме не лише підвищенню якості стратегічного передбачення, а й посиленню інклюзивності процесу вироблення державної політики.

Матриці сценаріїв є потужним індикативним інструментом, що забезпечує стратегічну гнучкість, комунікацію між акторами політики та формування системної спроможності держави до управління майбутнім. В умовах глибокої невизначеності вони стають не розкішшю, а необхідним засобом стратегічного виживання та розвитку України [443].

У системі форсайт-підходу до стратегування економічного розвитку України в умовах невизначеності особливе місце займають інноваційні дорожні карти (Innovation Roadmaps). Вони виступають не лише візуалізацією бажаного майбутнього, а й операційним інструментом, що пов'язує стратегічні цілі з конкретними діями, часовими межами, відповідальними структурами та ресурсними потребами [345; 346]. Це уможливлює забезпечити синергію між баченням і втіленням, а також налагодити динамічний механізм управління інноваційними трансформаціями [347].

Дорожня карта — це інструмент планування розвитку технологій або секторів, що поєднує стратегічне бачення з конкретними етапами реалізації. Вона визначає віхи, терміни, технологічні траєкторії, відповідальних виконавців і потенційні бар'єри. У

межах форсайту такі карти є гнучкими і адаптуються до змін у зовнішньому середовищі, нових відкриттів або ринкових умов [348; 349]. В умовах високої стратегічної турбулентності, що супроводжує українську економіку внаслідок війни, трансформації інституцій та актуальних викликів відновлення, дорожні карти відіграють важливу роль як інструмент конкретизації та реалізації стратегічних намірів. Вони уможливають трансформувати загальні стратегічні орієнтири у практичні дії, придатні до реалізації на рівні міністерств, компаній та наукових установ [350]. Завдяки структурованому підходу дорожні карти сприяють координації та узгодженню рішень між різними секторами й рівнями управління, створюючи ефективну горизонтальну інтеграцію політик.

Крім того, ці інструменти забезпечують прозорість процесу реалізації стратегій, що сприяє підвищенню рівня довіри з боку бізнес-спільноти та громадянського суспільства. Дорожні карти також виступають основою для мобілізації ресурсів як на національному, так і на міжнародному рівнях, включаючи участь у донорських програмах, інвестиційних платформах Європейського Союзу, ОЕСР та Світового банку [351].

У сфері водневої економіки дорожні карти є ключовим інструментом планування та координації дій на різних рівнях. Вони формулюють цілі на різні часові горизонти, сприяють узгодженню наукових, інфраструктурних і нормативних процесів, а також залучають регіони з відповідним потенціалом (наприклад, Одеська, Дніпропетровська, Закарпатська області). Додатково охоплюються питання стандартизації, сертифікації, розвитку ринку та експортної політики [449]. Інноваційні дорожні карти функціонують у тісному взаємозв'язку з іншими індикативними елементами форсайту. Зокрема, сценарні матриці слугують підґрунтям для адаптивних дій у межах визначених варіантів розвитку; система індикаторів моніторингу дозволяє оцінювати динаміку реалізації поставлених цілей; а інструменти громадських консультацій забезпечують легітимність карт шляхом залучення зацікавлених сторін [352]. Рекомендації для впровадження інноваційних дорожніх карт у стратегуванні економічного розвитку України наведені в Додатку Ц1.

Інноваційні дорожні карти є ключовим індикативним інструментом форсайт-підходу, що забезпечує перехід від візій до дій, узгоджуючи час, ресурси й відповідальність. У посткризовому стратегічному середовищі України їх значення лише

зростає, адже вони формують основу для довгострокового технологічного прориву, інституційної стійкості та міжнародної інтеграції [449].

Індекси технологічної готовності (TRL) є ключовими індикативними інструментами форсайту, які дозволяють оцінювати зрілість технологій, оптимізувати інвестиційні рішення та формувати дорожні карти. У сфері водневої економіки TRL слугує основою для визначення пріоритетів фінансування, адаптації темпів впровадження технологій та оцінки їх відповідності європейським стандартам. Для ефективного використання TRL в Україні необхідна його інституалізація, цифровий моніторинг і інтеграція у державні програми підтримки інновацій [353; 354; 355; 356].

В умовах реструктуризації української економіки, відновлення інфраструктури та посилення технологічного суверенітету застосування індексу TRL (Technology Readiness Level) та споріднених показників набуває стратегічного значення. Вони дозволяють оптимізувати інноваційні портфелі, спрямовуючи ресурси на технології з високим потенціалом впровадження, формувати пріоритети державної політики з урахуванням реального рівня готовності розробок, а також підвищувати інвестиційну привабливість проєктів завдяки прозорим критеріям оцінки. Крім того, TRL сприяє зниженню ризиків передчасної комерціалізації та забезпечує відповідність українських ініціатив європейським стандартам, що є важливим чинником інтеграції у науково-технологічний простір ЄС [357].

Важливим етапом є створення галузевих експертних груп для об'єктивної оцінки рівнів технологічної готовності та впровадження цифрової платформи для моніторингу динаміки інновацій за TRL-методологією. Одночасно необхідно інтегрувати ці індекси у державні інструменти підтримки інновацій – грантові програми, закупівлі, проєкти державно-приватного партнерства – і забезпечити відкритий доступ до інформації для бізнесу та інвесторів. Це підвищить прозорість, керованість і ефективність процесів стратегування [456].

Індекси технологічної готовності, зокрема TRL, відіграють ключову роль у забезпеченні обґрунтованості, послідовності та ефективності інноваційного стратегування. У межах форсайт-підходу вони слугують мостом між науковими відкриттями та економічною політикою, підвищуючи відповідальність за вибір

технологічних траєкторій і стратегічну передбачуваність економічного розвитку України [456].

У форсайт-стратегуванні економічного розвитку України ключову роль відіграють індекси людського капіталу та інституційної спроможності, які дозволяють оцінити реалістичність і стійкість стратегічних рішень. Оскільки саме люди – їхні знання, навички, мотивація та довіра до інституцій – визначають здатність до інноваційного зростання, розвиток людського капіталу стає критичним чинником успішного переходу до економіки знань у постіндустріальну добу [358; 359]. Індикатори людського капіталу, що використовуються у форсайті наведені в додатку ШІ.

В свою чергу інституційна спроможність – це здатність державних та недержавних організацій ефективно розробляти та впроваджувати політики, координувати дії, забезпечувати верховенство права, прозорість і підзвітність. У стратегічному прогнозуванні це дозволяє оцінити, наскільки передбачені цілі й сценарії можуть бути реалізовані на практиці [360]. В додатку ШІ наведені індикатори інституційної спроможності.

З огляду на глибоку системну трансформацію, яку переживає Україна – зокрема деіндустріалізацію, міграцію, демографічний спад і кризу довіри до інституцій – індикативні інструменти оцінювання, зокрема індекси людського капіталу та інституційної спроможності, стають критично важливими. Індекси НСІ та інституційної спроможності дозволяють виявити регіональні дисбаланси в освіті, охороні здоров'я та управлінні. [361; 362].

Застосування подібних індикаторів уможлиблює вимірювання ефективності реформ у середньо- та довгостроковій перспективі, забезпечуючи зворотний зв'язок для корекції стратегічних підходів. Нарешті, ці метрики можуть бути інтегровані в сценарне планування, з урахуванням кадрової, освітньої та інституційної спроможності, що значно підвищує реалізовуваність стратегічних сценаріїв на практиці [363].

Інтеграція індикативних інструментів у форсайт-підхід відкриває низку прикладних переваг, що значно підвищують ефективність стратегічного планування. Однією з ключових функцій є валідація сценаріїв через оцінку кадрової спроможності: зокрема, при виборі між сценаріями «цифрового прориву» та «промислового

реінжинірингу», індекс людського капіталу (НСІ) дає змогу оцінити наявність відповідної бази кваліфікованих фахівців і, таким чином, перевірити реалістичність обраного вектору розвитку [457].

Ще одним важливим аспектом є інтеграція цих індикаторів у дорожні карти досліджень і розробок (R&D) та інноваційної діяльності. Це дозволяє враховувати рівень освіти, професійних навичок та навчальних можливостей у прогнозах технологічного поступу [458]. Нарешті, використання міжнародно визнаних індикативних оцінок підвищує рівень легітимності стратегічних документів, адже забезпечує прозоре й аналітично обґрунтоване ухвалення рішень, що є особливо важливим у процесі залучення зовнішніх партнерів і донорів [461].

Для реалізації форсайт-стратегії розвитку водневої економіки необхідно враховувати системні чинники, що визначають спроможність до впровадження інновацій. Ключовими серед них є рівень підготовки фахівців у сферах енергетики, хімії та ІТ, наявність сучасних STEM-програм і «зелених» навичок, управлінська здатність регіонів до координації проєктів, а також рівень суспільної довіри до інституцій, які відповідають за регуляцію та реалізацію технологічних змін [364].

Таким чином, індекси людського капіталу стають не лише індикативним інструментом, а й ключовим фільтром реалістичності майбутніх стратегічних сценаріїв. Індекси людського капіталу та інституційної спроможності виконують критичну функцію у форсайт-стратегуванні – вони поєднують бачення майбутнього з реальною здатністю його досягти. Їх системне використання сприяє підвищенню ефективності, адресності та відповідальності стратегічного управління, роблячи плани не лише амбітними, а й здійсненими [465].

Отже, комбінація аксіологічного, функціонального та індикативного шарів формує адаптивну рамку стратегування. У контексті стратегування економічного розвитку України в умовах багаторівневої невизначеності ключовим завданням є формування такої аналітичної та управлінської моделі, яка здатна об'єднувати ціннісні орієнтири (аксіологічний шар), операційні механізми реалізації (функціональний шар) та систему оцінювання, моніторингу і коригування (індикативний шар). Саме ця триєдина структура – аксіологічний, функціональний та індикативний шари – формує адаптивну рамку

стратегування, що є необхідною для ефективного реагування на виклики сьогодення та формування бажаного майбутнього [365; 366].

Форсайт-підхід базується на трьох взаємопов'язаних шарах: аксіологічному, функціональному та індикативному, які разом формують системну та адаптивну модель стратегування. Форсайт ґрунтується на ключових стратегічних цінностях: інклюзивності, довірі, екології та технологічній автономії. Функціональний шар реалізує ці орієнтири через аналітичну, прогностичну, інноваційну, комунікаційну та консолідуючу діяльність: від аналізу трендів до залучення стейкхолдерів. Індикативний шар виконує функції оцінювання і зворотного зв'язку, застосовуючи інструменти TRL, дорожні карти, індекси людського капіталу та інституційної спроможності, що дозволяють адаптувати стратегії до змін середовища [367; 368; 369; 370; 371; 372].

Синергія аксіологічного, функціонального та індикативного шарів формує адаптивну рамку стратегування, здатну поєднувати ціннісну орієнтацію, операційну реалізацію та динамічне оцінювання. Цінності форсайту (інклюзивність, довіра, екологія, автономія) задають стратегічний вектор, що реалізується через функціональні та індикативні механізми. [373].

У нинішньому контексті України, яка одночасно стикається з викликами виживання, модернізації та євроінтеграції, інтегрована модель форсайт-стратегування виступає інструментом стратегічної зрілості. Вона поєднує оперативне реагування з довгостроковими цілями, підвищує легітимність політик, оптимізує використання ресурсів, знижує ризики та зміцнює технологічну і соціальну стійкість [472]. Завдяки цьому модель не лише інтегрує окремі елементи стратегічного планування, а й забезпечує цілісність і адаптивність національного економічного курсу.

Узагальнюючи, інтеграція аксіологічного, функціонального та індикативного компонентів у єдину модель є не лише концептуальним рішенням, а й стратегічною передумовою для формування ефективного, прозорого та ціннісно орієнтованого підходу до економічного розвитку України в умовах XXI століття. Такий підхід забезпечує результативність стратегічного управління, узгодженість дій і стійкість у динамічному середовищі [473].

Реалізація форсайт-підходу до економічного розвитку України передбачає поетапну організацію процесу, що охоплює три ключові фази: сприйняття, прогнозування та дослідження. На етапі сприйняття формується колективне бачення майбутнього через аналіз стратегічного контексту (економічного, соціального, екологічного, технологічного), ідентифікацію цінностей і створення діалогу між стейкхолдерами, що підвищує легітимність рішень. Прогнозування поєднує методи DELPHI, SWOT, сценарне моделювання, дозволяючи сформувати альтернативні сценарії, виявити «слабкі сигнали» та оцінити вплив ключових драйверів змін. Завершальний етап – дослідження – трансформує стратегічні візії в конкретні дії: визначаються пріоритетні напрями інвестування, розробляються дорожні карти, оцінюється людський та інституційний потенціал, що забезпечує обґрунтованість політик у динамічному середовищі [374; 375; 376; 377; 378; 379; 380].

Таким чином, структура з трьох фаз – сприйняття, прогнозування, дослідження – уможлиблює забезпечити цілісність, гнучкість і наукову обґрунтованість форсайт-підходу. Вона перетворює форсайт не лише на інструмент бачення майбутнього, а й на механізм стратегічного управління змінами в умовах системної невизначеності, що особливо актуально для України в період трансформаційних викликів [381].

У сучасному стратегічному плануванні, зокрема в умовах високої невизначеності, зростає роль цифрових платформ як інфраструктури для реалізації форсайт-підходу. Їхнє застосування значно підвищує ефективність обробки великих обсягів даних, забезпечує прозорість та відкритість процесів, а також сприяє інтеграції різних груп зацікавлених сторін – від органів влади й наукових установ до бізнесу та громадськості [382; 383].

Форсайт вимагає постійного моніторингу великих обсягів структурованих і неструктурованих даних із різноманітних джерел – економічної статистики, соціологічних досліджень, медіа-аналітики, наукових публікацій, патентних реєстрів тощо. Застосування технологій Big Data уможлиблює виявляти слабкі сигнали й нові тренди в режимі реального часу, здійснювати семантичний аналіз публічних і наукових дискурсів для виявлення ціннісних зрушень, проводити геопросторову аналітику для регіонального планування, а також прогнозувати наслідки сценаріїв на основі історичних патернів. Таким чином, аналітична складова форсайту суттєво підсилюється через

цифрові інструменти, які дозволяють здійснювати як описову, так і предиктивну аналітику на багаторівневій шкалі [384].

Застосування алгоритмів штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML) у форсайт-дослідженнях відкриває нові аналітичні можливості. Зокрема, це дає змогу автоматизувати кластерний аналіз сценаріїв, оцінювати та порівнювати індикатори в режимі реального часу, генерувати адаптивні моделі розвитку за змінних умов, а також візуалізувати складні взаємозв'язки між драйверами, ризиками та інституційною спроможністю. Застосування AI дозволяє також підвищити об'єктивність та точність прогнозування, зменшуючи вплив людського фактору, зокрема когнітивних упереджень, на формування стратегічних пріоритетів [385; 386]. В свою чергу, інклюзивність є однією з головних цінностей форсайту, і саме онлайн-інструменти сприяють залученню широкого кола стейкхолдерів до стратегічного процесу.

Використання цифрових платформ у форсайт-стратегуванні суттєво розширює можливості для організації аналітичного та комунікаційного процесу. Зокрема, такі платформи забезпечують проведення форсайт-сесій, дельфі-опитувань та панельних обговорень у дистанційному форматі, що дозволяє залучати широке коло експертів незалежно від їхнього географічного розташування. Вони також слугують базами знань, де представники різних секторів можуть обмінюватися аналітичними матеріалами, сценарними розробками та стратегічними візіями. Крім того, цифрові інструменти дають змогу інтерактивно візуалізувати дорожні карти та сценарії за допомогою спеціалізованих панелей управління. Таким чином, формується динамічна екосистема стратегування, в якій забезпечується постійна комунікація між учасниками процесу, що сприяє більшій узгодженості рішень та адаптивності стратегій.

Приклади платформ – Foresight Platforms (ЄС), Futurium, Policy Lab, а також спеціалізовані українські рішення на базі OpenData, ProZorro, Diia.City – свідчать про трансформаційний потенціал цифрового середовища для стратегічного управління [387; 388]. Цифрові платформи становлять ключовий інфраструктурний елемент сучасного форсайт-підходу, забезпечуючи ефективну аналітику завдяки використанню Big Data та алгоритмів штучного інтелекту. Вони сприяють відкритості, прозорості й залученню широкого кола стейкхолдерів через онлайн-інструменти, а також підтримують динамічну

взаємодію та адаптивність системи стратегічного планування в умовах невизначеності. Для України це означає можливість будувати сучасну систему економічного планування, здатну адекватно реагувати на виклики глобалізованого світу, мобілізувати потенціал національних інновацій і посилювати інституційну довіру до процесів розробки стратегічних рішень [389].

Інституалізація форсайт-підходу є ключовою умовою довгострокового стратегічного управління, зокрема у сфері водневої економіки. Foresight має стати інтегрованою частиною публічної політики на основі участі, прозорості та наукового прогнозування. Доцільно закріпити цей підхід на законодавчому рівні шляхом ухвалення спеціального закону та внесення змін до чинного законодавства. Також рекомендовано створити Національне агентство форсайту водневої економіки, за аналогією з європейськими моделями [390; 391].

Доцільним є впровадження трирівневої системи foresight-сесій для водневої економіки України: національної – у формі щорічної асамблеї, секторальної – через галузеві обговорення, та регіональної – з урахуванням місцевої специфіки. Сесії мають базуватись на європейських методиках (Futures Literacy Labs, Delphi, Horizon Scanning) з акцентом на інновації та екологію [392; 393].

Поряд із цифровою інфраструктурою доцільно впровадити державну освітню програму з форсайту (STEM, стратегічний аналіз, держуправління), сформувати реєстр foresight-фасилітаторів при НАНУ та інтегрувати foresight-модулі у програми підвищення кваліфікації державних службовців і енергетичних управлінців. Це забезпечить підґрунтя для ефективного застосування інструментів стратегічного передбачення на всіх рівнях [394].

Україна має активізувати співпрацю з міжнародними платформами стратегічного прогнозування, зокрема у сфері водневої енергетики. До пріоритетних напрямів належать участь у діяльності OECD Strategic Foresight Network, EU Foresight Network (з особливою увагою до ініціатив у галузі водневих технологій), UN Global Futures Platform, а також ініціативи «Mission-Oriented Innovation» при UCL Institute for Innovation and Public Purpose. Така взаємодія сприятиме інтеграції українського стратегічного бачення у глобальні

тренди розвитку водневої економіки, а також створить умови для залучення фінансування, експертної підтримки та найкращих міжнародних практик [395].

З огляду на зазначене, форсайт-метод має стати інституційною нормою стратегічного управління в Україні для розвитку водневої економіки, що уможливить перейти від короткотермінового реагування до довготермінового бачення та інноваційного підходу. Впровадження відповідного законодавчого, організаційного та освітнього середовища є запорукою ефективної реалізації foresight-інструментів у державній політиці. Інституалізація форсайту створить інноваційне середовище формування стратегій, здатне об'єднати державу, бізнес, науку і громадянське суспільство навколо ціннісно орієнтованої візії майбутнього водневої економіки.

У контексті зростаючої стратегічної турбулентності, зумовленої війною, трансформаційними процесами в економіці та глобальними змінами, формування ефективного інструментарію довгострокового планування набуває критичного значення для України. Аналіз теоретико-методологічних засад форсайт-стратегування дозволив обґрунтувати доцільність використання інтегрованої моделі, що поєднує три ключові компоненти – аксіологічний, функціональний та індикативний. Такий підхід уможливлює поєднувати концептуальну цілісність із гнучкістю стратегічного управління в умовах високої динаміки змін.

Аксіологічний шар забезпечує ціннісну обґрунтованість стратегічних рішень, формуючи морально-етичний каркас і довгострокові орієнтири розвитку. Саме цінності, такі як інклюзивність, екологічна збалансованість, інституційна довіра й технологічна суверенність, визначають рамки прийнятності сценаріїв майбутнього. Функціональний компонент виконує операційну функцію, трансформуючи стратегічні візії у конкретні механізми дії, що охоплюють аналітичну, прогностичну, інноваційну, навчальну і комунікаційну складові форсайт-процесу. Індикативний шар, у свою чергу, формує систему оцінювання й зворотного зв'язку, що уможливлює адаптувати стратегії до змін середовища та забезпечити їхню результативність.

Особливу роль у цій системі відіграють сучасні індикативні інструменти: індекси технологічної готовності (TRL), індекси людського капіталу (HCI), інституційної спроможності тощо. Вони дозволяють кількісно оцінювати потенціал реалізації стратегій,

забезпечуючи зв'язок між стратегічними цілями та реальними умовами соціально-економічного середовища. Таким чином, модель форсайт-стратегування постає не лише як засіб формування бачення майбутнього, а як системна рамка, здатна забезпечити адаптивність, стійкість і поступову модернізацію економіки України відповідно до ціннісних пріоритетів XXI століття.

3.2. Формування механізму організаційно-економічного енергетичного партнерства у контексті міжнародних цілей щодо захисту клімату

Україна активно бере участь у глобальних процесах боротьби зі зміною клімату, що передбачає адаптацію національної політики до вимог міжнародних кліматичних угод. Основними міжнародними документами, що визначають стратегічні напрями розвитку кліматичної політики України, є Паризька кліматична угода та Європейський зелений курс.

Україна, ратифікувавши Паризьку угоду у 2016 році, взяла на себе зобов'язання скоротити викиди парникових газів на 65% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року, що зафіксовано в оновленому Національно визначеному внеску (НВВ-2). Для досягнення цієї мети передбачено глибоку трансформацію енергетичного сектору через розвиток відновлюваних джерел енергії, водневої енергетики, підвищення енергоефективності та впровадження кліматичних критеріїв у державну політику. У межах Угоди про асоціацію з ЄС та у відповідь на Європейський зелений курс, Україна також зобов'язалась адаптувати своє законодавство до європейських стандартів, включно з декарбонізацією промисловості, модернізацією енергетичної інфраструктури та розвитком водневих технологій. Підписання у 2020 році Меморандуму про співпрацю у сфері водню з ЄС стало важливим кроком у цьому напрямі. Геополітична ситуація, зокрема війна, лише підсилила актуальність інтеграції до європейського кліматичного простору як основи енергетичної безпеки, економічного відновлення та сталого розвитку [396; 397; 398; 399; 400].

Таким чином, міжнародні зобов'язання України у сфері кліматичної політики визначають чіткі орієнтири на розвиток низьковуглецевої економіки, де воднева

енергетика виступає одним із головних інструментів досягнення як глобальних, так і національних кліматичних цілей.

Воднева енергетика визначена як стратегічний напрямок кліматичної та енергетичної політики України, сприяючи зниженню викидів, модернізації енергетичного сектору та досягненню міжнародних екологічних цілей. За даними досліджень, інтеграція водневої енергетики дозволить Україні скоротити викиди парникових газів у енергетичному секторі на 20–25% до 2035 року [401]. Зокрема, перспективними є напрямки використання водню для виробництва електроенергії, теплоенергії та в якості сировини для промислових процесів (наприклад, у металургії та хімічній промисловості) [402].

Згідно з Національною економічною стратегією до 2030 року, розвиток водневої економіки визначено пріоритетом технологічної модернізації. Планується створення потужностей для виробництва водню з ВДЕ, розбудова інфраструктури для його транспортування і зберігання, а також формування внутрішнього ринку. Водень відіграє важливу роль у декарбонізації промисловості, особливо в енергоємних галузях. Реалізація стратегії потребує державної підтримки, нормативного супроводу та активного міжнародного партнерства, зокрема з ЄС [403; 404; 405].

Ефективна розбудова водневої економіки в Україні потребує залучення широкого кола стейкхолдерів, кожен із яких відіграє визначальну роль у реалізації кліматичних, економічних і технологічних цілей. Формування організаційно-економічного партнерства між ними є ключовою умовою для прискорення водневої трансформації та досягнення міжнародних стандартів декарбонізації.

Воднева економіка базується на координації ключових стейкхолдерів. Держава виконує роль стратегічного координатора, формуючи нормативно-правову базу, підтримуючи інфраструктурні проєкти, стандарти безпеки та міжнародну інтеграцію у водневі ринки. Приватний сектор є рушієм інновацій, інвестуючи у виробництво, зберігання та використання водню, зокрема через електролізери, паливні елементи та інфраструктуру заправок. Наукові установи забезпечують технологічний супровід – розробляють ефективні й безпечні водневі рішення, сприяють оптимізації процесів і підготовці фахівців. Водночас громадянське суспільство відіграє ключову роль у

забезпеченні прозорості, підтримці реформ та просвітництві, стимулюючи соціальну участь у впровадженні водневої енергетики [406; 407; 408; 409].

Взаємодія цих стейкхолдерів має бути організована за принципами прозорості, довіри, розподілу відповідальності і довгострокового стратегічного планування. Успішна координація між ними є запорукою сталого розвитку водневої економіки, що сприятиме не лише екологічній модернізації, але й економічному зростанню України.

Формування концепції енергетичного партнерства у водневому секторі вимагає чіткого визначення цілей та принципів взаємодії між державою, бізнесом і міжнародними організаціями. Основу мають складати відкритість до іноземних інвесторів і наукових центрів, технологічна нейтральність щодо різних типів водню та екологічна відповідальність згідно з міжнародними кліматичними стандартами. Ключовими елементами є інституційна підтримка (міжурядові платформи), ефективна фінансова модель (інвестиційні фонди, пільгові умови), розвиток інфраструктури (водневі хаби, трубопроводи, заправки), а також науково-технічне співробітництво в межах європейських ініціатив. Важливо, щоб партнерство базувалося на принципах справедливого енергетичного переходу, включаючи підтримку зайнятості та розвиток людського капіталу [410; 411; 412; 413; 414; 415].

Таким чином, формування концепції енергетичного партнерства у водневому секторі України має базуватися на синергії державної політики, бізнес-ініціатив, науково-технічного прогресу та міжнародного співробітництва, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності країни на глобальному ринку чистої енергії.

Водночас, оцінка потенціалу міжнародного партнерства для залучення інвестицій у водневі проєкти є важливою складовою стратегії розвитку водневої економіки в Україні. На тлі глобальних зусиль з досягнення кліматичних цілей, зокрема через інвестування у відновлювані джерела енергії та водневі технології, міжнародне співробітництво стає критично важливим для розвитку інфраструктури водневої енергетики в Україні. Проте ефективне залучення інвестицій вимагає комплексного підходу, включаючи фінансові механізми, підтримку з боку міжнародних організацій, а також належну політичну та правову підтримку.

Ефективне залучення інвестицій у водневу економіку України потребує комплексного використання фінансових інструментів – грантів, пільгових кредитів, інвестиційних фондів і партнерств із міжнародними фінансовими установами, що забезпечують капітал для створення інфраструктури виробництва та транспортування водню. Україна бере участь у міжнародних ініціативах, зокрема Європейському зеленому курсі, IPCEI Hydrogen і програмі Horizon Europe для залучення технологій та інвестицій. Водночас критично важливою є техніко-економічна оцінка потенційних проєктів для визначення їх інвестиційної привабливості. Основою інвестиційної довіри залишаються політична стабільність, прозоре регулювання та правове забезпечення, які гарантують захист інтересів інвесторів і передбачуваність умов реалізації водневих проєктів [416; 417; 418; 419].

Таким чином, оцінка потенціалу міжнародного партнерства для залучення інвестицій у водневі проєкти має бути комплексною і враховувати фінансові, технічні та правові аспекти. Важливим чинником успішного залучення інвестицій є також стратегічна співпраця з міжнародними фінансовими установами та корпораціями, що забезпечить Україні доступ до новітніх технологій і сприятиме розвитку водневої економіки.

Ефективний розвиток водневої економіки в Україні потребує створення платформ для діалогу між урядом, бізнесом, наукою та міжнародними організаціями, які слугують механізмами координації, обміну знаннями та формування спільних стратегій. Такі платформи – у формі міжурядових комісій або міжсекторальних робочих груп – сприяють узгодженню інтересів, зміцненню довіри та залученню фінансової і технічної підтримки від міжнародних партнерів. Ключову роль у їх створенні відіграє держава, яка забезпечує правову та інституційну базу, як, наприклад, у випадку з Національною водневою платформою України. Участь бізнесу та міжнародних організацій у таких структурах уможливорює реалізовувати спільні проєкти, інтегрувати національні цілі з глобальними кліматичними ініціативами, а також сприяти впровадженню інноваційних технологій у водневому секторі [420; 421; 422; 423; 424].

Таким чином, створення платформ для діалогу між урядом, бізнесом та міжнародними організаціями є важливою складовою інструментів стратегування

розвитку водневої економіки в Україні. Такий діалог сприятиме забезпеченню ефективної координації між різними секторами економіки та зовнішніми партнерами, що уможливить успішно реалізувати водневі проєкти та досягти міжнародних кліматичних цілей.

Визначення пріоритетних напрямів технологічного трансферу є критичним для розвитку водневої енергетики в Україні, оскільки впровадження новітніх технологій сприяє зниженню витрат, підвищенню ефективності та екологічній безпеці. Ключовими сферами трансферу є виробництво водню з відновлюваних джерел (зокрема зеленого водню через електроліз), транспортування та зберігання водню, а також перетворення його в енергію за допомогою паливних елементів. Ефективна адаптація міжнародного досвіду потребує тісної співпраці з науковими центрами, технічними університетами та провідними енергетичними компаніями, зокрема з ЄС і США. Таке партнерство забезпечує доступ до інновацій, фінансових ресурсів і сприяє інтеграції України до глобальних технологічних ланцюгів у сфері водневої енергетики [425; 426; 427; 428; 429; 430].

Таким чином, пріоритетні напрями технологічного трансферу у водневій енергетиці України повинні зосереджуватись на адаптації передових технологій виробництва, транспортування, зберігання та перетворення водню в енергію. Це дозволить Україні значно підвищити ефективність водневої економіки, інтегрувати її в глобальний енергетичний ринок та досягти амбітних кліматичних цілей.

Кластерний підхід до формування партнерства у водневій економіці України є важливим інструментом інтеграції зусиль держави, бізнесу, науки та міжнародних організацій задля розвитку інфраструктури водню. Така модель сприяє ефективній кооперації, зменшенню транзакційних витрат, стандартизації технологій і впровадженню інновацій. Локалізовані кластери, що охоплюють усі етапи виробничого ланцюга – від генерації до споживання водню, – створюють умови для спільних проєктів із залученням внутрішніх та міжнародних ресурсів, водночас посилюючи наукову взаємодію та міжфірмову співпрацю [431].

Кластерний підхід також посилює конкурентоспроможність учасників через спільне використання інфраструктури, ефективний технологічний трансфер і доступ до

глобальних ринків. Особливо перспективним є формування кластерів у регіонах із розвиненою відновлювальною енергетикою, з урахуванням позитивного європейського досвіду. Для реалізації такого підходу необхідна інституційна та правова підтримка, включно з податковими пільгами, стабільним інвестиційним середовищем і механізмами координації між учасниками кластеру [432].

Крім того, важливою складовою є системне прогнозування та моніторинг розвитку водневих кластерів. Це передбачає оцінку ринкових потреб, наявного потенціалу і інвестиційної привабливості, а також забезпечення адаптивного управління стратегією кластерного розвитку відповідно до динаміки внутрішніх і зовнішніх змін [433; 434; 435].

Таким чином, розробка організаційної моделі партнерства на основі кластерного підходу для розвитку водневої економіки в Україні є важливим елементом стратегічного планування, оскільки вона забезпечує інтеграцію технологічних, економічних і соціальних інтересів різних учасників ринку, а також сприяє прискоренню розвитку інфраструктури та залученню міжнародних інвестицій. Основні напрями для розробки організаційної моделі партнерства на основі кластерного підходу для водневої економіки України наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1.

Кластерний підхід до розвитку водневої енергетики: напрями, моделі та підтримка

Напрямок	Опис
Кластеризація у водневій енергетиці	Формування групи підприємств, наукових установ і державних органів для спільного розвитку водневої енергетики.
Модель кластерного партнерства	Визначення організаційних зв'язків і взаємодії між урядом, бізнесом, наукою для досягнення спільної мети.
Конкурентоспроможність через кластеризацію	Зниження виробничих витрат та ефективне використання науково-технічного потенціалу через кластерні об'єднання.
Інституційна та правова підтримка	Підтримка з боку уряду для забезпечення розвитку кластерів: пільги, правова стабільність.
Прогнозування та моніторинг розвитку	Оцінка потреб ринку водневої енергетики та ефективності кластерних ініціатив.

Джерело: створена автором на основі [539]

Укладання меморандумів і угод про співпрацю є ключовим механізмом інституціоналізації партнерств у водневій економіці України, забезпечуючи правову

основу для реалізації спільних проєктів, залучення інвестицій та впровадження інновацій, а також підвищуючи стабільність і передбачуваність співпраці. Меморандуми про взаєморозуміння та угоди про співпрацю є ефективними інструментами партнерства, які дозволяють визначити спільні наміри та зобов'язання сторін у конкретних напрямках. У сфері водневої енергетики такі документи відіграють важливу роль у формуванні технологічної та організаційної взаємодії, зокрема у реалізації інфраструктурних та науково-дослідних проєктів. Їх юридична значущість створює основу для довгострокової співпраці та гарантує дотримання взаємних зобов'язань [436].

Укладання угод на рівні держави та бізнесу забезпечує синергію між публічним і приватним секторами. Держава може виступати гарантом сприятливих умов – податкових пільг, фінансової підтримки або регуляторної стабільності, тоді як бізнес залучає технології та капітал для реалізації водневих ініціатив. Такі домовленості сприяють масштабуванню проєктів і створенню стійкої водневої інфраструктури [437; 438].

Міжнародні угоди та меморандуми зміцнюють позиції України на глобальному енергетичному ринку, інтегруючи її у провідні кліматичні ініціативи, такі як Європейський зелений курс. Вони відкривають можливості для участі у спільних науково-технічних проєктах, обміну технологіями та досвідом, а також для налагодження стратегічного партнерства з міжнародними інвесторами і дослідницькими інституціями [439].

Для забезпечення результативності таких партнерств важливим є впровадження механізмів моніторингу виконання зобов'язань: регулярне звітування, аудит, незалежна експертна оцінка та адаптація стратегій. Це дозволяє забезпечити прозорість співпраці, її ефективність та відповідність національним пріоритетам у сфері водневої енергетики [440].

Таким чином, укладання меморандумів та угод про співпрацю є важливим інструментом інституціоналізації партнерських відносин у водневій енергетиці, оскільки вони забезпечують правову основу для спільних проєктів, сприяють залученню інвестицій та створюють умови для інтеграції в міжнародні енергетичні мережі.

Деталізація інституціоналізації партнерських відносин через укладання меморандумів та угод про співпрацю для розвитку водневої економіки наведена в додатку Ю1.

Ефективна нормативно-правова база є необхідною умовою розвитку партнерства у водневій енергетиці, оскільки забезпечує стабільну взаємодію між учасниками, інвестиційну впевненість і відповідність викликам сучасної енергетичної та кліматичної політики. Нормативно-правове забезпечення повинно включати закони та підзаконні акти, які регламентують правила взаємодії учасників ринку, фінансування проєктів, екологічні вимоги та механізми стимулювання інвестицій. Зокрема, важливою є гармонізація українського законодавства з міжнародними зобов'язаннями, такими як Паризька угода та Європейський зелений курс, що дозволить залучати іноземний капітал і забезпечить правову інтеграцію в європейський енергетичний простір [441; 442].

Ефективна правова база має також забезпечувати функціонування спеціалізованих інструментів підтримки партнерств: пільгове оподаткування, спрощене ліцензування, державні гарантії для інвесторів та розвиток "зеленого" фінансування. Ці інструменти сприяють формуванню сприятливого середовища для реалізації водневих проєктів і розвитку інноваційних технологій у цій сфері [443].

Окрему увагу слід приділити регулюванню інфраструктури: правовому оформленню виробництва, транспортування та зберігання водню, а також встановленню стандартів безпеки, ефективності та екологічної відповідальності. Таке регулювання не лише сприяє внутрішньому розвитку сектору, а й забезпечує його конкурентоспроможність на міжнародному рівні [444].

Зрештою, нормативна база має бути динамічною та адаптивною. В умовах швидкого розвитку водневих технологій та змін у глобальній енергетиці необхідно впроваджувати механізми регулярного оновлення законодавства. Це дозволить Україні своєчасно реагувати на міжнародні тенденції, підтримувати партнерську взаємодію та забезпечити довгострокову стійкість водневої економіки [445]. Основні напрямки формування нормативно-правової бази для розвитку водневої економіки в Україні наведені в додатку Я1.

Механізми державної підтримки – гранти, пільги та субсидії – є ключовими для стимулювання водневої економіки, особливо на ранніх етапах розвитку, знижуючи

інвестиційні ризики та підтримуючи інноваційне партнерство. Гранти забезпечують фінансування науково-дослідних проєктів, розробку нових технологій та впровадження систем з виробництва й зберігання водню. Вони можуть надаватися як з національних джерел, так і в межах міжнародних ініціатив, зокрема програм ЄС. Пільгове оподаткування, своєю чергою, створює сприятливі умови для діяльності підприємств у секторі водневої енергетики, стимулюючи інвестиції, інновації та імпорту необхідного обладнання [446].

Субсидії відіграють особливу роль у розвитку інфраструктури – будівництві водневих заводів, транспортних систем і сховищ. Вони дозволяють зробити технології більш доступними для бізнесу, одночасно зменшуючи залежність від зовнішніх джерел фінансування. Крім того, важливим є субсидування міжнародних партнерств – зокрема через участь у програмах ЄС, таких як Horizon Europe, що відкривають доступ до транснаціональних досліджень, інновацій і технологій [447].

Для забезпечення прозорості та ефективності використання фінансової підтримки необхідно впроваджувати чіткі процедури відбору проєктів, механізми моніторингу та звітності. Такий підхід не лише підвищить довіру до державної політики у сфері водневої енергетики, а й сприятиме її системному розвитку у відповідності до стратегічних цілей енергетичної безпеки та кліматичної нейтральності [448; 449]. Різноманітні механізми державної підтримки у водневому секторі, зокрема гранти, пільги та субсидії, і їхню роль у розвитку водневої економіки в Україні наведені в табл. 3.2.

Розвиток водневої енергетики є стратегічно важливим для України, особливо в контексті досягнення міжнародних кліматичних цілей, таких як зобов'язання за Парижською угодою. Однак для залучення інвестицій у цей сектор необхідно враховувати низку економічних, технологічних, фінансових, а також політичних і безпекових ризиків. Однією з головних перешкод для інвесторів є високий рівень невизначеності, зокрема через корупцію та військову ситуацію в країні. Тому для стимулювання розвитку водневої енергетики важливо не лише розробляти нові технології та механізми фінансування, але й створювати ефективні інструменти для зниження ризиків, зокрема через розробку механізмів страхування [450; 451].

Інвестори у сфері водневої енергетики в Україні стикаються з комплексом ризиків, що ускладнюють реалізацію проєктів. Серед основних – технологічні ризики, пов’язані з невизначеністю ефективності та доступності новітніх водневих технологій, а також регуляторна нестабільність через недосконалість законодавчої бази.

Таблиця 3.2.

**Механізми державної підтримки водневої енергетики в Україні:
напрями та реалізація**

Механізм державної підтримки	Опис	Реалізація
Гранти	Фінансування інноваційних водневих проєктів і технологій.	Державні програми, міжнародні фонди, наукові проєкти.
Пільги	Податкові стимули для виробників, постачальників та інвесторів у водень.	Урядові ініціативи, податкові реформи, «зелені» програми.
Субсидії на інфраструктуру	Фінансова підтримка будівництва та логістики водневої інфраструктури.	Національні інвестпрограми, місцеві ініціативи.
Міжнародні субсидії	Сприяння співпраці з міжнародними партнерами у сфері водневої енергетики.	Програми ЄС, міжнародні фонди, транснаціональні проєкти.
Контроль ефективності	Забезпечення прозорості, моніторингу й ефективного використання державних коштів.	Агентства енергетики, органи держконтролю.

Джерело: створена автором на основі [554]

Важливу роль відіграють фінансові чинники: валютні коливання, відсутність довгострокового фінансування та нестача державної підтримки. Додаткову складність становить волатильність цін на енергоресурси, що знижує передбачуваність економічної ефективності проєктів. Корупційні практики та адміністративні бар’єри також підривають довіру інвесторів. Нарешті, військові ризики, зумовлені збройною агресією, створюють загрози безпеці інфраструктури та знижують інвестиційну привабливість країни на міжнародному рівні [452; 453; 454; 455; 456; 457].

Запровадження механізмів страхування є важливим інструментом зниження ризиків, пов’язаних з інвестуванням у водневу енергетику в Україні. Спеціалізовані страхові продукти можуть охоплювати широкий спектр ризиків: від фінансових і технологічних до регуляторних, політичних і військових. Зокрема, страхування інвестиційних ризиків захищає від наслідків змін у законодавстві, страхування

технологічних та операційних ризиків компенсує втрати від неефективних технологій або збоїв у роботі обладнання, тоді як політичне й військове страхування мінімізує збитки через нестабільність і бойові дії. Використання таких інструментів створює передумови для стабільного інвестиційного середовища та сприяє залученню капіталу в умовах високої невизначеності [458; 459; 460; 461; 462].

У розвинених країнах, таких як Німеччина та США, уже застосовуються механізми страхування для підтримки водневої енергетики. У Німеччині створено спеціалізовані програми страхування для покриття технологічних і регуляторних ризиків, зокрема при впровадженні нових технологій водневої енергетики. У США також існують пільгові програми страхування для покриття частини витрат на технологічні розробки та забезпечення фінансових гарантій для інвесторів, що працюють у сфері відновлювальних джерел енергії [463].

Враховуючи специфічні умови, такі як високий рівень корупції та військова нестабільність, Україні необхідно розробити спеціалізовані механізми страхування ризиків для водневої енергетики. Створення національної платформи для страхування цих ризиків у співпраці з міжнародними страховими компаніями та фінансовими установами дозволить знизити бар'єри для розвитку інфраструктури водневої економіки в Україні. Основні аспекти механізмів страхування ризиків інвесторів у проєкти водневої енергетики в Україні наведені в додатку А2.

Ефективне страхування ризиків є передумовою залучення інвестицій у водневу енергетику України, з урахуванням як загальних фінансово-технологічних, так і специфічних загроз – корупції та війни. Комплексні страхові механізми забезпечать інвестиційну стійкість і сприятимуть розвитку галузі. Впровадження принципів ESG (екологія, соціальна відповідальність, корпоративне управління) стає ключовим чинником для оцінки сталості та інвестиційної привабливості водневих проєктів у глобальному контексті «зеленої трансформації». Воднева енергетика, як інноваційна галузь, вимагає високих стандартів екологічної безпеки, соціальної інклюзивності та прозорого управління, що особливо актуально для України на шляху інтеграції до Європейського зеленого курсу [464; 465].

Компонент «Е» передбачає скорочення викидів CO₂, впровадження зеленого водню, ефективне управління ресурсами та дотримання екологічних норм відповідно до стандартів ЄС, зокрема Директиви 2018/2001/ЄС. «S»-аспект охоплює вплив на зайнятість, охорону праці, участь громад і справедливий перехід, що набуває особливого значення в умовах війни та відновлення постраждалих територій. Водночас «G» вимагає прозорого корпоративного управління, антикорупційної політики, підзвітності та використання цифрових інструментів для моніторингу [466; 467; 468].

Застосування ESG-підходів підвищує довіру міжнародних інвесторів і відкриває доступ до «зеленого» фінансування, включно з облігаціями сталого розвитку. Однак ефективна імплементація ESG в Україні стримується низкою бар'єрів: нестачею нормативної бази, низьким рівнем управлінських компетенцій та корупційними ризиками. Тому впровадження ESG має супроводжуватись інституційними реформами, розвитком експертної спроможності та підтримкою партнерських моделей, що інтегрують екологічну доцільність, соціальну відповідальність і принципи етичного управління [469; 470; 471; 472]. Впровадження принципів ESG у партнерських проєктах водневої енергетики України наведені в додатку Б2.

Впровадження ESG-принципів є ключовим чинником підвищення інвестиційної привабливості та довготривалої ефективності партнерських проєктів у водневій економіці України. Це не лише сприяє досягненню міжнародних кліматичних цілей, але й зміцнює інституційну довіру та стійкість стратегічного розвитку енергетики в умовах сучасних викликів.

Формування відкритих реєстрів партнерських ініціатив у сфері водневої енергетики є ключовим елементом забезпечення прозорості, довіри та ефективної координації між усіма учасниками – державними органами, бізнесом, науковими установами, інвесторами та громадськістю. У контексті інтеграції України до європейського кліматичного простору та декарбонізації економіки відкритість інформації щодо водневих проєктів сприяє зниженню ризиків, уникненню дублювання зусиль і підвищенню якості стратегічного планування [473].

Система відкритих даних у водневій галузі повинна базуватись на принципах прозорості, актуальності, інтероперабельності та інклюзивності. Це означає відкритий

доступ до інформації про учасників, бюджети, технології, результати проєктів, регулярне оновлення даних, сумісність із іншими державними та міжнародними реєстрами, а також можливість участі зацікавлених сторін у верифікації та обговоренні інформації [474; 475].

Такі реєстри мають багатофункціональне значення: вони слугують інструментом моніторингу проєктів, забезпечують доступ до аналітичних оцінок ефективності ініціатив, координують зусилля партнерів та полегшують інвесторам пошук перевірених проєктів. У результаті відкриті дані сприяють формуванню довіри до національної водневої політики та підвищують привабливість сектору для внутрішніх і зовнішніх інвесторів [476].

Попри наявність окремих цифрових ресурсів, таких як реєстр проєктів Держенергоефективності чи база енергетичних субвенцій, в Україні досі бракує цілісного галузевого реєстру, орієнтованого на водневі партнерства. Відсутність централізованої платформи ускладнює координацію між державними структурами, бізнесом і науковими установами, гальмує стратегічне планування та знижує рівень довіри з боку потенційних інвесторів [477].

Додатковими бар'єрами є нерозвинена цифрова інфраструктура на регіональному рівні, а також ризики політичної непрозорості та корупції, які підкреслюють необхідність впровадження незалежного аудиту та автоматизованих механізмів збору даних. У цьому контексті Україна може адаптувати європейський досвід – зокрема, платформи на кшталт Hydrogen Europe Project Database – інтегруючи їх з національними інструментами електронного врядування, такими як «Дія» або eData [478; 479].

Для створення ефективної системи відкритих даних у сфері водневої енергетики необхідно ухвалити відповідну нормативно-правову базу, визначити відповідального адміністратора (наприклад, Мінекономіки або спеціалізований Національний офіс водневої енергетики), впровадити API-доступ для наукових і аналітичних структур, а також створити публічний дашборд з візуалізацією активних партнерських ініціатив. Такі заходи сприятимуть посиленню прозорості, довіри та ефективного управління в секторі водневої енергетики [480]. Ключові параметри відкритих даних про партнерські ініціативи у водневій енергетиці України наведені в додатку В2. Система відкритих даних і публічний реєстр партнерських ініціатив є критичною для прозорого та ефективного стратегування

водневої економіки України, сприяючи координації, залученню інвесторів і зміцненню довіри в умовах воєнних і структурних ризиків.

Сучасна воднева трансформація енергетики розвивається в глобальному контексті, де ключову роль відіграють міжнародні партнерства, такі як Hydrogen Europe та Clean Hydrogen Partnership (раніше Clean Hydrogen Alliance). Україна, як держава-кандидат на вступ до ЄС та учасник Європейської зеленої угоди, має стратегічну потребу в інтеграції до цих ініціатив для синергії з інституційними, технологічними й інвестиційними трендами [481].

У контексті збройної агресії Росії, руйнування критичної енергетичної інфраструктури та потреби переходу до низьковуглецевих джерел, міжнародна кооперація у сфері водневої енергетики набуває для України не лише економічного, а й стратегічного значення. Вона розглядається як елемент енергетичної безпеки та довгострокової інтеграції до європейського енергетичного простору [482].

Участь у глобальних водневих ініціативах відкриває для України низку переваг: доступ до фінансування через програми Horizon Europe, Innovation Fund, IPCEI Hydrogen; можливість технологічного трансферу та впровадження європейських стандартів; формування гармонізованого регуляторного середовища з ЄС; а також геоekonomічну інтеграцію, зокрема в межах проєкту Hydrogen Backbone, який передбачає транспортування українського зеленого водню до країн Європи [483; 484; 485; 486].

На практичному рівні Україна вже здійснює кроки щодо залучення до провідних водневих альянсів. У 2023 році українські організації долучились до діалогу з Hydrogen Europe через ініціативу EU4Energy. Також відкривається потенціал участі у програмі Clean Hydrogen Partnership, яка функціонує в межах Horizon Europe і передбачає залучення міжнародних консорціумів за умови відповідності європейським пріоритетам у сфері інновацій [487; 488]. Для інтеграції у водневу архітектуру ЄС Україні слід налагодити функціональну синергію з європейськими партнерами через спільні стандарти, проєкти та дослідницькі альянси. Важливою є розробка дорожньої карти співпраці з Hydrogen Europe з чіткими ініціативами та фінансовими моделями.

Невід'ємним елементом інтеграції є гармонізація технічних стандартів і сертифікаційних процедур, зокрема з урахуванням європейських інструментів, таких як

CertifHy. Важливо також забезпечити участь України у транскордонних проєктах, зокрема з Польщею, Словаччиною та Німеччиною, що сприятиме формуванню єдиної інфраструктурної та нормативної рамки.

Незважаючи на високий потенціал, головними бар'єрами залишаються слабке міжнародне представництво українських інституцій, брак компетенцій у сфері проєктного менеджменту та інституційна фрагментація, зокрема відсутність єдиного координуючого органу. Для подолання цих проблем доцільним є створення Національного офісу водневої кооперації з ЄС, розвиток мережі водневих хабів і реалізація просвітницьких кампаній щодо участі у європейських програмах. Форми, механізми та потенціал синергії України з європейськими та глобальними водневими ініціативами, зокрема Hydrogen Europe та Clean Hydrogen Partnership наведені в табл. 3.3.

Синергія з європейськими та глобальними водневими ініціативами є не лише інструментом залучення інвестицій, а й основою стратегічного позиціонування України у поствоєнній енергетичній архітектурі Європи. Її реалізація вимагає узгоджених дій між урядом, науковою спільнотою, бізнесом і міжнародними структурами.

Таблиця 3.3.

Міжнародна синергія у сфері водневої енергетики

Напрямок	Механізми	Очікувані результати	Приклади
Альянси	Участь у Hydrogen Europe, Clean Hydrogen Partnership	Міжнародне визнання, стратегічне лобі	EU4Energy, перемовини з Hydrogen Europe
Фінансування	Horizon Europe, Innovation Fund, IPCEI Hydrogen	Залучення коштів для пілотних проєктів	Заявки на водневі хаби
Технології	Технічний обмін, сертифікація	Доступ до інновацій, прискорене впровадження	CertifHy, євростандарти
Стандартизація	Гармонізація з ЄС	Правова сумісність, безпека інфраструктури	Законопроект про водень
Інфраструктура	Hydrogen Backbone	Інтеграція в європейську мережу, експорт водню	Проекти трубопровідного експорту
Наука та дослідження	Спільні проєкти, участь у кластерах	Посилення наукової позиції, співпраця	Horizon Europe, ВНЗ-консорціуми

Джерело: створена автором на основі [593]

У післякризовий період трансформації української економіки воднева енергетика набуває стратегічного значення як інструмент досягнення кліматичних цілей, зміцнення енергетичної безпеки та інтеграції до ЄС. Ключовим фактором успіху є не лише імпорт готових технологій, а й розвиток власної науково-дослідної бази, адаптованої до національних умов. Створення спільних НДДКР у сфері зеленого, синього та туркізового водню сприятиме формуванню інноваційних рішень, посиленню наукової обґрунтованості впроваджуваних технологій і включенню українських науковців до європейських дослідницьких програм, зокрема Horizon Europe та Clean Hydrogen Partnership [489]. Основні цілі спільних НДДКР у водневій сфері наведені в додатку Г2.

У контексті розвитку водневої енергетики ключовими напрямками наукових досліджень для України є підвищення ефективності низькотемпературного електролізу з використанням Pt-free каталізаторів, розробка інфраструктури зберігання і транспортування (H_2 -ready трубопроводи), створення паливних елементів для водневої мобільності, інтеграція водню з ВДЕ в локальних енергосистемах, а також забезпечення стандартів безпеки в умовах нестабільності та військових ризиків [490; 491; 492].

Для реалізації цих досліджень доцільним є створення міжуніверситетських консорціумів за участі українських та європейських технічних університетів, формування індустріальних наукових альянсів із залученням провідних енергетичних компаній, запуск спільних науково-виробничих хабів та активна участь у програмах ЄС (Horizon Europe, LIFE, Erasmus+) [493; 494].

Очікуваними результатами є поява національних технологічних розробок, збільшення кількості патентів і стартапів, зміцнення міжнародної позиції української науки, залучення фінансування від міжнародних донорів (EIB, EBRD) та посилення кадрового потенціалу шляхом підготовки PhD і міжнародних стажувань молодих науковців. Етапи створення та реалізації спільних НДДКР-програм у сфері водневої енергетики України наведені в додатку Д2.

Ефективна реалізація партнерських проєктів у сфері водневої енергетики вимагає не лише належної інституційно-економічної основи, а й постійного моніторингу, контролю та оцінки результативності. Систематичне спостереження забезпечує прозорість управління, гнучкість стратегій у змінних умовах, запобігання неефективному

використанню ресурсів та посилення довіри до публічно-приватного партнерства. Важливою складовою є впровадження індикативно-метричної системи оцінювання, узгодженої з міжнародними стандартами сталого розвитку (SDG 7), таксономією ЄС та принципами ESG [495; 496]. Структура механізму моніторингу партнерських проєктів у водневій сфері наведена в додатку E2.

Воднева енергетика – складна технологічна сфера, що потребує багатопараметричної оцінки ефективності. Серед основних компонентів – науково-технологічна оцінка (інноваційність, технічний рівень готовності TRL), економічна ефективність (вартість виробництва водню, показники рентабельності та здатність привертати інвестиції), екологічна складова (зменшення CO₂-викидів та оцінка життєвого циклу), а також соціальна – через створення нових професій, підвищення кваліфікації кадрів і рівень інклюзивності проєктів [497; 498].

Інструментальна підтримка моніторингу включає використання цифрових платформ управління, що інтегрують дані виробництва, споживання і впливу водню; відкритих платформ з доступом до ключових метрик; а також аналітичних панелей для урядових установ, інвесторів і міжнародних партнерів. Це інституційно важливий механізм, який забезпечує прозорість, підзвітність, залучення приватного капіталу і інтеграцію України у міжнародну водневу спільноту, поєднуючи технологічні, організаційні і правові підходи [499].

Розвиток водневої економіки потребує підготовки висококваліфікованих кадрів через партнерські освітні програми за участю держави, бізнесу, університетів і міжнародних структур. Особливо важливою є інтеграція українських фахівців у глобальні ініціативи, як-от Hydrogen Europe та Clean Hydrogen Partnership. Структура партнерських освітніх програм для підготовки кадрів в галузі водневої економіки наведена в додатку Ж2.

Розвиток водневої енергетики вимагає мультидисциплінарної підготовки кадрів, орієнтованої на технічні, економічні, управлінські та соціоекологічні аспекти. Освітні програми повинні включати дисципліни з виробництва, зберігання і транспортування водню, економіки водневих проєктів, регуляторики та сталого розвитку. Особлива увага має приділятися проєктному менеджменту, комерціалізації технологій та екологічному

моніторингу, що дозволить формувати фахівців нового покоління – інженерів, управлінців і аналітиків у сфері низьковуглецевої енергетики [500].

Участь України у міжнародних водневих програмах відкриває можливості для спільних освітніх ініціатив із провідними університетами ЄС, онлайн-навчання та стажувань у галузевих компаніях. Інтеграція наукових установ до освітнього процесу підвищує практичну спрямованість навчання, сприяє залученню молодих дослідників до НДДКР і створенню лабораторної бази з водневої енергетики. Такий підхід формує не лише кваліфікований людський капітал, а й підтримує інноваційний розвиток водневої економіки України [501; 502].

Підготовка кадрів для водневої енергетики в Україні має базуватися на міжнародних стандартах, зокрема тих, що формуються у межах програм Horizon Europe та Clean Hydrogen Partnership, що забезпечує не лише інтеграцію в глобальну науково-технологічну екосистему, але й підвищення конкурентоспроможності українських фахівців. Освітні системи повинні передбачати набуття міжнародних сертифікатів, формування ключових компетенцій – від технічної експертизи до інноваційного мислення – та забезпечення тісної співпраці з європейськими освітніми й науковими установами. Участь у партнерських програмах сприятиме не лише засвоєнню теоретичних знань, а й набуттю практичного досвіду, що є критично важливим для формування професійного середовища у сфері водневої економіки [503].

Після масштабної агресії росії, що триває з 2014 року та активізувалася в 2022 році, внутрішній і зовнішній контекст для розвитку водневої енергетики в Україні суттєво змінився. У цих умовах адаптація організаційно-економічних механізмів партнерства стає критично важливою. Воднева енергетика, як складова стратегії енергетичної безпеки, повинна враховувати руйнівний вплив війни: значні пошкодження інфраструктури потребують її відновлення, а ризики для інвестицій знижують привабливість проєктів на міжнародному ринку. Нестабільність на енергетичних ринках стимулює необхідність запровадження нових форм партнерства для забезпечення надійних джерел енергії [504].

У післявоєнному контексті ключовим є перегляд фінансових механізмів водневих проєктів через активне залучення міжнародних кредитів та грантів, а також розвиток публічно-приватних партнерств (PPP) з метою відбудови інфраструктури з мінімальним

державним навантаженням. Базовим етапом відновлення має стати стратегічне планування з будівництва нових водневих станцій і сховищ, адаптованих до потреб післявоєнної економіки. Також важливо модернізувати енергетичні мережі, інтегруючи водневі технології для підвищення їх стійкості в умовах воєнних або інших надзвичайних ситуацій [505; 506; 507].

Розвиток спільних науково-дослідних ініціатив стає ключовим елементом адаптації та відновлення водневої економіки України у післявоєнний період. Участь у міжнародних програмах, таких як Horizon Europe, забезпечує доступ до передових технологій, що застосовуються в ЄС для модернізації енергетичної інфраструктури, зокрема у водневих проєктах. Паралельно, впровадження міжнародних освітніх програм допоможе підготувати кваліфікованих фахівців для реалізації таких ініціатив. Формування консорціумів із європейськими та іншими міжнародними партнерами сприяє не лише відновленню заздалегідь зруйнованих об'єктів, але й інтеграції новітніх технологій у національну водневу екосистему, укріплюючи науково-технічний потенціал країни [508; 509]. Адаптація механізмів партнерства до умов війни та післявоєнної відбудови України деталізована в додатку 32. Адаптація партнерських механізмів до умов війни та відбудови є критичною для сталого розвитку водневої економіки України, вимагаючи гнучкого фінансування, відновлення інфраструктури, міжнародної співпраці та стратегічного планування.

Стратегічне формування енергетичного партнерства до 2050 року є ключовим для сталого переходу України до водневої економіки, заснованої на принципах декарбонізації, енергетичної безпеки та інновацій, що є особливо актуальним на тлі поствоєнної відбудови та кліматичних викликів. Важливим інструментом у цьому процесі є форсайт-підхід, який дозволяє науково обґрунтувати майбутні сценарії, інтегруючи технологічні, економічні, соціальні й екологічні фактори на основі системного аналізу глобальних і регіональних трендів (зокрема цільових орієнтирів ЄС щодо «зеленого» водню), потенційних бар'єрів і можливостей. Цей підхід включає побудову сценаріїв розвитку – від оптимістичних, що передбачають швидкий доступ до інвестицій і технологій, до песимістичних, які враховують затримки відновлення інфраструктури – а також формування дорожніх карт із чіткими етапами: адаптація до

нормативної бази ЄС, формування водневої інфраструктури та інтеграція до європейської енергосистеми. Використання форсайту сприяє мінімізації стратегічних ризиків та підвищенню адаптивності енергетичної політики в умовах невизначеного міжнародного середовища [510; 511]. Ключові стратегічні орієнтири розвитку енергетичного партнерства України до 2050 року в контексті формування водневої економіки наведені в додатку И2.

До 2050 року Україна має трансформувати свою енергетичну систему у низьковуглецеву, де зелений водень займатиме центральну роль. Основними стратегічними цілями є збільшення його частки в національному енергобалансі до 20–25% та розвиток водневого експорту в ЄС через створення водневих коридорів (наприклад, Україна–Словаччина–Німеччина). Для цього необхідна повноправна участь у європейських програмах Hydrogen Europe і Clean Hydrogen Partnership, а також гармонізація національного законодавства з директивами ЄС (RED II, Hydrogen Act) [512; 513].

Усі водневі партнерські проєкти мають відповідати критеріям ESG: забезпечення нульових CO₂ викидів, створення нових робочих місць та прозорого корпоративного управління. Кадровий розвиток передбачає створення освітньо-наукових кластерів у провідних ЗВО та запуск міжнародних програм із фокусом на водневі технології, інжиніринг та управління. У партнерстві з умовами війни ключовими завданнями є адаптація механізмів відновлення енергетики через будівництво модульних електролізаторів, мобільних сховищ та розвиток логістики, стійкої до зовнішніх загроз [514; 515; 516].

Формування стратегічних орієнтирів до 2050 року у сфері енергетичного партнерства повинно ґрунтуватися на форсайт-методології як ключовому інструменті передбачення майбутніх викликів та можливостей для розвитку водневої економіки України, що дозволить створити адаптивну, інноваційну й екологічно орієнтовану модель енергетичного розвитку, здатну витримати виклики турбулентного світу, зокрема у післявоєнний період.

У контексті міжнародних кліматичних зобов'язань Україна має не лише інтегруватися у транснаціональні ініціативи типу Hydrogen Europe чи Clean Hydrogen Alliance, але й виробити власне бачення енергетичного майбутнього, що базується на

національних перевагах: наявності значного потенціалу відновлюваних джерел енергії, технічній базі для електролізу, географічній близькості до ринків ЄС та високій науковій компетенції. Застосування форсайт-інструментів дозволить конкретизувати ці переваги в межах сценарних моделей, які охоплюють часові горизонти 2030, 2040 та 2050 років.

Крім того, форсайт може бути ефективним засобом побудови консенсусу серед стейкхолдерів – від державних органів і бізнесу до науковців і громадянського суспільства. Такий підхід забезпечить підвищення рівня інституційної довіри й прозорості у розробці стратегій партнерства, зокрема у сферах спільного інвестування, наукових досліджень, ESG-комплаєнсу та освітніх програм.

З урахуванням воєнного стану і потреб післявоєнного відновлення, стратегічні орієнтири мають також включати елементи стійкості до зовнішніх шоків, диверсифікацію партнерських форматів (зокрема з глобальним Півднем), інструменти страхування ризиків для інвесторів та моніторинг ефективності реалізації довгострокових цілей. Усе це можливо лише за умови інтеграції форсайтного мислення на всіх етапах стратегічного планування – від збору експертних оцінок до формування нормативних документів.

Таким чином, формування до 2050 року дієвої моделі енергетичного партнерства повинно спиратися на стратегічні орієнтири, які враховують не лише екологічні виклики, а й політичні реалії (зокрема процес євроінтеграції, післявоєнну реконструкцію та посилення енергетичної безпеки), а також економічні чинники – інвестиційну привабливість сектору водневої енергетики, потребу у модернізації енергетичної інфраструктури та створенні доданої вартості всередині країни. Такий підхід уможливить Україні забезпечити конкурентоспроможність на глобальному водневому ринку, особливо в Центрально-Східній Європі, і зробити свій внесок у досягнення цілей кліматичної нейтральності.

Формування механізму організаційно-економічного партнерства у сфері водневої енергетики є ключовою складовою кліматичної трансформації енергетичного сектору України. З огляду на міжнародні зобов'язання, зокрема Паризьку угоду та Європейський зелений курс, розвиток водневої економіки має відбуватись у контексті інтеграції до глобальних енергетичних ланцюгів, гармонізації стандартів, мобілізації інвестицій і впровадження інноваційних технологій.

Ключову роль у реалізації водневої стратегії відіграє ефективна міжсекторальна взаємодія між державою, бізнесом, науковими установами та міжнародними партнерами. Створення прозорих платформ для співпраці, розвиток кластерних моделей, формалізація партнерств через меморандуми та угоди – усе це забезпечує системність та передбачуваність процесу трансформації. Водночас важливими є фінансові механізми підтримки, страхування ризиків і впровадження принципів ESG, які підвищують інвестиційну привабливість сектора.

Особливу увагу слід приділити інституційному зміцненню та розвитку національного кадрового потенціалу, що включає мультидисциплінарну освіту, підтримку НДДКР та створення цифрових інструментів моніторингу. У післявоєнний період ці компоненти мають стати основою для відновлення енергетичної інфраструктури, посилення енергетичної безпеки та економічного зростання.

Таким чином, формування партнерської архітектури у сфері водневої енергетики є не лише засобом досягнення кліматичних цілей, а й стратегічним напрямом сталого розвитку України.

3.3. Концептуальна модель стратегічної оцінки трансформації промисловості відповідно до принципів вуглецевої нейтральної водневої економіки

В Україні розвиток водневої економіки тільки починає набирати обертів, і на даний момент статистика в цій сфері є обмеженою. Однак існують численні прогнози і оцінки, які вказують на значний потенціал розвитку цього сектору в найближчі роки. Відповідно до експертних оцінок, Україна має можливість виробляти до 505 мільйонів кубометрів водню на рік, переважно з використанням відновлювальних джерел енергії, таких як сонце і вітер. Такі дані створюють фундамент для майбутнього розвитку водневої економіки, хоча на даний момент фактичний обсяг виробництва водню залишається обмеженим через відсутність достатньо розвиненої інфраструктури та технологій.

Щодо експорту водню, то Україна наразі не має значного обсягу його постачання на зовнішні ринки. Однак є плани щодо розвитку цієї сфери, зокрема в контексті майбутніх постачань до Європейського Союзу. Прогнозується, що до 2030 року Україна зможе розпочати експортувати водень, зокрема завдяки розбудові інфраструктури та підтримці міжнародних партнерів [517; 518].

Водневі заправні станції в Україні є поки що в обмеженій кількості, лише кілька таких станцій працюють у великих містах, таких як Київ. Однак з огляду на глобальні тенденції та підвищену увагу до екологічно чистих технологій, очікується, що в найближчі роки, до 2030 року, кількість водневих заправок в Україні значно зросте. Зокрема, це відбудеться завдяки державній підтримці та розвитку відповідної інфраструктури, а також з огляду на зростаючий інтерес до водневих автомобілів в країні.

Що стосується інвестицій у водневу економіку, то на даний момент загальний обсяг інвестицій в цю сферу в Україні ще не досягнув великих розмірів. Проте вже є окремі проекти, які залучили інвестиції від міжнародних організацій, таких як Європейський Союз і Світовий банк. Прогнозується, що до 2030 року загальні інвестиції у водневу інфраструктуру можуть сягнути кількох мільярдів доларів США, що дозволить розвивати нові технології виробництва водню і сприяти створенню нових робочих місць, а також підвищенню енергетичної безпеки країни.

З точки зору викидів CO₂, Україна є одним з найбільших виробників парникових газів серед країн Східної Європи. У 2021 році обсяг викидів CO₂ в Україні становив близько 330 мільйонів тонн на рік, і більша частина цих викидів припадає на енергетичний сектор, металургію та сільське господарство. Проте розвиток водневої економіки може суттєво знизити ці викиди. Водень, як джерело енергії, може замінити традиційні види палива, такі як вугілля, газ і нафта, що дозволить значно зменшити рівень викидів у таких секторах, як металургія та енергетика.

В Україні також є потенціал для впровадження водневих технологій у сільському господарстві, що є значним джерелом викидів парникових газів. Відповідно до оцінок, сільське господарство та тваринництво в Україні виробляють близько 14% від загальних викидів парникових газів. Водневі технології можуть бути застосовані для зменшення

енергетичних витрат у сільському господарстві та зниження викидів метану та інших парникових газів [519; 520].

Аналіз таблиці 1 показує, що рівень державної підтримки розвитку водневої економіки значно відрізняється між країнами. Китай виділяє найбільше субсидій у розмірі 700 млн доларів, тоді як США – 500 млн, Японія – 400 млн, Німеччина – 300 млн, а Україна значно поступається з показником у 20 млн доларів. Податкові пільги також різняться: США використовує корпоративні податкові знижки, Німеччина надає пільгові кредити, Японія компенсує витрати, Китай пропонує податкові знижки, а Україна застосовує пільговий тариф на електроенергію.

Рівень інвестицій в інфраструктуру свідчить про стратегічну спрямованість країн на розвиток водневої економіки. Китай вкладає 5 млрд доларів, США – 3 млрд, Німеччина – 2 млрд, Японія – 1,5 млрд, а Україна – лише 0,1 млрд доларів. Цілі щодо скорочення викидів CO₂ також різняться: найамбітніші плани у Німеччини – 40%, США планує скоротити на 30%, Китай – на 25%, Японія – на 20%, а Україна має найнижчий показник – 10%.

Загалом Китай та США є беззаперечними лідерами у підтримці водневої економіки, оскільки поєднують значні фінансові вкладення з потужними інфраструктурними проектами та податковими стимулами. Україна, на відміну від цих країн, суттєво відстає, що вказує на необхідність розширення державних програм підтримки, фінансування інфраструктурних проектів і впровадження ефективних податкових механізмів для стимулювання розвитку водневого сектору (табл.3.4.).

Незважаючи на те, що воднева економіка в Україні на сьогоднішній день перебуває на етапі становлення, вона має великий потенціал для розвитку у майбутньому. Впровадження водневих технологій може стати важливою частиною стратегії України щодо зниження викидів CO₂, розвитку відновлювальних джерел енергії та покращення енергетичної безпеки країни.

Варто зазначити, що існують значні відмінності у фінансуванні та розвитку водневої економіки між країнами. Китай є безумовним лідером за обсягом інвестицій у водневі проекти – 20 млрд USD, що значно перевищує показники інших країн. США займають другу позицію з інвестиціями в 14,5 млрд USD, за ними слідують Німеччина

(11,2 млрд USD) та Японія (9,3 млрд USD). Україна значно відстає з показником у 0,5 млрд USD.

Таблиця 3.4.

Державне сприяння розвитку водневої економіки в різних країнах

Країна	Субсидії, млн. дол.	Податкові пільги	Інвестиції в інфраструктуру, млрд. дол	Цілі щодо скорочення викидів CO ₂ , %
США	500	Знайки на корпоративний податок	3	30
Німеччина	300	Пільговий кредит	2	40
Японія	400	Відшкодування витрат	1,5	20
Китай	700	Податкові знижки	5	25
Україна	20	Пільговий тариф на електроенергію	0,1	10

Джерело: створено автором на основі [521; 522; 523]

Щодо державного фінансування, Китай також виділяє найбільше коштів – 10 млрд USD, тоді як Німеччина інвестує 7,2 млрд USD, США – 5 млрд USD, Японія – 4,5 млрд USD, а Україна лише 0,3 млрд USD. Водночас розподіл приватних інвестицій демонструє іншу картину: США та Японія мають найбільші обсяги – 9,5 млрд USD і 10 млрд USD відповідно, тоді як у Китаю цей показник становить 4,8 млрд USD, аналогічно до Німеччини. Україна залучає мінімальний обсяг приватного капіталу – 0,2 млрд USD.

За кількістю реалізованих водневих проєктів лідирує Китай (40 проєктів), що узгоджується з його значними державними вкладеннями. США мають 38 проєктів, Японія – 29, Німеччина – 22. Україна демонструє найнижчий рівень розвитку з усього 5 проєктами, що вказує на недостатній рівень інвестиційної підтримки та залучення капіталу в цей сектор.

Загалом Китай і США лідирують як за загальним фінансуванням, так і за кількістю реалізованих проєктів, використовуючи збалансований підхід до державного та приватного інвестування. Німеччина і Японія також мають значний рівень підтримки, але із дещо меншими обсягами залученого капіталу. Україна ж поки що суттєво відстає від світових лідерів, що свідчить про необхідність розширення державного фінансування та

створення сприятливих умов для залучення приватних інвестицій у розвиток водневої економіки (Рис.3.1).

Світовий ринок водневої економіки зазнає активного розвитку, і країни по всьому світу розробляють свої стратегії щодо впровадження водневих технологій у національній економіці. Європейський Союз виступає одним із лідерів у цьому процесі, а його амбітні цілі включають виробництво 10 мільйонів тонн водню до 2030 року. ЄС активно підтримує розвиток "зеленого" водню, що отримується за допомогою відновлювальних джерел енергії, таких як сонце та вітер, а також будує інфраструктуру для транспортування водню, створюючи водневі заправки. Згідно з оцінками, Європа стане одним з найбільших споживачів водню, зокрема завдяки використанню цієї технології в промисловості, енергетиці та транспорті.

Німеччина займає лідируючу позицію серед країн ЄС у сфері водневої економіки, інвестуючи 9 мільярдів євро до 2030 року. Країна активно розвиває водень, вироблений із відновлювальних джерел енергії, і будує необхідну інфраструктуру, включаючи водневі заправки для автомобілів та заводи для виробництва водню. Крім того, Німеччина планує створити водневі хаби, які можуть стати важливими центрами для експорту водню як в межах ЄС, так і за його межами.

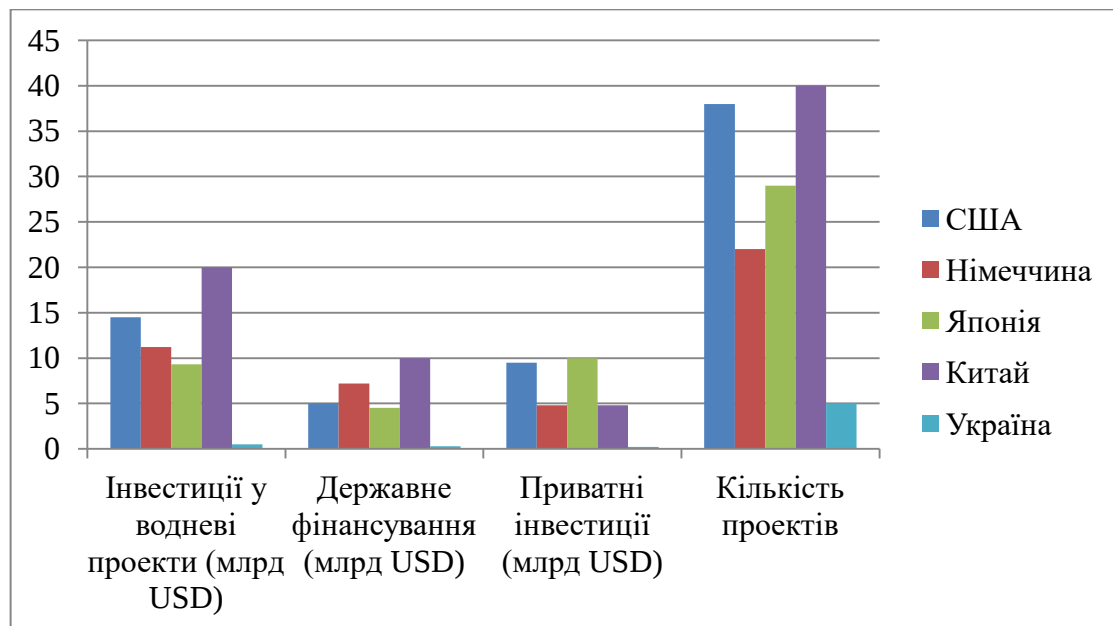


Рис. 3.1 – Цільове інвестування у розвиток водневої економіки у 2021-2023 роках

Джерело: створено на основі [524; 525]

Німеччина займає лідируючу позицію серед країн ЄС у сфері водневої економіки, інвестуючи 9 мільярдів євро до 2030 року. Країна активно розвиває водень, вироблений із відновлювальних джерел енергії, і будує необхідну інфраструктуру, включаючи водневі заправки для автомобілів та заводи для виробництва водню. Крім того, Німеччина планує створити водневі хаби, які можуть стати важливими центрами для експорту водню як в межах ЄС, так і за його межами.

Японія, яка вже реалізує проект імпорту водню з Австралії, активно розвиває водневі технології у транспортуванні та промисловості. Вони вкладають значні кошти в створення водневих заправок по всій країні, що дозволить забезпечити водневі автомобілі паливом. До 2030 року Японія планує створити водневий економічний хаб, що сприятиме розвитку водневих технологій на міжнародному рівні [526; 527].

Австралія, з огляду на свої великі запаси сонячної та вітрової енергії, розглядається як країна з великим потенціалом для виробництва «зеленого» водню. У 2020 році уряд Австралії оголосив стратегію розвитку водневої економіки з орієнтацією на експорт водню до Японії, Південної Кореї та інших азіатських країн. Країна активно реалізує проекти для виробництва водню і розробляє нові маршрути транспортування водню на міжнародні ринки.

Китай, у свою чергу, активно інвестує в водневі технології, орієнтуючи свої зусилля на розвиток водневих автомобілів і інфраструктури. Програма «Інновація в водневій економіці» передбачає істотне збільшення виробництва водневих автомобілів та встановлення водневих заправок по всій країні. Китай також має плани щодо використання водню в промисловості для зменшення залежності від традиційних джерел енергії. Очікується, що до 2030 року Китай стане одним з найбільших виробників водню в світі.

Південна Корея активно працює над розвитком водневої економіки, зокрема у секторі транспорту. Країна планує до 2040 року стати водневим хабом для Азії, інвестуючи в виробництво водневих автомобілів і розвиток інфраструктури водневих заправок. Південна Корея також сприяє використанню водню для виробництва

електричної енергії, що дасть змогу значно скоротити викиди CO₂ в енергетичному секторі.

США активно займаються розвитком водневої економіки в рамках своєї стратегії переходу до чистих джерел енергії. У рамках національної програми підтримується створення водневих хабів та розвиток інфраструктури для транспорту. Крім того, США роблять акцент на інноваційних технологіях, що дозволяє розвивати водневі технології для важкої промисловості, де водень може замінити традиційні види палива, такі як природний газ.

Норвегія, завдяки своїм потужним відновлювальним джерелам енергії, зокрема гідроелектростанціям, розвиває водневу економіку, орієнтуючись на виробництво «зеленого» водню. Норвегія активно підтримує водневі проекти в транспортному секторі, зокрема в розробці водневих автомобілів і суден, що уможливить країні значно знизити викиди CO₂.

ОАЕ в рамках своєї стратегії диверсифікації економіки активно розвивають водневу економіку, зокрема через виробництво "зеленого" водню за допомогою сонячної енергії. Країна має на меті стати одним з лідерів на ринку водневих технологій у Близькому Сході, реалізуючи великі проекти, пов'язані з виробництвом водню [528; 529].

Катар також розвиває водневу економіку, зокрема орієнтуючись на експорт водню до Європи та Азії. Країна активно підтримує інвестиції в виробництво водню на основі природного газу та відновлювальних джерел енергії, що робить її важливим гравцем на міжнародному ринку водню.

Таким чином, ці країни мають спільну мету – зменшити залежність від традиційних енергетичних ресурсів, скоротити викиди CO₂ та створити нові можливості для розвитку інфраструктури, промисловості та транспорту. Розвиток водневої економіки є важливим елементом у глобальній стратегії боротьби зі зміною клімату та забезпечення енергетичної безпеки на міжнародному рівні (Додаток Н2).

Світовий ринок водневої економіки демонструє значні темпи розвитку, зростаючи як у виробництві водню, так і в застосуванні водневих технологій у різних секторах економіки. У 2015 році глобальне виробництво водню становило 60 мільйонів тонн, і до 2020 року воно збільшилося до 70 мільйонів тонн, а до 2023 року цей показник досягнув

75 мільйонів тонн. Прогноз на 2030 рік свідчить, що виробництво водню може зрости до 120 мільйонів тонн, і до 2050 року цей показник може досягти 500 мільйонів тонн.

Особливу увагу привертає зростання частки "зеленого" водню, який виробляється з використанням відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія. У 2015 році його частка була лише 1,5%, але вже до 2020 року вона зросла до 4%, а до 2023 року ця цифра досягла 6%. Прогноз на 2030 рік передбачає, що частка "зеленого" водню може досягти 25%, а до 2050 року – 60%, що є важливим кроком для зниження викидів CO₂ і переходу до сталої енергетики.

Окреслені зміни супроводжуються значним зниженням вартості виробництва "зеленого" водню. У 2015 році середня вартість виробництва складала 6 доларів США за кілограм, але з часом вона знижувалася. У 2020 році вона становила 4,5 долара, а до 2023 року – 3,8 долара. Прогноз на 2030 рік передбачає ще більше зниження вартості – до 2,5 долара за кілограм, а до 2050 року вартість може скласти лише 1 долар за кілограм, що робить водень все більш доступним джерелом енергії для промисловості та транспорту.

Інвестиції у водневу економіку також значно зросли. Якщо в 2015 році обсяг інвестицій становив лише 5 мільярдів доларів США, то до 2020 року він збільшився до 30 мільярдів доларів, а до 2023 року ця цифра досягла 80 мільярдів доларів. Прогноз на 2030 рік – це вже 500 мільярдів доларів, і до 2050 року ці інвестиції можуть сягнути 2,5 трильйонів доларів, що свідчить про значний інтерес до розвитку водневих технологій і необхідність у великих капіталовкладеннях для побудови нових інфраструктур і виробничих потужностей. Сукупно це призводить до значного зниження викидів CO₂, що є основною метою водневої економіки. У 2015 році зниження викидів CO₂ завдяки використанню водневих технологій складало лише 20 мільйонів тонн. До 2020 року цей показник зріс до 150 мільйонів тонн, а до 2023 року – вже до 300 мільйонів тонн. Прогноз на 2030 рік передбачає, що зниження викидів може скласти 1200 мільйонів тонн, і до 2050 року цей показник може досягнути 5000 мільйонів тонн. Такий приріст є результатом глобальних зусиль з переходу на водневі технології, які знижують залежність від викопних видів палива та сприяють більш чистому виробництву енергії [530; 531].

Ще однією важливою тенденцією є розвиток інфраструктури водневих заправних станцій. У 2015 році у світі було лише 200 таких станцій, але до 2020 року їх кількість

зросла до 750, а до 2023 року – вже до 1200. За прогнозами, до 2030 року кількість водневих заправок може досягти 5000, і до 2050 року цей показник може зрости до 25000, що значно спростить використання водневого транспорту та підвищить доступність водню для кінцевих споживачів.

Таблиця 3.5.

Статистичні показники розвитку водневої економіки та скорочення викидів CO₂

Показник	2015	2020	2023	Прогноз 2030	Прогноз 2050
Світове виробництво водню, млн тонн	60	70	75	120	500
Частка "зеленого" водню, %	1.5	4	6	25	60
Середня вартість виробництва "зеленого" водню, USD/кг	6.0	4.5	3.8	2.5	1.0
Обсяг інвестицій у водневу економіку, млрд USD	5	30	80	500	2500
Зниження викидів CO ₂ завдяки водневим технологіям, млн тонн	20	150	300	1200	5000
Кількість водневих заправок станцій у світі	200	750	1200	5000	25000

Джерело: створено автором на основі [532; 533]

Важливим є те, що Китай є лідером серед цих країн за кількістю водневих станцій (300) та цільовим обсягом виробництва водню (15 млн тонн на рік), що свідчить про масштабні плани щодо впровадження водневих технологій. Крім того, Китай ставить за мету скоротити викиди CO₂ на 200 млн тонн на рік, що є найбільшим значенням серед усіх країн. Однак, у частці водню в загальному споживанні Китай планує лише 3%, що є помірним показником порівняно з іншими країнами.

США також мають значні плани, зокрема обсяг виробництва водню становить 10 млн тонн на рік, і вони планують скоротити викиди CO₂ на 90 млн тонн. Водневі станції в США планується створити 100, а частка водню у споживанні досягатиме 5%, що є цілком амбітним, але трохи меншим за показники Німеччини та Японії.

Німеччина має цілі, що також є значними, з обсягом виробництва водню 5 млн тонн на рік та 50 водневими станціями. Вони ставлять за мету скоротити викиди CO₂ на

60 млн тонн на рік, а частка водню у споживанні має становити 7%. Це свідчить про високий рівень амбіцій Німеччини у сфері водневої енергетики та екологічних ініціатив.

Японія планує виробляти 3 млн тонн водню на рік та має ціль скорочення викидів CO₂ на 30 млн тонн. Водневі станції в Японії плануються на рівні 25, а частка водню у споживанні – найбільша серед усіх країн, на рівні 12%, що відображає високу орієнтацію на водневу енергетику.

Україна має найменші показники у всіх категоріях: обсяг виробництва водню становить лише 1 млн тонн на рік, планується створити 10 водневих станцій, а частка водню у загальному споживанні має бути лише 2%. Плановане скорочення викидів CO₂ складає 10 млн тонн на рік, що є найменшим значенням серед зазначених країн. Це свідчить про те, що Україна лише починає активно працювати над розвитком водневої енергетики, але має помірні цілі щодо зменшення впливу на навколишнє середовище.

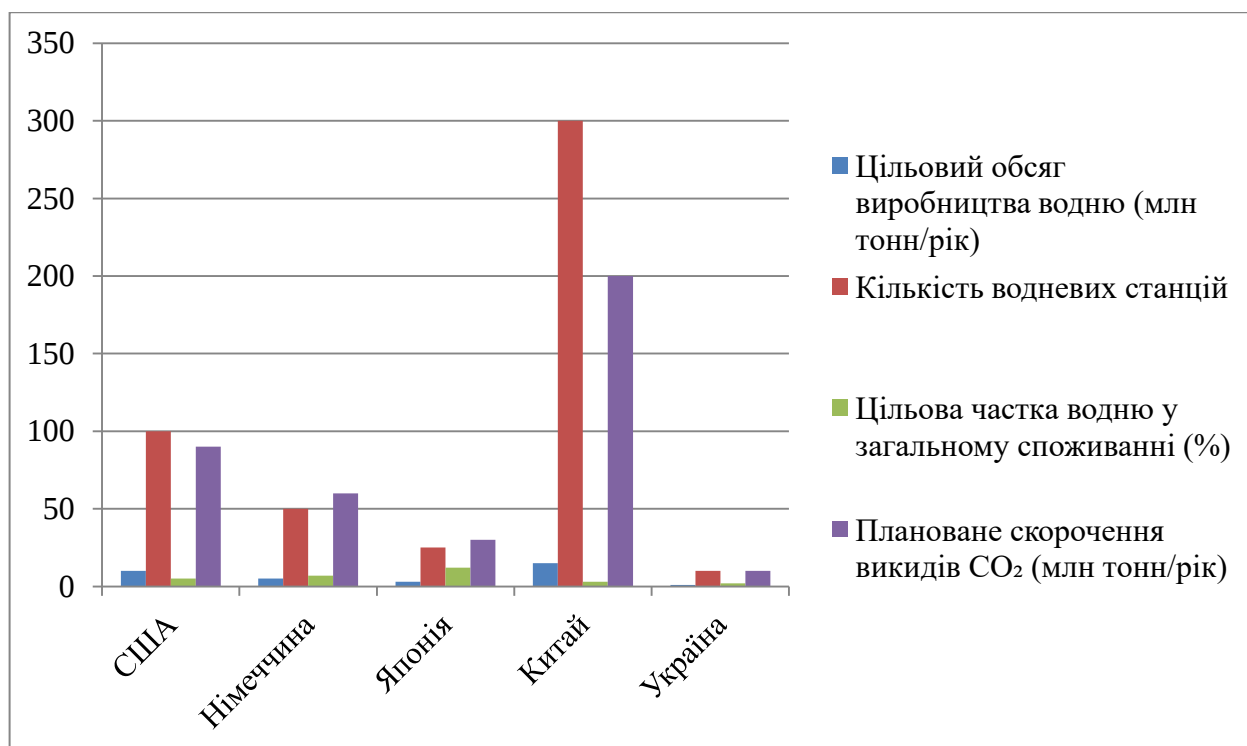


Рис. 3.2 – Прогнозовані показники розвитку водневої економіки до 2030 року.

Джерело: створено на основі [534; 535]

Отже, світовий ринок водневої економіки демонструє стійкий ріст і активний розвиток, зокрема в контексті виробництва водню, зниження викидів CO₂, зменшення вартості "зеленого" водню, інвестицій в інфраструктуру та створення водневих заправок.

Наведені показники свідчать про серйозні зусилля країн по всьому світу щодо інтеграції водневих технологій у свою економіку і переходу до більш чистих і сталих джерел енергії.

Дані, що були використані нами для прогнозування розвитку водневої економіки, охоплюють кілька основних аспектів, які взаємодіють і взаємозалежні між собою. Усі ці показники надають комплексну картину майбутнього стану водневої економіки, її впливу на різні сектори економіки, а також на глобальну екологічну ситуацію. Перш за все, для побудови прогнозу були використані актуальні статистичні дані про виробництво водню на світовому рівні, що включало показники загального обсягу виробленого водню, розподіл його за типами (зеленого, блакитного, сірого) та витрати на його виробництво. Оцінка цих показників на основі вже наявних даних уможливила зробити прогнози на найближчі роки, враховуючи темпи зростання виробництва та можливості технологічних змін.

Зокрема, для прогнозу обсягу виробництва водню на 2030 та 2050 роки було використано метод екстраполяції, тобто, розрахунок за допомогою середніх темпів зростання на основі історичних даних. Цей підхід дозволив оцінити глобальний попит на водневі технології та передбачити відповідне збільшення обсягів виробництва водню. Прогноз на 2030 рік передбачає досягнення 120 млн тонн водню, а до 2050 року – 500 млн тонн.

Одним з важливих факторів є оцінка частки "зеленого" водню у загальному обсязі виробленого водню. Зелені технології виробництва водню (на основі відновлювальних джерел енергії) стають дедалі дешевшими, що дозволяє збільшити їх частку у виробництві водню. Прогнозуючи цей розвиток, було передбачено, що частка «зеленого» водню становитиме 25% у 2030 році і 60% у 2050 році, що свідчить про поступовий перехід до більш екологічно чистих технологій, що забезпечує зниження залежності від традиційних енергетичних джерел.

Також, особливо важливою є оцінка вартості виробництва "зеленого" водню. На основі існуючих трендів і прогнозів щодо зниження вартості відновлювальних джерел енергії, а також поліпшення ефективності виробництва водню, прогнозується, що до 2050

року ціна водню знизиться до 1 USD за кілограм, що уможливить зробити водень більш конкурентоспроможним і доступним для використання у різних секторах економіки.

Іншим важливим аспектом є обсяг інвестицій, що передбачається для розвитку водневої економіки. Прогнозування інвестицій побудоване на аналізі поточних витрат та потенціалу зростання сектора. Очікується, що до 2030 року обсяг інвестицій у водневу економіку досягне 500 млрд USD, а до 2050 року зросте до 2500 млрд USD. Наведені цифри відображають інтерес урядів та приватного сектору до водневої економіки, як до перспективного напрямку для зростання та інновацій.

Зниження викидів CO₂ є ще одним важливим результатом впровадження водневих технологій. Оскільки водень є чистим енергетичним носієм, він має значний потенціал у зменшенні викидів парникових газів. За прогнозами, водневі технології дозволять знизити викиди CO₂ на 300 млн тонн до 2030 року і на 5000 млн тонн до 2050 року. Це є важливим вкладом у глобальні зусилля з боротьби зі змінами клімату.

Нарешті, прогноз щодо розвитку інфраструктури водневих заправок є важливим для оцінки потенціалу використання водневих автомобілів. Очікується, що кількість водневих заправок зросте з 1200 у 2023 році до 25000 у 2050 році, що підкреслює важливість розвитку інфраструктури для підтримки водневого транспорту та збільшення попиту на водневі автомобілі (рис.3.3).

Таким чином, усі ці дані є важливими для оцінки розвитку водневої економіки, прогнозування її впливу на енергетичний сектор, транспорт, промисловість, а також на зниження викидів CO₂. Вони можуть бути використані для розробки стратегій та політик, що забезпечать сталий розвиток водневої економіки, зокрема через підтримку інвестицій, розвиток технологій та інфраструктури водневого сектору.

Варто зазначити, що основою трансформації промисловості відповідно до принципів вуглецево-нейтральної водневої економіки є широкомасштабне впровадження водневих технологій у промислове виробництво, транспортну галузь, енергетику та інші ключові сфери економіки. Даний процес включає кілька важливих складових, зокрема нормативно-правове регулювання, технологічну модернізацію, економічну ефективність, екологічну відповідність та соціальну адаптацію.

Однією з головних передумов такої трансформації є формування сприятливого інституційно-регуляторного середовища. Державна політика відіграє ключову роль у створенні механізмів підтримки підприємств, що прагнуть здійснити перехід на водневі технології.

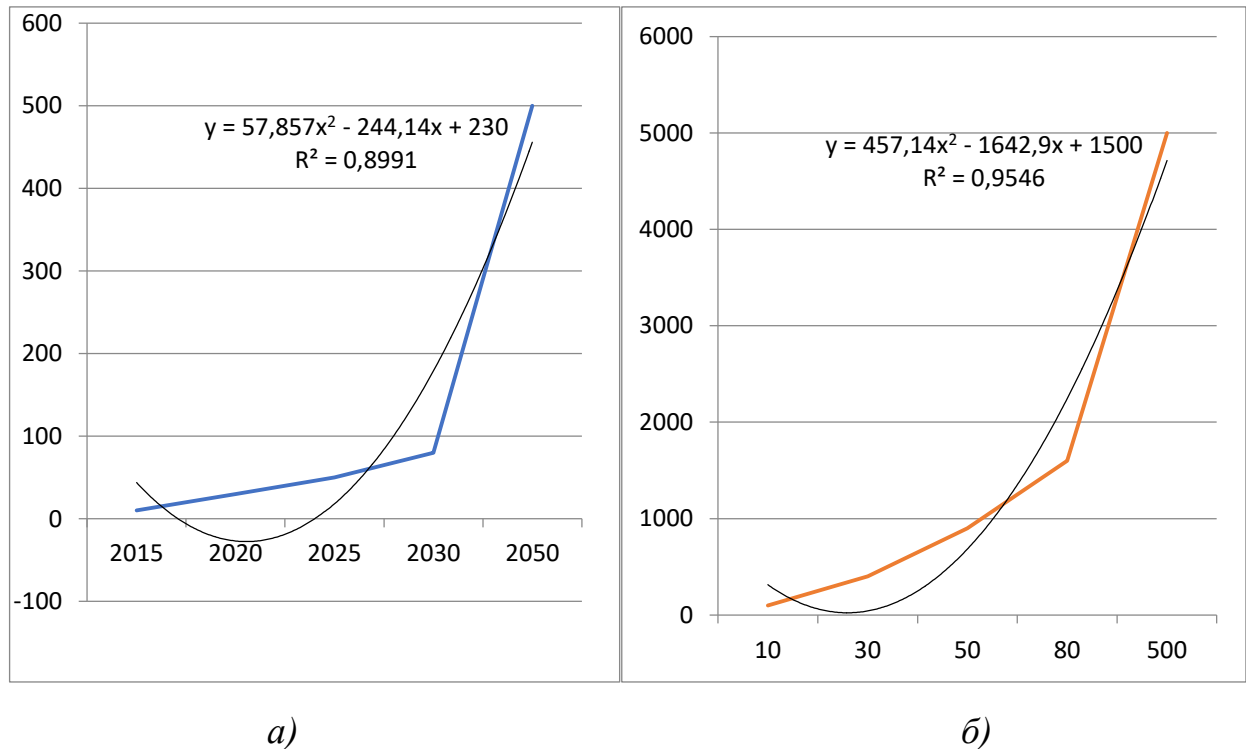


Рис. 3.3 – Світове виробництво водню, млн. тонн (а), зниження викидів CO₂, млн. тонн (б)

Джерело: створено автором

Йдеться про розробку національних стратегій розвитку водневої економіки, встановлення цільових показників щодо скорочення викидів, запровадження податкових пільг для компаній, які впроваджують водневі технології, а також створення спеціальних фондів для підтримки досліджень та інновацій у цій сфері. Ефективне регуляторне середовище повинно включати прозорі механізми контролю та моніторингу впровадження нових технологій, а також передбачати стимулювання міжнародного партнерства у галузі виробництва та використання водню [536].

Важливим аспектом є технологічна модернізація, яка передбачає оновлення промислової інфраструктури та впровадження передових водневих технологій. Виробництво водню може здійснюватися різними методами, серед яких особливу увагу привертає електроліз води за допомогою відновлюваних джерел енергії, що дозволяє

отримати так званий «зелений» водень. Такий процес передбачає використання сонячної та вітрової енергії для розщеплення молекул води, що робить водень екологічно чистим джерелом енергії. Крім того, трансформація промисловості включає інтеграцію систем уловлювання та зберігання вуглецю (CCUS), які дають можливість значно зменшити викиди CO₂, що утворюються в процесі промислового виробництва.

Третім важливим елементом концептуальної моделі є оцінка економічної ефективності впровадження водневої економіки. Оскільки перехід на нові технології потребує значних капіталовкладень, необхідно здійснювати аналіз інвестиційної привабливості водневих проєктів. Оцінка економічної ефективності включає аналіз вартості виробництва та транспортування водню, дослідження ринку водневих технологій та прогнозування майбутнього попиту на водень у різних секторах економіки. Зниження вартості електролізерів, розбудова відповідної інфраструктури та розвиток міжнародного співробітництва у сфері водневої енергетики сприятимуть створенню конкурентоспроможного водневого ринку.

Ще одним важливим компонентом є екологічна відповідність, яка включає оцінку впливу водневих технологій на довкілля. Впровадження водневої економіки має відповідати принципам сталого розвитку, що передбачає мінімізацію екологічного навантаження на природу. Для цього необхідно оцінювати вуглецевий слід промислових підприємств до і після впровадження нових технологій, розробляти стратегії зменшення негативного впливу на екосистеми та контролювати екологічну безпеку процесів виробництва, транспортування та використання водню.

Останнім, але не менш важливим аспектом є соціальна адаптація та вплив водневої економіки на ринок праці. Трансформація промисловості неминуче призводить до змін у структурі зайнятості, тому необхідно розробляти програми перепідготовки працівників та створювати нові робочі місця в сфері водневої енергетики. Важливим завданням є також формування екологічної свідомості серед населення та бізнесу, що сприятиме швидшому впровадженню водневих технологій у повсякденне життя.

Загальна стратегічна оцінка трансформації промисловості передбачає комплексний підхід, що включає аналіз вихідного стану промисловості, визначення цільових показників скорочення викидів, розробку сценаріїв модернізації, а також постійний

моніторинг ефективності впроваджених заходів. Важливу роль у цьому процесі відіграє міжнародне співробітництво, обмін досвідом та координація зусиль між державами, що дозволить створити ефективну систему управління водневою економікою та забезпечити її сталий розвиток [537].

Таким чином, концептуальна модель стратегічної оцінки трансформації промисловості відповідно до принципів вуглецево-нейтральної водневої економіки є багаторівневим процесом, який охоплює інституційні, технологічні, економічні, екологічні та соціальні аспекти. Її реалізація сприятиме зниженню негативного впливу промисловості на довкілля, забезпеченню енергетичної незалежності та формуванню нових можливостей для сталого розвитку економіки.

Концептуальна модель стратегічної оцінки трансформації промисловості відповідно до принципів вуглецевої нейтральної водневої економіки може бути структурована через кілька ключових блоків, що допоможуть систематизувати та проаналізувати процес переходу до цієї економічної моделі.

Першим блоком є аналіз поточного стану промисловості. Це передбачає оцінку рівня викидів CO₂, що дає уявлення про поточний екологічний стан основних галузей промисловості, таких як енергетика, транспорт, металургія та хімічна промисловість. У цьому контексті також важливо оцінити технології, що використовуються в цих галузях, з точки зору їх екологічної ефективності і можливостей для декарбонізації. Оцінка ресурсних потоків та енергоефективності, зокрема використання традиційних енергоносіїв, також є важливою частиною цього блоку, оскільки забезпечує розуміння можливостей для переходу до відновлювальних джерел енергії. Крім того, важливим аспектом є інфраструктура для водневої економіки, яка включає етапи підготовки до виробництва, зберігання та транспортування водню.

Другим блоком є принципи вуглецевої нейтральної водневої економіки. У цьому контексті ключовим є розгляд технологій, що дозволяють знижувати викиди, зокрема через використання водню як чистого пального для великих промислових процесів. Важливим аспектом є також зростання частки відновлювальних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, для виробництва водню. Особлива увага приділяється зеленим технологіям і інноваціям, включаючи новітні електролізери та інфраструктуру для

зберігання водню. Прогнозування ефективності зниження викидів CO₂ при переході до водневої економіки є важливим елементом цього блоку.

Третій блок передбачає оцінку етапів трансформації промисловості. У короткостроковій перспективі (1-3 роки) важливо зробити перші кроки щодо впровадження водневих технологій і розвитку інфраструктури. На середньостроковій стадії (3-7 років) має відбутися розширення водневої інфраструктури та адаптація промислових підприємств до водневих технологій, а також зменшення залежності від традиційних енергоносіїв. У довгостроковій перспективі (7-20 років) передбачається масштабне виробництво та використання водню, досягнення вуглецевої нейтральності, а також реалізація інноваційних проектів у водневій індустрії.

У рамках економічних аспектів трансформації необхідно враховувати потреби в інвестиціях та фінансуванні для розвитку водневої інфраструктури, включаючи як державні, так і приватні інвестиції. Оцінка вартості виробництва водню повинна враховувати зниження витрат завдяки економії масштабу та розвитку технологій. Важливим елементом є створення фіскальних та регуляторних стимулів для підтримки водневої економіки, зокрема через податкові пільги та субсидії на дослідження й інновації.

Соціальні аспекти трансформації включають підготовку кадрів для водневої індустрії та оцінку впливу на зайнятість у традиційних секторах економіки. Також важливо розглядати питання соціальної підтримки громад, що можуть постраждати від скорочення робочих місць у вугледобувних і інших традиційних галузях, а також забезпечення прозорості в процесах прийняття рішень щодо змін у промисловості.

Інфраструктура і технології відіграють важливу роль у формуванні водневої економіки. Розробка технологій транспортування, зберігання та заправки воднем є необхідною для створення ефективної інфраструктури. Формування національних і міжнародних водневих хабів сприятиме інтеграції водневої інфраструктури на глобальному рівні.

Оцінка екологічних і кліматичних результатів трансформації передбачає прогнозування ефективності водневих технологій у зниженні викидів CO₂, а також

розробку систем моніторингу для оцінки прогресу в досягненні вуглецевої нейтральності і відстеження впливу на навколишнє середовище.

Глобальний контекст і міжнародна співпраця в цьому процесі мають велике значення, зокрема для розвитку міжнародних ініціатив і партнерств, таких як Парижська угода, що стимулюють розвиток водневої економіки.

Нарешті, оцінка ризиків і управління ними має включати аналіз технологічних, економічних, фінансових і регуляторних ризиків, пов'язаних з розвитком водневої економіки, щоб забезпечити ефективну трансформацію промисловості відповідно до нових принципів.

Реалізація запропонованої концептуальної моделі стратегічної оцінки трансформації промисловості сприятиме кільком важливим досягненням. По-перше, вона уможливить значно знизити викиди парникових газів, оскільки впровадження водневих технологій допоможе скоротити викиди CO₂ у виробничих процесах. Такий підхід відповідає глобальним ініціативам з боротьби зі зміною клімату, таким як Парижська угода, що є важливим елементом для досягнення міжнародних зобов'язань щодо декарбонізації.

По-друге, підвищення енергоефективності промисловості стане важливим результатом цієї моделі. Заміна традиційних енергоносіїв на водень і впровадження інноваційних технологій для збереження енергії уможливить значно знизити залежність від викопних джерел енергії, що сприятиме більш стійкому використанню ресурсів та зниженню виробничих витрат (додаток M2)

Крім того, трансформація на водневу економіку відкриває нові можливості для економічного зростання. Зокрема, розвиток нових бізнес-моделей, створення робочих місць у сфері водневої енергетики, будівництво інфраструктури та наукові дослідження сприятимуть збереженню і навіть створенню додаткової економічної цінності в промисловому секторі.

Завдяки використанню фінансових інструментів, таких як зелені облігації та пільгові кредити, також стане можливим залучення інвестицій у водневу енергетику, що забезпечить фінансову стабільність для реалізації інноваційних проектів. Це дозволить не тільки стимулювати економічний розвиток, але й покращити інвестиційну привабливість відповідних галузей.

Окрім того, розбудова необхідної інфраструктури для транспортування, зберігання та використання водню буде важливим етапом реалізації моделі, який забезпечить ефективне впровадження водневих технологій на підприємствах різних галузей, зокрема в енергетиці та важкій промисловості.

Перехід до водневої економіки також допоможе зміцнити екологічну стійкість, сприятиме збереженню природних ресурсів, зниженню забруднення навколишнього середовища та підтримці екологічного балансу в регіонах, де реалізуються водневі проекти.

Підвищення конкурентоспроможності підприємств також є одним з результатів впровадження цієї моделі. Використання сучасних екологічно чистих технологій дозволить підприємствам зберігати або підвищувати свою конкурентоспроможність на міжнародних ринках, де зростає попит на продукцію з низьким рівнем викидів вуглецю.

Додатково, реалізація концептуальної моделі допоможе підприємствам адаптуватися до вимог міжнародних екологічних стандартів і законодавства, що є важливим аспектом для залучення міжнародних партнерів і клієнтів. Завдяки цьому підприємства зможуть не тільки забезпечити відповідність вимогам, але й отримати нові можливості для співпраці на міжнародному рівні.

Підвищення обізнаності підприємств про важливість екологічної стійкості та сталих практик стане ще одним важливим результатом реалізації цієї моделі. Впровадження стійких технологій і водневої економіки також буде сприяти розвитку нових наукових підходів і практик у промисловому виробництві.

Насамкінець, модель сприятиме формуванню інтегрованих екологічних кластерів, що об'єднують промислові, наукові та фінансові ініціативи для створення ланцюгів поставок водню та взаємодії різних секторів економіки. Вона забезпечить стійкий розвиток водневої економіки і ефективну реалізацію інноваційних проектів.

Таким чином, реалізація цих результатів дозволить не лише значно знизити негативний вплив на навколишнє середовище, але й створить нові можливості для економічного зростання, інновацій і збереження конкурентоспроможності промислових підприємств у умовах глобальних змін.

Висновки до третього розділу

Форсайт-підхід забезпечив нову якість стратегування. Він поєднав ціннісні орієнтири, функціональні механізми та індикативні інструменти. Підхід адаптував планування до умов стратегічної невизначеності. Український контекст потребував саме такої моделі. Аксіологічний компонент сформував базові орієнтири розвитку. Він акцентував на інклюзивності, екологічній відповідальності та інституційній довірі. Ці цінності задали межі для сценарного планування.

Функціональний компонент реалізував операційні механізми. Він включав аналітичну, прогностичну, комунікаційну та інноваційну функції. Вони забезпечили зворотний зв'язок і сприяли участі стейкхолдерів. Індикативний компонент виконав функції оцінювання і моніторингу. До нього входили індекси, дорожні карти та сценарні матриці. Ці інструменти зробили стратегування вимірюваним і адаптивним.

Інституціональний форсайт забезпечив системний підхід до оцінки змін, активізував управлінські спроможності та посилив передбачення. Методологія об'єднала експертний, аналітичний і комунікаційний компоненти, а залучення стейкхолдерів сприяло створенню гнучкої мережевої моделі взаємодії. Ціннісна орієнтація та акцент на етиці й соціальній відповідальності підтримали формування стійких інституцій. Сценарії трансформації врахували ризики, можливості та умови реалізації, що сприяло ухваленню обґрунтованих управлінських рішень.

Дорожні карти забезпечили практичну орієнтацію дій. Вони структурували цілі, завдання, ресурси і часові межі. Кожна карта врахувала ризики й ефективність. Картографування синхронізувало дії стейкхолдерів і сприяло координації секторів і регіонів. Підхід зменшив фрагментацію і підвищив керованість. Матричний підхід відобразив сценарну різноманітність. Матриці поєднали чинники впливу та відповідальності. Вони дозволили оцінити ризики й спроможність. Індикатори моніторили реалізацію стратегій. Вони забезпечили зворотний зв'язок для корекції дій. Системний аналіз виявив зв'язки між елементами планування.

Таким чином, форсайт став інструментом адаптивного стратегування. Підхід поєднав бачення, дії та інструменти в єдину систему. Він відповідає викликам доби невизначеності.

Основні результати розділу опубліковані в наукових працях автора [538; 539; 540; 541; 542].

ВИСНОВКИ

У процесі дослідження реалізовано всі поставлені наукові завдання, що дало можливість комплексно обґрунтувати методологічні та прикладні засади стратегування розбудови водневої економіки в Україні. Основні висновки, отримані за результатами вирішення окремих завдань, формулюються таким чином:

У результаті застосування історико-логічного методу, аналізу наукових шкіл та категоріального синтезу встановлено основні етапи становлення парадигми водневої економіки в контексті глобальних енергетичних трансформацій. Обґрунтовано, що воднева економіка формується як міждисциплінарний науковий напрям, у межах якого інтегруються положення енергетичної безпеки, екологічної збалансованості та технологічної модернізації. Встановлено, що вона не лише відповідає викликам постіндустріальної доби, а й виступає одним із ключових концептів сучасної енергетичної парадигми, яка передбачає синергію цілей сталого розвитку, досягнення кліматичної нейтральності та формування нової інституційної архітектури енергетичного сектору.

На основі застосування методів системного аналізу, SWOT-оцінювання та інтерпретативного підходу було здійснено комплексне структурування водневої економіки як міжгалузевої інноваційної системи. Встановлено, що її функціонування забезпечується чотирма ключовими елементами: виробництвом (переважно з відновлюваних джерел енергії), зберіганням (включаючи інфраструктуру високого та низького тиску), транспортуванням (з урахуванням існуючих та перспективних

коридорів) і споживанням (у промисловості, транспорті, енергетиці). Виокремлено низку передумов, що зумовлюють доцільність впровадження водневої моделі в Україні: значний ВДЕ-потенціал, вигідне географічне розташування на перетині європейських енергетичних шляхів, наявність дослідницьких і виробничих ресурсів, а також потреба у модернізації енергоємних секторів на тлі глобального переходу до декарбонізованих технологій. Оцінено внутрішній потенціал України як високий, з можливістю подальшої експансії на європейський водневий ринок.

У межах дослідження проведено індикативне моделювання стратегічних орієнтирів становлення водневої економіки України з урахуванням національних і міжнародних пріоритетів енергетичної та кліматичної політики. Застосування контент-аналізу офіційних стратегічних документів Європейського Союзу, зокрема Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe, REPowerEU, а також національних дорожніх карт, дозволило виокремити ключові напрями розвитку водневої сфери у форматі багаторівневої системи цілей. Ця система охоплює три ієрархічні рівні: глобальний (досягнення кліматичної нейтральності, інтеграція у європейський водневий ринок), національний (енергетична безпека, декарбонізація промисловості, формування нормативно-правової бази) та галузевий (модернізація інфраструктури, науково-технічне забезпечення, ринкова підтримка попиту та пропозиції). Для кожного з рівнів розроблено систему кількісних і якісних індикаторів моніторингу, що забезпечує оцінку ефективності реалізації стратегічних цілей, а також уможливлює формувати механізми адаптивного управління у відповідь на зміни зовнішнього середовища.

Проведений порівняльний аналіз сучасного стану впровадження водневої економіки у провідних країнах світу – зокрема Німеччині, Японії, США та Австралії – дозволив ідентифікувати основні типові моделі реалізації водневої політики, що враховують національні особливості, рівень технологічного розвитку та пріоритети енергетичної безпеки. Встановлено, що ключовими чинниками ефективного реалізації водневої трансформації виступають: наявність цілеспрямованої державної стратегії з чітко визначеними орієнтирами, активна підтримка науково-дослідних і дослідно-конструкторських розробок (НДДКР), стимулювання приватних інвестицій через пільгове оподаткування та фінансування інфраструктурних проєктів. Значну роль у

просуванні водневої економіки відіграє принцип кластеризації, що передбачає формування спеціалізованих водневих хабів на базі індустріальних регіонів, портових зон або високотехнологічних центрів. Результати аналізу свідчать про ефективність системного підходу до поєднання регуляторної, інституційної та фінансової політики для створення сталого водневого ринку з високим ступенем інтеграції в енергетичні та логістичні системи.

Контент-аналіз стратегічних документів, що регламентують розвиток водневої економіки у провідних країнах світу та в Україні, дав можливість здійснити порівняльну оцінку нормативно-інституційних підходів, акцентів державної політики та механізмів реалізації цілей водневої трансформації. Зіставлення стратегічних ініціатив таких країн, як Німеччина, Франція, Японія, США та Австралія, з національними документами засвідчило значну варіативність у визначенні пріоритетів, інструментів стимулювання інновацій, форм співпраці між державою і бізнесом. Водночас було виявлено суттєві прогалини у вітчизняній водневій стратегії, які знижують ефективність її реалізації. Зокрема, зафіксовано недостатній рівень стандартизації та відсутність національної системи сертифікації водню відповідно до вимог ЄС; слабо структуровану систему державного фінансування інфраструктурних та інноваційних проєктів; відсутність чітких механізмів міжвідомчої координації; а також обмежене залучення України до міжнародних ініціатив і водневих альянсів. Отримані результати підтверджують необхідність перегляду стратегічного підходу з акцентом на інституційне зміцнення та міжнародну інтеграцію.

У ході дослідження здійснено багатофакторний SWOT-аналіз розвитку водневої економіки України та моделювання сценаріїв її інтеграції до європейського енергетичного простору з урахуванням вимог ENTSO-E. Результати аналізу засвідчили наявність високого потенціалу України для виробництва «зеленого» водню, зумовленого значними ресурсами відновлюваної енергетики, сприятливими природно-кліматичними умовами та вигідним гео економічним положенням поблизу потенційних водневих коридорів ЄС. Водночас ідентифіковано низку викликів, що потребують вирішення для забезпечення повноцінної участі України в європейському водневому ринку. Насамперед, це необхідність модернізації енергетичної та логістичної інфраструктури, у тому числі

водневої транспортної системи, резервуарного зберігання, компресійних станцій та терміналів для експорту. Акцентовано на потребі нормативного узгодження технічних регламентів і процедур сертифікації відповідно до стандартів ЄС. Обґрунтовано доцільність переходу до сценарного планування із врахуванням перспективи синхронізації енергосистем, що дозволить адаптувати національну водневу стратегію до умов транснаціонального енергетичного ринку.

Обґрунтування доцільності застосування форсайт-підходу до стратегування економічного розвитку України в умовах високої невизначеності здійснено шляхом інтеграції методів сценарного моделювання, системної динаміки та індикативного прогнозування. Розроблено концептуальну модель стратегічного планування, яка базується на синтезі аксіологічних орієнтирів (цінності сталого розвитку, енергетичної безпеки, технологічного суверенітету), функціональних компонентів управління (механізми координації, адаптивного регулювання, участі зацікавлених сторін) та системи індикаторів для оцінки ефективності управлінських рішень. У межах моделі змодельовано три альтернативні сценарії розвитку водневої економіки України – інерційний, адаптивний і проривний – з урахуванням факторів ризику, глобальних трендів, інституційної спроможності та інвестиційної динаміки. Для кожного сценарію визначено часові горизонти реалізації (коротко-, середньо- та довгострокова перспектива) і проаналізовано можливі мультиплікативні ефекти для національної економіки. Запропонований підхід забезпечує формування науково обґрунтованої стратегії розвитку, гнучкої до зовнішніх викликів і зорієнтованої на довготривалий економічний та екологічний результат.

У межах дослідження розроблено інтегрований механізм організаційно-економічного енергетичного партнерства, що враховує необхідність міжсекторальної координації та узгодження інтересів ключових стейкхолдерів у процесі формування водневої економіки. Запропонована модель передбачає горизонтальну взаємодію державних інституцій, приватного сектору, науково-освітніх установ та громадянського суспільства. Такий підхід спрямований на досягнення синергії у впровадженні інновацій, мобілізації фінансових ресурсів, формуванні сприятливого інституційного середовища та посиленні соціального капіталу. Обґрунтовано доцільність створення спеціалізованої

інституції – Національного агентства форсайту водневої економіки, яке відіграватиме роль координатора стратегічного бачення, генератора сценаріїв розвитку, оператора міжнародної експертизи та платформи для публічного діалогу. У концепції агентства враховано кращі практики подібних інституцій в ЄС і Великобританії, зокрема Government Office for Science та European Foresight Platform. Реалізація запропонованого механізму сприятиме підвищенню ефективності державної політики, формуванню довгострокових партнерств і досягненню кліматичних цілей у відповідності до міжнародних зобов'язань України.

У результаті дослідження сформовано концептуальну модель стратегічної оцінки трансформаційних процесів у промисловості України з урахуванням принципів вуглецево нейтральної водневої економіки. Модель ґрунтується на поєднанні трьох взаємопов'язаних векторів: технологічної модернізації (перехід до маловуглецевих та безвуглецевих виробничих процесів), декарбонізації промислових кластерів (особливо енергоємних галузей – металургії, хімії, цементної промисловості) та підвищення енергетичної ефективності через цифровізацію і впровадження інноваційних рішень. Запропонована модель враховує експортно-орієнтований потенціал української промисловості в умовах формування єдиного водневого простору ЄС, а також вимоги до участі у трансєвропейських водневих коридорах (зокрема H2Med та Central Hydrogen Corridor). Особливу увагу приділено адаптації нормативно-правового середовища, технічних регламентів і сертифікаційних процедур до вимог міжнародних стандартів. Модель передбачає сценарне прогнозування, оцінку трансформаційних ризиків та індикативне відстеження результативності державної політики у сфері «зеленої» індустріалізації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Джонс Л.В. До економії палива на рідкому водні: техн. Звіт. Л.В. Джонс. Анн-Арбор, Мічиганський інженерний університет, 1970. № UMR2320. 25 с.
2. Тома Л., Вернадський В., Харків: Фоліо, 2010. С. 119. ISBN 978-966-03-8233-6.
3. Шевченко О.В. Воднева економіка України. Перспективи та виклики. монографія. Інститут відновлюваної енергетики, С. 180. 2023
4. Павленко І.М. Водневі технології: інноваційний потенціал та економічні вигоди. Енергетична політика України. № 4(12). С. 45-52. 2022
5. Левченко П.С. Воднева енергетика: шлях до енергетичної незалежності України. Журнал сталого розвитку. Т. 7, № 3. С. 89-101. 2023
6. Гаджук О.І. Енергетичний перехід в Україні: проблеми та перспективи. Екоенергія. 210 с. 2012
7. Білан Ю.П. Енергетичний перехід: теоретичні та практичні аспекти. Економічні інновації. Т. 15, № 2. С. 34-48. 2013
8. Бакунов І.В. Енергетичні трансформації у світі та Україні: глобальні тенденції і перспективи. Вид-во Львівської політехніки. 320 с. 2018
9. Rifkin J. The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth. New York: TarcherPerigee. 320 p. 2002
10. Shor M. Hydrogen and the Future of the Energy System. Energy Policy. 2010. Vol. 38, No. 5. P. 2124-2132.
11. Вовк І.В. Технології виробництва водню для енергетичних потреб: монографія. НТУУ "КПІ", С. 210. 2015
12. Згуровський А.С. Технічні аспекти водневих технологій: від ідеї до практичного застосування. Видавництво Львівської політехніки. С. 185. 2016
13. Кудряшов В.І. Інноваційні технології виробництва водню. Відновлювана енергетика. № 3. С. 45-52. 2019
14. Decarbonizing the Economy: Policy and Technological Innovations for a Green Future. Washington: World Resources Institute. 156 p. 2007
15. Smith P. The Road to a Carbon-Free Future. London: Green Energy Press. 224 p. 2018

16. Шевченко А.А. Водневі технології в енергетиці: сучасний стан та перспективи. Електронний ресурс НТУ "ХПІ". 2022
URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua>
17. Воднева енергетика як драйвер декарбонізації економіки України. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 2(45). С. 34-48. 2023
18. Rifkin J., Jeremy P. The Hydrogen Economy: The Creation of the World-Wide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth. New York., 304 p. 2002
19. Lovins A.B. The Hydrogen Economy. Opportunities and Challenges International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 28, Issue 1. - P. 1-12. 2003
20. Бабенко Ю.В. Воднева економіка як основа сталого розвитку енергетики України. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Енергетика. № 1(15). С. 23-35. 2022
21. Бабенко Ю.В. Воднева енергетика як драйвер сталого розвитку промисловості України. Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси. № 1. - С. 12-25. 2023
22. Черненко М.П. Воднева економіка: стратегії для України. м.Київ. Енергоінновації, С. 240. 2023. ISBN 978-617-8025-78-4.
23. Медоуз Д., Рендерс Й., Беренс В. Межі зростання. 30 років потому. Академкнига, 2007. С. 324. ISBN 978-5-94628-218-5.
24. Data. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2021.
URL: <https://www.ipcc.ch/data/>.
25. Data and statistics. International Energy Agency, 2022.
URL: <https://www.iea.org/>.
26. Climate Change. Facts. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023.
URL: <https://science.nasa.gov/climate-change/>.
27. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide (CO₂). Global Monitoring Laboratory, 2023. URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>.
28. Рамкова конвенція Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату. Закон України від 29.10.1996 № 435/96-ВР Відомості Верховної Ради України. 1996. № 50. Ст. 277. URL: <https://zakon.rada.gov.ua>.
29. Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату. Закон України від 04.02.2004 № 1430-IV. Відомості Верховної Ради України. 2004. № 29. Ст. 366. URL: <https://zakon.rada.gov.ua>.

30. Нафтові війни 1973-2014. як ціну нафти використовували в міжнародній політиці. Український тиждень. 2014. URL: <https://tyzhden.ua>.
31. Ghosh T.K., Prelas M.A. Energy Resources and Systems. Volume 1: Fundamentals and Non-Renewable Resources. Dordrecht. Springer, 264 p. 2009
32. World Energy Outlook. Analysis. IEA, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook>.
33. Markets Energy. Bloomberg, 2022. URL: <https://www.bloomberg.com/>
34. Navigating the future of energy. Rystad Energy, 2023. URL: <https://www.rystadenergy.com/>.
35. Energy and Geopolitics. Analysis. Center for Strategic and International Studies, 2023. URL: <https://www.csis.org/>.
36. Energy and Geopolitics. Markets & Finance. US Energy Information Administration, 2003. URL: <https://www.eia.gov/>.
37. Ukraine and Russia at War. Reuters, 2022. URL: <https://www.reuters.com/>.
38. The European Green Deal. European Commission, 2023. URL: <https://commission.europa.eu/>.
39. Bockris J.O.M. The Future of Hydrogen. Paris: IEA, 2019. 203 p. URL: <https://www.iea.org/>.
40. Dudnyk O.M, N.I. Dunaevska, I.S. Sokolovska Development of the world market of fuel-cell power plants. The Problems of General Energy. 2020. Vol. 1(60). P. 66-73. DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2020.01.066>.
41. Бойченко С.В. Раціональне використання вуглеводневих палив: монографія. 216 с. м. Київ. НАУ. 2001
42. Lejda K. Hydrogen as an Ecological Energy Source for Automotive Applications Logistyka. nauka. 2014. № 6. P. 190-200.
43. Гуцаленко О.В., Т.С. Василенко. Перспективи застосування водню як альтернативного джерела енергії. Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. № 1(84). С. 193-200. 2014
44. Скорохода В.В., Ю.М. Солоніна. Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях: монографія. м. Київ. КІМ. С. 294. 2015
45. Bockris J.O.M. A hydrogen economy. Science. 1972. Vol. 176, Issue 4041. P. 1323. DOI: 10.1126/science.176.4041.1323.

46. Scita R., Raimondi P.P., Noussan M. Green Hydrogen. The Holy Grail of Decarbonisation. Milan. SSRN, 2020. URL: <https://papers.ssrn.com/>.
47. Moliner R., Lázaro M.J., Suelves I. Analysis of the strategies for bridging the gap towards the Hydrogen Economy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, Issue 43. P. 19500-19508. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.202.
48. Bjerkan K., Ryghaug M., Skjølsvold T. Actors in energy transitions. *Energy Research. Social Science*. 2021. Vol. 72. 101868. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101868.
49. Bjerkan K. Y., Ryghaug M., Skjølsvold T. Actors in energy transitions. Transformative potentials at the intersection between Norwegian port and transport systems. *Energy Research & Social Science*. 2021. № 72. P. 101868. DOI: 10.1016/j.erss.2020.101868.
50. Bockris J. A hydrogen economy. *Science*. 1972. Vol. 176, № 4041. P. 1323. DOI: 10.1126/science.176.4041.1323.
51. Porter M. Competitive Advantage of Nations. *Harvard Business Review*. 1990. URL: https://economie.ens.psl.eu/IMG/pdf/porter_1990_the_competitive_advantage_of_nations.pdf.
52. Moliner R., Lázaro J., Suelves I. Analysis of the strategies for bridging the gap towards the Hydrogen Economy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016. Vol. 41, № 43. P. 19500–19508. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.06.202.
53. Scita R., Raimondi P., Noussan M. Green Hydrogen: The Holy Grail of Decarbonisation? An Analysis of the Technical and Geopolitical Implications of the Future Hydrogen Economy. *SSRN Electronic Journal*. 2020. 49 p. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3709789.
54. Кудря С., Рєпкін О., Рубаненко О., Яценко Л., Шинкаренко Л. Етапи розвитку зеленої водневої енергетики України. *Воднева енергетика*. № 1(68). С. 5-16. 2022
55. Федулова С.О. Потенціал водневої економіки та низьковуглецевий розвиток. *Наука, технології, інновації*. 2024. № 1. С. 3-7. URL: <http://doi.org/10.35668/2520-6524-2024-1-01/>.
56. Мисків Г.В., Іваницький Р.Я. Зелений водень як основа для водневої економіки. *Наукові інновації та передові технології*. 2024. № 1. С. 508-519. URL: [http://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-1\(29\)-508-519](http://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-1(29)-508-519).

- 57.Дороніна І. Основи водневої економіки країн ЄС. International Scientific Conference "The Globalization of Scientific Knowledge: Theoretical and Practical Research": Conference Proceedings, December 17-18, 2021. Riga, Latvia. URL: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/187/5180/10885-1>.
- 58.Дороніна І., Криштоф Н., Москаленко С. Зелено-вугільний парадокс в Україні та світі як виклик для державного регулювання в енергетичному секторі. European Journal of Economics and Management. 2020. Vol. 6, № 6. URL: https://eujem.cz/wp-content/uploads/2020/eujem_2020_6_6/6.pdf.
- 59.Халатур С.М. Фінансова складова стратегії розбудови водневої економіки України. Вчені записки. № 36(3). С. 242-253. 2024
- 60.Рєпкін О.О. Сонячно-вітро-воднева станція: дис. ... канд. техн. наук: 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка". Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, С. 169. 2023
- 61.Рєпкін О. "Зелений" водень для України: як урятувати природу та ГТС. Mind.ua. 05.11.2019. URL: <https://mind.ua/openmind/20204093-zelenij-voden-dlya-ukrayini-yak-uryatuvati-prirodu-ta-gts>.
- 62.Рєпкін О. "Вже краще ви до нас": чи стане Україна сировинним придатком європейської енергетики. Mind.ua. 17.07.2020. URL: <https://mind.ua/openmind/20213391-vzhe-krashche-vi-do-nas-chi-stane-ukrayina-sirovinnim-pridatkom-evropejskoyi-energetiki>.
- 63.Олександр Рєпкін презентував проєкт Водневої стратегії України Німецькій національній водневій раді. Енергетична асоціація "Українська Воднева Рада". 01.03.2024. URL: <https://hydrogen.ua/ua/novyny/1793-oleksandr-repkin-prezentuvav-proekt-vodnevoji-strategiji-ukrajini-nimetskij-natsionalnij-vodnevij-radi>.
- 64.Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підручник. м. Київ. НТУУ "КПІ", С. 492. 2012
- 65.Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. за заг. ред. С. О. Кудрі. Вид. 3-тє, оновл. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України. С.56. 2024
- 66.Андрійцев Б. Зародження водневої економіки в Україні. Бізнес цензор. 01.03.2022. URL: <https://biz.censor.net/m3307889>.

67. Шрайбер О. А., Дубровський В. В., Тесленко О. І. Сучасний стан і перспективи розвитку водневої енергетики у світі. Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія "Технічні науки". Т. 32 (71). С. 199-209. 2021
68. Зеленько О. О., Гуцан Т. Г., Осьмірко І. В. Воднева енергетика та перспективи її розвитку в економіці України. Бізнес-інформ. 2022. № 8. С. 20-26. DOI: 10.32983/2222-4459-2022-8-20-26.
69. Кудря С., Рєпкін О., Яценко Л., Шинкаренко Л., Ткаленко М. Концепція дорожньої карти розвитку водневої енергетики України на період до 2035 року. Відроджувана енергетика. № 4. С. 22-28. 2019
70. Відроджувані джерела енергії. за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відроджуваної енергетики НАНУ. С. 392. 2020
71. 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. No. 161, Vol. 1. URL: <http://apir.iir.edu.ua/index.php/apmv/article/view/3946/3596>.
72. Мазуренко В., Панченко Є., Яценко О. Стратегія АСЕАН на світовому енергетичному ринку в умовах його трансформації. Економічний аналіз. 2020. Т. 30, № 3. С. 16-24. DOI: 10.35774/econa2020.03.016.
73. International Energy Agency. The Future of Hydrogen. 2019. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
74. Міжнародне енергетичне агентство. The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities / International Energy Agency (IEA). Paris. IEA, 2021. 203 p. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
75. Про встановлення "зелених" тарифів на електричну енергію... Постанова НКРЕКП від 31.12.2020 № 2877. URL: <https://www.nerc.gov.ua/?id=58069>.
76. Тащєєв Ю. В., Войтко С. В., Трофименко О. О., Рєпкін О. О., Кудря Т. С. Глобальні тенденції розвитку водневих технологій у промисловості. Бізнес-Інформ. 2020. № 8. С. 103-114.
77. Hydrogen Council. Path to Hydrogen Competitiveness. A Cost Perspective. Brussels, Belgium, 2020. 79 p.
78. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (1992). URL: <https://unfccc.int>.
79. Рамкова конвенція ООН про зміну клімату: Закон України № 435/96-ВР від 29.10.1996. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/995_044.

- 80.Стілл, С. Нова фінансова ціль – це страховий поліс для людства [Електронний ресурс] : заключна промова на COP29. 2024. URL: <https://unfccc.int/news/this-new-finance-goal-is-an-insurance-policy-for-humanity-simon-stiell-at-close-of-cop29> (дата звернення: 23.06.2025).
- 81.Київський протокол до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату. Закон України № 1430-IV від 04.02.2004 Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801#Text (дата звернення: 23.06.2025).
82. Паризька угода. Закон України № 1469-VIII від 14.07.2016. Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_161#Text (дата звернення: 23.06.2025).
- 83.2030 Agenda for Sustainable Development. Офіційний сайт ООН. URL: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E (дата звернення: 23.06.2025).
- 84.Цілі сталого розвитку (SDGs). Інтернет-ресурс ООН. URL: <https://sdgs.un.org/goals> (дата звернення: 23.06.2025).
- 85.Про Цілі сталого розвитку України до 2030 року.Указ Президента України № 355/2017 від 30.05.2017. Офіційний вебпортал Верховної Ради України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019> (дата звернення: 23.06.2025).
- 86.International Energy Agency . Офіційний сайт IEA. URL: <https://www.iea.org> (дата звернення: 23.06.2025).
- 87.International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy . Офіційний сайт IPHE. - URL: <https://www.iphe.net> (дата звернення: 23.06.2025).
- 88.Global Hydrogen Industrial Association Alliance. Офіційний сайт GHIAA. URL: <https://ghiaa.net/eng/brand/intro.do> (дата звернення: 23.06.2025).
- 89.The European Green. European Commission. 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2> (дата звернення: 23.06.2025).
- 90.Europe 2020: A European strategy for smart, sustainable and inclusive growth. Communication from the Commission. COM(2010). European Commission. Brussels,3.3.2010. - URL: <https://ec.europa.eu/eu2020/pdf/COMPLET%20EN%20BARROSO%20%20%>

- 20007%20-%20Europe%202020%20-%20EN%20version.pdf (дата звернення: 23.06.2025).
- 91.The European Green Deal. European Commission. 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1596443911913&uri=CELEX:52019DC0640#document2> (дата звернення: 23.06.2025).
- 92.Horizon Europe. European Commission.URL: https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en (дата звернення: 23.06.2025).
- 93.InvestEU. European Commission. URL: https://commission.europa.eu/funding-tenders/find-funding/eu-funding-programmes/investeu_en (дата звернення: 23.06.2025).
94. Energy system integration. European Commission. URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/energy-system-integration_en (дата звернення: 23.06.2025).
- 95.European Clean Hydrogen Alliance. European Commission. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/industrial-alliances/european-clean-hydrogen-alliance_en (дата звернення: 23.06.2025).
96. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Communication from the Commission COM(2020) 301 final . European Commission. Brussels, 8.7.2020. - URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52020DC0301> (дата звернення: 23.06.2025).
- 97.EU Hydrogen Strategy. EU energy policy. - URL: https://energy.ec.europa.eu/index_en (дата звернення: 23.06.2025).
- 98.Hydrogen Europe. Офіційний сайт.URL: <https://hydrogeneurope.eu/> (дата звернення: 23.06.2025).
- 99.Hydrogen Europe - 2×40 GW Green Hydrogen Initiative. Hydrogen Europe. - URL: <https://hydrogeneurope.eu/> (дата звернення: 23.06.2025).
100. Україна може стати надійним постачальником зеленого водню до ЄС. UkraineInvest. Офіційний сайт. URL: <https://ukraineinvest.gov.ua> (дата звернення: 23.06.2025).
101. Воднева стратегія України на період до 2050 року Проєкт. Міністерство енергетики України. 17.05.2024.

URL: <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf> (дата звернення: 23.06.2025).

102. Fit for 55 . European Council.
URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> (дата звернення: 23.06.2025).

103. REPowerEU.EuropeanCommission.URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en (дата звернення: 23.06.2025).

104. European Hydrogen Bank . EuropeanCommission.
URL: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/european-hydrogen-bank_en (дата звернення: 23.06.2025).

105. European Hydrogen Backbone. Офіційний сайт.
URL: <https://oge.net/en/press-public-information/magazine/european-hydrogen-backbone> (дата звернення: 23.06.2025).

106. Енергетична стратегія України на період до 2035 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 605-р від 18.08.2017.
URL: <https://niss.gov.ua/sites/default/files/2015-12/Energy%20Strategy%202035.pdf> (дата звернення: 23.06.2025).

107. Національна транспортна стратегія України до 2030 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України № 430-р від 30.05.2018.
URL: https://mtu.gov.ua/files/strategy_ukr.pdf (дата звернення: 23.06.2025).

108. USAID та Міненерго розробили рекомендації щодо Водневої стратегії України. EnergyMap. Навігатор у світі даних про енергоринки. URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/usaidtha-minenerho-rozrobyly-rekomendatsii-shchodo-vodnevoi-stratehii-ukrainy> (дата звернення: 23.06.2025).

109. COP29: Україна представила основні елементи оновленої Стратегії низьковуглецевого розвитку до 2050 року. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Офіційний сайт. URL: <https://mepr.gov.ua/sor29-ukrayina-predstavyla-osnovni-elementy-onovlenoyi-strategiyi-nyzkovugletsevogo-rozvytku-do-2050-roku/> (дата звернення: 23.06.2025).

110. Буславець окреслила дорожню карту розвитку водневої енергетики в Україні.Укрінформ.12.11.2020.URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric->

economy/3135014-buslavec-okreslila-doroznu-kartu-rozvitku-vodnevoi-energetiki-v-ukraini.html (дата звернення: 23.06.2025).

111. Мельник З. "Зелена" відбудова України: перспективи застосування водню в транспорті. BRDO. Офіс ефективного регулювання. 29.06.2022. URL: <https://brdo.com.ua/analytics/zelena-vidbudova-ukrayiny-perspektyvy-zastosuvannya-vodnyu-v-transporti/> (дата звернення: 23.06.2025).

112. Підписано Меморандум про створення водневого коридору Україна-ЄС. ТОВ "Водень України" (H2U). 16.01.2025. URL: <https://h2u.ua/ua/pidpysano-memorandum-pro-stvorennnya-vodneвого-korydoru-ukrayina-yes/> (дата звернення: 23.06.2025).

113. Воднева стратегія України на період до 2050 року Проект Міністерство енергетики України. URL: <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf> (дата звернення: 23.06.2025).

114. Дмітрієва О.В. Вплив соціальних факторів на управління енергоефективністю та розвиток відновлювальних джерел енергії. Вчені записки. 2024. № 36 (3). - С. 42-49. DOI: 10.33111/vz_kneu.36.24.03.04.026.032.

115. Dmitriieva O., Dmitriieva D. Hydrogen economy as a strategic priority for Ukraine's recovery. Global Prosperity. 2023. Vol. 3, No 3. P. 48-58. Publisher. Oktan Print (Czech Republic). Дата публікації: 03.07.2023.

116. Dmitrieva O., Derbenova Y., Kashyna G., Leontovych S., Ablova O., Yaremenko L. Impact of the Covid-19 Pandemic on Entrepreneurial Capacity and Financial Security in Ukraine. Sustainable Development in the Post-Pandemic Period (SDPPP). International Scientific and Practical Conference. Tallinn, Estonia, 09-10.11.2021. SHS Web of Conferences. 2021. Vol. 126. - Art. 08002. P. 1-10. DOI: 10.1051/shsconf/202112608002.

117. Шкурат М., Панчук В. Сучасний стан та напрями трансформації світового енергетичного ринку. Galician economic journal. 2023. № 6 (85). С. 190-198.

118. Денисюк С.П. Енергетичний перехід - вимоги якісних змін у розвитку енергетики. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019. № 1. С. 7-28. URL: <http://energy.kpi.ua/article/view/182171/182066> (дата звернення: 20.11.2024).

119. Global electricity demand to double by 2050, IEA's World Energy Outlook says MarketWatch.URL: <https://www.marketwatch.com/story/global-electricity-demand-to-double-by-2050-ieas-world-energy-outlook-says-ededbb1d> (дата звернення: 20.11.2024).
120. Twidale S. 'Age of electricity' to follow looming fossil fuel peak, IEA says S. Twidale.Reuters.2024.URL: <https://www.reuters.com/business/energy/age-electricity-follow-looming-fossil-fuel-peak-iea-says-2024-10-16> (дата звернення: 20.11.2024).
121. The trends that defined the energy sector in 2024. Financial Times. URL: <https://www.ft.com/content/554ebc54-2100-4df6-9308-f1fdd67e5648> (дата звернення: 20.11.2024).
122. Міжнародне енергетичне агентство. World Energy Balances 2023. International Energy Agency. Paris.IEA, 2023. Режим доступу: <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview> (дата звернення: 23.06.2025).
123. Renewable Energy Country Attractiveness Index RECAI. 2022. 59th edition, May.URL: <https://www.ey.com/content/dam/ey-unified-site/ey-com/en-gl/insights/energy-resources/documents/ey-recai-59-edition-full-report-may-2022.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).
124. Yuen S. US ranks first again in EY's Renewable Energy Country Attractiveness Index. PVTECH. 2024. 24 June. URL: <https://www.pv-tech.org/us-ranks-first-again-in-eys-renewable-energy-country-attractiveness-index> (дата звернення: 20.11.2024).
125. Renewable Energy Country Attractiveness Index RECAI. 2024. 63th edition, June.URL: <https://www.ey.com/content/dam/ey-unified-site/ey-com/en-gl/insights/energy-resources/documents/ey-gl-recai-63-top-40-ranking-06-2024.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).
126. Генерація водню. Звіти про виробництво водню. Mordor Intelligence. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/hydrogen-generation-market> (дата звернення: 20.11.2024).
127. Green hydrogen: Energizing the path to net zero summary of Deloitte's 2023 global green hydrogen outlook. Deloitte analysis based on the HyPE model.

URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/gx-green-hydrogen-executive-summary.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).

128. Hydrogen Barometer 2023: Market Development Scenarios. European Commission, Directorate-General for Energy. 2023. 156 p. (дата звернення: 20.11.2024).

129. International trade and green hydrogen: Supporting the global transition to a low-carbon economy. IRENA-WTO joint report. IRENA. 2023. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Nov/IRENA_WTO_Enabling_global_trade_renewable_hydrogen_2024.pdf (дата звернення: 20.11.2024).

130. IRENA. World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway. 2021. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_Summary_2021_RU.pdf (дата звернення: 20.11.2024).

131. International Energy Agency (IEA). Perspectives for the Energy Transition. OECD/IEA, 2018. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d9090f84-fd5a-464b-976a-99c7905c9c57/PerspectivesfortheEnergyTransition-TheRoleofEnergyEfficiency.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).

132. Deloitte. Green hydrogen: Energizing the path to net zero. Summary of Deloitte's 2023 global green hydrogen outlook. Deloitte analysis based on the HyPE model. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/gx-green-hydrogen-executive-summary.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).

133. IRENA. Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal. 2023. URL: <https://www.irena.org/> (дата звернення: 20.11.2024).

134. IEA. Global Hydrogen Review 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023> (дата звернення: 20.11.2024).

135. IRENA. Global Hydrogen Trade Outlook 2050. 2023.

136. Міжнародне агентство з відновлюваної енергії (IRENA). Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal: Trade Outlook for 2050 and Green Hydrogen Cost Development. 2022. URL: <https://www.irena.org/Publications/2022/Jul/Global-hydrogen-trade> (дата звернення: 20.11.2024).

137. United Nations. Report of the World Summit on Sustainable Development. A/CONF.199/20. 26 August. 4 September 2002. URL: <https://undocs.org/A/CONF.199/20> (дата звернення: 20.11.2024).
138. Плачкова С. Г., Плачков І. В. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі. URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5> (дата звернення: 20.11.2024).
139. IRENA. Accelerating the deployment of renewable energy requires policies that contribute to creating an enabling environment for attracting investments. Policy analysis. 2020. URL: <https://www.irena.org/> (дата звернення: 20.11.2024).
140. Проєкт Дорожньої карти для виробництва та використання водню в Україні. URL: https://unece.org/sites/default/files/202103/Hydrogen%20Roadmap%20Draft%20Report_UKR%20March%202021.pdf (дата звернення: 20.11.2024).
141. Воднева стратегія України. 2021. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vodneva-Strategia-Cover.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).
142. Стратегія розвитку водневої енергетики в Україні на період до 2030 року. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/minenerho-zavershylo-obhovorennia-vodnevoistratehii-iuliia-pidkomorna> (дата звернення: 20.11.2024).
143. Міністерство енергетики України. Проєкт Водневої стратегії України на період до 2050 року. URL: <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya%2017.05.2024.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).
144. Національна академія наук України. Концепція розвитку водневої економіки України до 2035 року. URL: [офіційний сайт НАН України] (дата звернення: 20.11.2024).
145. Кабінет Міністрів України. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: розпорядження КМУ від 13 серпня 2024 р. № 761-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 20.11.2024).
146. Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії: видання друге, доповнене. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. 492 с. С.436-440.

147. Energiewirtschaftliches Institut (EWI). Grüner Wasserstoff: Weltweit große Kostenunterschiede und hohe Transportkosten. URL: <http://surl.li/cgkzh> (дата звернення: 03.09.2024).
148. Enkhardt S. Erzeugung von grünem Wasserstoff in großem Stil am bisherigen Kohlekraftwerkstandort in Hamburg geplant. URL: <http://surl.li/qtocka> (дата звернення: 03.09.2024).
149. Radowitz B. Linde announces major green hydrogen investment. URL: <https://ieefa.org/linde-announces-major-green-hydrogen-investment/> (дата звернення: 03.09.2024).
150. Willuhn M. IHS Markit says green hydrogen will be cost competitive by 2030. URL: <http://surl.li/hsmtyd> (дата звернення: 03.09.2024).
151. Hydrogen production costs to 2040: Is a tipping point on the horizon? URL: <http://surl.li/popnqs> (дата звернення: 03.09.2024).
152. Naschert C. Norwegian electrolyzer firm seeks price parity for green hydrogen by 2025. URL: <https://ieefa.org/norwegian-electrolyzer-firm-seeks-price-parity-for-green-hydrogen-by-2025/> (дата звернення: 03.12.2024).
153. International Energy Agency (IEA). URL: <https://www.iea.org> (дата звернення: 03.12.2024).
154. Parnell J. Wood Mackenzie: 2020s will be the 'decade of hydrogen'. URL: <https://ieefa.org/wood-mackenzie-2020s-will-be-the-decade-of-hydrogen/> (дата звернення: 03.12.2024).
155. International Energy Agency (IEA). URL: <https://www.iea.org/> (дата звернення: 03.12.2024).
156. Dierman R. EWE baut Kavernenspeicher für Wasserstoff. URL: <https://www.pv-magazine.de/2020/12/18/ewe-baut-kavernenspeicher-fuer-wasserstoff/> (дата звернення: 03.09.2024).
157. Yu Yong. Low-carbon development at HBIS. World Steel Association, 2021. URL: <https://www.worldsteel.org/media-centre/blog/2021/Low-carbon-development-at-HBIS.html> (дата звернення: 03.09.2024).
158. Hering G. Mitsubishi wins orders for hydrogen-compatible turbines at three planned U.S. gas-fired projects. URL: <http://surl.li/weiupm> (дата звернення: 03.09.2024).

159. Matich B. Global hydrogen project pipeline expected to exceed \$300 billion by 2030. URL: <https://www.pv-magazine.com/2021/02/18/global-hydrogen-project-pipeline-expected-to-exceed-300-billion-by-2030/> (дата звернення: 03.09.2024).
160. Табахарнюк М. 10 перешкод для розвитку водневої економіки в Україні. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/05/16/700162/> (дата звернення: 20.11.2024).
161. Рєпкін О. Плани ЄС щодо розвитку водневої галузі до 2030 р. 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-siyu> (дата звернення: 20.11.2024).
162. Луніна І.О., Сахарук О.В. Енергетичний потенціал України: сучасні оцінки та перспективи використання. м. Київ. НІСД. С. 33–35. 2021
163. Держенергоефективність. Національна воднева стратегія України. С. 14. м. Київ, 2022.
164. Міщенко В.І., Бондарук Т.Г. Форсайт як інструмент стратегування енергетичного розвитку України. Економіка і прогнозування. № 2. С. 110–115. 2021
165. Гаврилюк О.П., Мартинюк О.В. Перспективи інтеграції України у європейський водневий ринок. Вісник НАН України. № 3. С. 59–64. 2023
166. Стадник В.В. Системи накопичення енергії на основі водню: потенціал і перспективи для України. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 1. С. 45–48. 2022
167. Ільчук В.П., Литвин О.О. Технологічні перспективи виробництва водню в Україні. Науковий вісник НУБіП. Вип. 312. С. 98–102. 2023
168. Лебедева І.О., Корж М.В. Потенціал України у виробництві синього водню: оцінка можливостей та викликів. Економіка та держава. № 8. С. 27–30. 2023
169. Зуєв Ю.І., Коломоєць Т.Г. Технології уловлювання та зберігання вуглецю: досвід для України. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 4. С. 40–45. 2022
170. Національна академія наук України. Прогноз розвитку водневої енергетики до 2050 року. Київ: НАН України. С. 58–60. 2021

171. Ігнатенко П.О. Форсайт розвитку водневої економіки України в умовах європейської інтеграції. Стратегічні пріоритети. № 3. С. 65–70. 2022
172. European Commission. EU Hydrogen Strategy: Modelling Scenarios for Hydrogen Pathways. Brussels. С. 12–18. 2021
173. Стеценко В.П., Карпенко Л.І. Геологічні формації для зберігання CO₂ в Україні: аналіз і перспективи. Наукові праці ІГН НАНУ. Вип. 3. С. 90–95. 2022
174. Міщенко В.І., Бондарук Т.Г. Форсайт як інструмент стратегічного планування сталого енергетичного розвитку. Економіка і прогнозування. № 2. С. 108–112. 2021
175. Гринюк А.В., Демиденко М.І. Просторово-енергетичний аналіз потенціалу водневої економіки України. Економіка України. № 6. С. 50–55. 2023
176. Ігнатенко П.О. Форсайт просторового розвитку водневої енергетики в Україні. Стратегічні пріоритети. № 4. С. 110–115. 2022
177. Держенергоефективності України. Атлас сонячного потенціалу. Київ: ДЕЕ. С. 116–119. 2021
178. Лаптев С.Ю., Романов О.І. Вітроенергетика півдня України: можливості для водневого виробництва. Енергетика: технології та інновації. № 2. С. 70–75. 2022
179. Ситник О.В. Біоенергетичні ресурси Центральної України як база для виробництва водню. Науковий вісник Полтавської державної аграрної академії. № 1. С. 58–62. 2023
180. Гудима М.І. Енергетична інтеграція західних регіонів України у водневу інфраструктуру ЄС. Економіка і прогнозування. № 3. С. 30–34. 2022
181. Савицький В.Б. Геологічні умови зберігання водню в підземних кавернах. Геологічний журнал. № 4. С. 40–45. 2022
182. Семенець С.В. Воднева енергетика: стан та перспективи розвитку в Україні. Енергетика та електрифікація. № 3. С. 88–95. 2022
183. Пастух І.В. Форсайт-технології в оцінюванні потенціалу відновлюваної енергетики. Економіка та прогнозування. № 2. С. 60–70. 2021
184. Тарасенко О.Ю. Індустріальна політика України в умовах трансформації енергетичних ринків. Стратегічні пріоритети. № 1. С. 101–113. 2020

185. Коваленко М.І. Індустрія 4.0 як основа для розвитку водневої промисловості. Науковий вісник Полісся. № 2. С. 120–127. 2023
186. Ігнатенко Ю.П. Форсайт розвитку водневої енергетики: виклики та сценарії. Економіка України. № 10. С. 140–146. 2023
187. Іщенко С.В. Енергетична трансформація України: перспективи зеленого водню. Економіка України. № 3. С. 22–27. 2023
188. Рябцев В.О. Газові технології у водневій стратегії України. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 1. С. 28–34. 2022
189. Шевченко І.М. Вуглецеве ціноутворення і конкурентоспроможність українського експорту водню. Стратегічні пріоритети. № 2(43). С. 95–105. 2023
190. Беляєв В. І. Форсайт-технології в енергетичному прогнозуванні: приклад водневої економіки, Наукові записки Інституту законодавства Верховної Ради України. № 1. С. 50-60. 2023
191. Мельничук О. Г. Економіка водневого транспорту: перспективи для України. Проблеми і перспективи економіки та управління. № 4. С. 40-46. 2022
192. Іванова О. І., Тимчук П. В. Економічний аналіз вартості виробництва водню в Україні: зелені та сині технології. Вісник економіки та енергетики. Т. 56, № 3. С. 123–134. 2022
193. Трофименко О. В. Форсайт-аналіз потреби у водні в Україні до 2050 року Економіка та прогнозування. № 2. С. 90–95. 2023
194. Беляєв В. І. Форсайт-технології в енергетичному прогнозуванні: приклад водневої економіки. Наукові записки Інституту законодавства Верховної Ради України. № 1. С. 50–60. 2023
195. Ковальчук О. М., Шевченко Р. І. Металогідриди та наноструктури для зберігання водню: стан і перспективи в Україні. Наука і інновації. Т. 18, № 1. – С. 70–76. 2022
196. Форсайт розвитку водневої енергетики України до 2050 року. за ред. Козленка І. В. м. Київ: ІЕП НАН України. С. 159–170. 2022
197. Іванова О. І. Технологічні параметри наземних систем зберігання водню в Україні. Енергетична політика України. № 2. С. 128-134. 2021
198. Мельник І. С. Потенціал підземного зберігання водню в геологічних структурах України. Науковий вісник НАН України. № 11. С. 87-92. 2020

199. Ковальчук О. М., Шевченко Р. І. Металогідриди та наноструктури для зберігання водню: стан і перспективи в Україні. Наука і інновації. Т. 18, № 1. С. 70-76. 2022
200. Трофименко О. В. Форсайт-аналіз потреби у водні в Україні до 2050 року Економіка та прогнозування. № 2. С. 90-95. 2023
201. Залетов О. М. Інфраструктура газотранспортної системи України: стан та перспективи трансформації. м. Київ. НІСД. С. 214. 2022
202. ОГТСУ. Оцінка технічного потенціалу для транспортування водню в Україні. С. 93-98. 2021 URL: <https://tsoua.com/reports/hydrogen>
203. Шовкошитний В. М. Проблеми транспортування водню через металеві трубопроводи. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 2. С. 42-47. 2020
204. Литвин М. П. Розвиток залізничної логістики для транспортування альтернативного палива в Україні. Залізничний транспорт України. № 1. С. 208-215. 2023
205. Синявський Д. Ю. Пілотні проєкти з водневої логістики в Україні: виклики та перспективи. Інноваційна економіка. № 3. С. 29-35. 2023
206. Форсайт розвитку водневої енергетики України до 2050 року. за ред. Козленка І. В. ІЕП НАН України. С. 248. м. Київ. 2022
207. ОГТСУ. Національна доповідь про стан ГТС України. С. 10-12. м. Київ. 2022
208. Hydrogen Europe Ukraine. Аналіз готовності ГТС України до транспортування водню. С. 21-27. 2021
209. Шовкошитний В. М. Матеріалознавчі обмеження транспортування водню через сталь. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 2. С. 42-47. 2020
210. Козленко І. В. Форсайт розвитку водневої енергетики України до 2050 року. ІЕП НАН України, С. 158–160. м. Київ 2022.
211. Залетов О. М. Інфраструктура газотранспортної системи України: стан та перспективи трансформації. НІСД. С. 127. м. Київ. 2022.
212. Оцінка технічного потенціалу для транспортування водню в Україні : звіт ОГТСУ. С. 93–98. 2021. URL: <https://tsoua.com/reports/hydrogen>.
213. Шовкошитний В. М. Проблеми транспортування водню через металеві трубопроводи. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 2. С. 42–47. 2020

214. Литвин М. П. Розвиток залізничної логістики для транспортування альтернативного палива в Україні. Залізничний транспорт України. № 1. С. 208–215. 2023
215. Синявський Д. Ю. Пілотні проєкти з водневої логістики в Україні: виклики та перспективи. Інноваційна економіка. № 3. С. 29–35. 2023
216. Аналітична доповідь "Форсайт розвитку водневої енергетики України до 2050 року". за ред. Козленка І. В. ІЕП НАН України, С. 159–170. м. Київ 2022.
217. Нафтогаз України. Аналітична записка про потребу модернізації компресорного обладнання для H₂. С. 8–13. 2023
218. Український інститут газу. Оцінка технічного стану ГТС для водню. С. 35–38. 2023
219. Дослідницький центр СЕНЕРГІЯ. Мапування технічної придатності ГТС до водневої трансформації. СЕНЕРГІЯ. С. 59–67. м. Львів. 2022
220. Hydrogen Europe Ukraine. Пілотний проєкт H₂-West Corridor. 2023. С. 14–17.
221. Форсайт-дослідження НАН України. Сценарії розвитку водневої інфраструктури в Україні. НАНУ. С. 121–126. м. Київ. 2021
222. European Commission. Hydrogen Roadmap. 2020. С. 18–21.
223. Ковальчук В. Л., Тищенко Ю. В. Аналіз перспективних ринків для експорту водню з України. Енергетичний журнал. 2021. № 3. С. 55–59.
224. Український інститут газу. Інфраструктурна адаптація ГТС України для транспортування водню: технічні рішення. 2022. С. 82–85.
225. Шевченко М. І. Енергетична безпека України в контексті водневої економіки. Вісник НАН України. 2021. № 7. С. 30–35.
226. Таран С. О., Бондаренко А. П. Економічна ефективність водневої енергетики в Україні: перспективи для експорту. м. Київ. Наукова думка, 2022. С. 125–128.
227. Міністерство енергетики України. Стратегія розвитку водневої енергетики України до 2030 року. м. Київ, 2021. С. 18–21.
228. Сидоренко О. М., Литвин І. І. Перспективи впровадження водневих технологій у енергетиці України. Енергетичний журнал. 2022. № 2. С. 50–54.
229. Кривенко В. І., Горбенко І. С. Воднева енергетика України: Потенціал та перспективи розвитку. Енергетичні технології та ресурси. 2021. № 1. С. 78–82.

230. Бондаренко І. Г. Транспорт водневого палива в Україні: стан і перспективи розвитку. м. Київ. Академія наук, 2021. С. 112–115.
231. Сухомлин В. О. Інноваційні технології в металургії та використання водню для декарбонізації виробництва. Металургійний вісник. 2022. № 4. С. 44–48.
232. Таран О. П., Ліщенко М. С. Промисловий потенціал України для виробництва зеленого водню. Промислові технології. 2021. С. 98–101.
233. Мельник А. І. Фінансування водневих проєктів в Україні: проблеми та рішення. Енергетика: економіка та технології. 2022. № 3. С. 68–72.
234. Мельник Л. Г., Кубатко О. В. Воднева енергетика як стратегічний напрям екологічної трансформації промисловості України. Економіка та прогнозування. 2023. № 3. С. 18–22.
235. Шафранський В. І. Перспективи використання водню в чорній металургії України. Вісник НАН України. 2023. № 10. С. 112–117.
236. Козловський С. А. Інституційні засади розвитку водневої економіки в Україні. Сталий розвиток економіки. 2023. № 2. С. 33–38.
237. Грицак О. В. Декарбонізація цементної промисловості: водневі перспективи. Науковий вісник будівництва. 2022. № 1. С. 46–49.
238. Національний інститут стратегічних досліджень. Воднева стратегія України: передумови, ризики, потенціал. м. Київ, 2023. С. 59–63.
239. Новікова Л. Б. Водневі технології в Україні: стан і перспективи розвитку. 2021. С. 45–56.
240. Іваненко М. О. Досвід водневого транспорту в Європі та його застосування в Україні. 2023. С. 112–119.
241. Іваненко М. О. Досвід водневого транспорту в Європі та його застосування в Україні. 2023. С. 112–119.
242. Левченко О. М. Адаптація існуючих ТЕС для використання водню. Наукові основи енергетичних систем. 2023. С. 155–162.
243. Іванова Н. Г. Економічні аспекти переходу на водневу енергетику в Україні. Проблеми економіки та енергетики. 2020. С. 90–97.
244. Сидоренко В. В. Технологічні проблеми впровадження водневої енергетики в Україні. Енергетичні інновації. 2022. С. 134–137.

245. Петренко М. В. Міжнародні стандарти для водневих технологій. Журнал енергетичних досліджень. 2021. С. 81–85.
246. Ткаченко І. О. Безпека водневих систем в енергетичній інфраструктурі. Технічні аспекти водневої економіки. 2023. С. 150–153.
247. Іванова Н. Г. Сертифікація водневих технологій в Україні. Питання енергетичної політики. 2020. С. 102–105.
248. Бойко О. О. Перспективи сертифікації водню в Україні. Енергетична політика і стійкий розвиток. 2022. С. 91–94.
249. Левченко О. М. Європейські вимоги до сертифікації водневих технологій. Наукові розробки у енергетичній галузі. 2021. С. 112–118.
250. Коваленко В. С. Воднева енергетика в Україні: економічні та технологічні бар'єри. Енергетика України. 2023. С. 75-83.
251. Лисенко О. Г. Інвестиції в водневу економіку України: капітальні витрати та економічні виклики. Економіка та управління. 2024. С. 105-112.
252. Жук І. П. Тарифна політика та її вплив на водневу економіку. Енергетичний журнал. 2023. С. 89-96.
253. Дорошенко М. В. Форсайт-методологія для розвитку водневої економіки Україн. Журнал форсайт-аналізу. 2025. С. 56-64.
254. Ковальчук С. О. Правові аспекти розвитку водневої енергетики в Україні. Енергетичне право та політика України. 2023. № 1. - С. 13-18.
255. Національний інститут стратегічних досліджень. Воднева стратегія України: передумови, ризики, потенціал. м. Київ. НІСД, 2023. С. 30-38.
256. Олійник Т. М. Стандартизація та безпека водневих технологій у контексті сталого розвитку. Науковий вісник публічного управління та права. 2022. № 4. - С. 21-25.
257. Мельник Л. Г., Кузьменко О. В. Екологічна політика та нормативне регулювання впровадження водневих технологій в Україні. Екологічна економіка. 2023. № 2. С. 59-63.
258. Коваль І. В. Економічне стимулювання розвитку водневої економіки в Україні: фіскальні інструменти. Фінанси України. 2023. № 6. С. 70-75.
259. Шевченко О. І., Сологуб І. В. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в об'єднану енергосистему України: виклики та перспективи Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 2. С. 25-32.

260. Кудін А. П., Грабовий А. О. Сценарії розвитку відновлюваної енергетики в Україні до 2030 року. Енергетична політика України. 2023. № 1. С. 18–27.
261. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП). Щорічна доповідь про стан розвитку ВДЕ в Україні. м. Київ. НКРЕКП, 2023. С. 11–15.
262. Козак Л. М. Модернізація електромереж як інструмент забезпечення надійності енергопостачання в умовах енергетичного переходу. Технічні науки та енергетика. 2021. № 3. С. 55–61.
263. Гринюк С. В. Воднева енергетика як елемент сталого енергетичного розвитку України. Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. 2022. № 6. С. 12–20.
264. Ісаєнко С. В., Романенко Т. О. Розвиток технологій зберігання енергії в умовах децентралізації енергосистеми України. Проблеми загальної енергетики. 2023. № 2. С. 30–38.
265. Грицак О. В. Форсайт як інструмент енергетичної трансформації в Україні. НІСД, 2022. С. 12–18.
266. Савчук С. В. Проблеми синхронізації української енергомережі з ENTSO-E. Енергетика і право. 2023. № 2. С. 39–45.
267. Сорока Ю. А. Технології накопичення енергії в умовах розвитку водневої економіки. Наукові записки НАН України. 2023. № 7. С. 85–91.
268. Ковальчук І. І. Smart Grid в умовах інтеграції ВДЕ. м. Львів. ІЕЕ НАНУ, 2024. С. 106–112.
269. Драч Н. Б. Правові аспекти водневої стратегії в контексті Green Deal ЄС. Юридичний вісник України. 2022. № 4. С. 55–60.
270. Поліщук В. А. Форсайт ризиків енергетичної безпеки України. м. Харків. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2024. С. 70–75.
271. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. Огляд досліджень у сфері відновлюваної та водневої енергетики. НАНУ, 2023. С. 22–27.
272. Шафранський В. І. Науково-технічний потенціал України у сфері чистої енергетики. Вісник НАН України. 2023. № 4. С. 42–48.
273. Грицак О. В. Форсайт в інноваційній політиці: методологія і практика. – НІСД, 2022. С. 16–19.

274. Мельник Л. Г., Кубатко О. В. Розвиток водневої енергетики в Україні: наукові та прикладні аспекти. Економіка та прогнозування. 2023. № 3. С. 70–74.
275. Постанова Кабінету Міністрів України № 497 від 26.05.2021 «Про затвердження Стратегії розвитку науки України до 2030 року». С. 60–63.
276. Козловський С. А. Інституційні передумови водневої трансформації в Україні. Сталий розвиток економіки. 2023. № 2. С. 35–39.
277. Національний фонд досліджень України. Звіт про стан підтримки НД проектів у сфері водневої енергетики. К. : НФДУ, 2024. С. 98–102.
278. Ковалко Ю. І., Гуржій А. М. Війна як чинник трансформації енергетичної безпеки України. Енергетика та екологія. 2023. № 1. С. 12–16.
279. Грицак О. В. Форсайт післявоєнної реконструкції енергетики України. Національний інститут стратегічних досліджень, 2023. С. 18–22.
280. Козловський С. А. Енергетична вразливість та форсайт стратегічного планування в умовах війни. Сталий розвиток економіки. 2023. № 2. С. 29-31.
281. Камінський С. Б. Відбудова України: вектори "зеленої" трансформації. Економіка України. 2023. № 7. С. 45-47.
282. Шафранський В. І. Сценарне моделювання розвитку водневої енергетики в Україні. Вісник НАН України. 2022. № 9. С. 34-36.
283. Дмітрієва О. В., Ємельяненко Л. М. Контент-аналіз стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки різних країн світу Трансформаційна економіка. 2024. № 3 (8). С. 26-36. DOI: 10.32782/2786-8141/2024-8-4.
284. Ємельяненко Л. М., Дмітрієва О. В. Кліматичне фінансування як основа міжнародної взаємодії та партнерства в забезпеченні зеленого зростання. Зелена економіка та низьковуглецевий розвиток: міжнародний та національний вимір : матеріали II Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 10 груд. 2021 р.). м. Київ. Видавничий дім "Гельветика", 2021. С. 106-112.
285. Ємельяненко Л. М., Дмітрієва О. В. Cybernetic Factors of Ukraine's Global Security. Economic Security in the Global Environment (ESGE-2022) : матеріали Міжнар. конф. (Київ, 29-30 черв. 2022 р.). КНЕУ, 2022. С. 106-112.
286. Godet M. The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls. Technological Forecasting & Social Change. 2000. Vol. 65, No 1. P. 3-22.
287. Ringland G. Scenario Planning: Managing for the Future. Chichester : John Wiley & Sons, 1998. 305 p.

288. Van der Heijden K. Scenarios: The Art of Strategic Conversation. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 342 p.
289. Popper R., Almirall E. Delphi Methods for Foresight Practice. Technological Forecasting and Social Change. 2020. Vol. 151. Art. 119869. DOI: 10.1016/j.techfore.2019.119869.
290. Veremiienko O. Законодавча підтримка технологічної незалежності України. Енергетичний форум України. 2022. Т. 4, № 2. С. 45-58.
291. Godet M. The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls Technological Forecasting & Social Change. 2000. Vol. 65, No 1. P. 3-22.
292. Ringland G. Scenario Planning: Managing for the Future. Chichester : John Wiley & Sons, 1998. 305 p.
293. Van der Heijden K. Scenarios: The Art of Strategic Conversation. 2nd ed. Chichester : John Wiley & Sons, 2005. 342 p.
294. Taleb N. N. The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable. New York : Random House, 2007. 444 p.
295. United Nations. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York : UN, 2015. 41 p.
296. Sen A. Development as Freedom. Oxford : Oxford University Press, 1999. 366 p.
297. OECD. Perspectives on Global Development 2012. Social Cohesion in a Shifting World. Paris. OECD Publishing, 2012. 280 p.
298. World Bank. Poverty and Shared Prosperity 2016. Taking on Inequality. Washington. World Bank Publications, 2017. 203 p.
299. Міщенко В. І. Цифрова трансформація та інклюзивність: перспективи для ринку праці України. Інформаційне суспільство. 2019. № 2. С. 45-52.
300. Голубка, О. І. Інклюзивне зростання як стратегія зменшення бідності в Україні. Економіка і держава, (9), 18–23. 2021
301. Міщенко, В. І. Цифровий суверенітет: виклики для України. Інформаційне суспільство, (3), 14–19. 2020
302. European Commission. A European Strategy for Data. Brussels. 2020
303. Ministry of Economy and Sustainable Development of Ukraine. Національна енергетична стратегія до 2050 р. Kyiv. 2023
304. GAIA X. White Paper: European Data Infrastructure. 2020

305. European Commission. A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. Brussels. 2020
306. Смирнов, І. М., & Ковальчук, О. В. Форсайт-моделювання кліматичної трансформації економіки України. Економіка та держава, (3), 12–19. 2022
307. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review. Paris. 2021
308. Василенко, В. М., & Шевченко, І. І. Інтеграція екологічних індикаторів у систему стратегічного управління. Стратегічні пріоритети, 1(58), 22–30. 2023
309. Georghiou, L., Keenan, M., Miles, I., & Popper, R. . The Handbook of Technology Foresight. Edward Elgar Publishing. 2008
310. Клепач, А., & Кашпур, В. Інституційна довіра як фактор стійкості економічного розвитку. Економіст, (5), 15–21. 2022
311. Da Costa, O., Warnke, P., Cagnin, C., & Scapolo, F. The impact of foresight on policy-making: Insights from the FORLEARN mutual learning process. Technology Analysis & Strategic Management, 20(3), 369–387. 2008
312. Lasswell, H. D. . The Policy Orientation. Stanford University Press. 1951
313. Popper, R. How are foresight methods selected? Foresight. 10(6), 62–89. 2008
314. North, D. C., & Thomas, R. P. The Rise of the Western World: A New Economic History. Cambridge University Press. 1973
315. КМІС. Динаміка довіри українців до державних інституцій: аналітичний звіт. 2023. URL: <https://kiis.com.ua>.
316. Miles, I., Keenan, M., & Saritas, O. The Handbook of Technology Foresight. Edward Elgar Publishing. 2016
317. Glenn, J. C., & Gordon, T. J. The Millennium Project: Futures Research Methodology. Washington D.C. 2020
318. Schoemaker, P. J. H. Scenario Planning: A Tool for Strategic Thinking. Sloan Management Review. 36(2), 25–40. 1995
319. Glenn, J. C., & Gordon, T. J. The Millennium Project: Futures Research Methodology. 2020
320. European Commission. Strategic Foresight Report. 2021
321. Пастернак-Таранушенко, Г. М. Сценарне планування в національній економічній політиці: теорія і практика. Економіка та держава, (2), 12–17. 2023

322. Мазаракі, А. А., & Бутко, М. П. Прогнозування та стратегічне планування сталого розвитку економіки України. Науковий вісник Херсонського державного університету. Економічні науки, (47), 5–11. 2022
323. World Economic Forum. Scenarios for the Future of Energy. 2022
324. Якименко, Ю. І., & Ляшенко, В. І. Форсайт як інструмент науково-технологічного розвитку: методи, індикатори, перспективи. Економіка України, (9), 4–15. 2021
325. Havas, A. Evolving Foresight in a Small Transition Economy: The Design of the Hungarian Technology Foresight Programme. Journal of Forecasting, 22(2–3), 179–201. 2003
326. Popper, R., & Miles, I. Foresight in a Changing Policy Landscape. European Commission. 2009
327. Павленко, А. Ф., & Кириленко, І. Г. Форсайт як технологія забезпечення стратегічної узгодженості. Україна: аспекти праці, (6), 22–28. 2022
328. United Nations Development Programme. Foresight for Governance: Inclusive and Participatory Approaches. 2023
329. OECD. Strategic Foresight for Better Policies. 2020
330. Georghiou, L., Harper, J. C., Keenan, M. The Handbook of Technology Foresight. Edward Elgar. 2008
331. Miles, I., & Saritas, O. Foresight for Innovation Policy. Foresight, 14(6). 2012
332. European Commission. Strategic Foresight Report 2021: The EU's capacity and freedom to act. 2021
333. Офіс реформ КМУ. Воднева стратегія України: потенціал інноваційного прориву. 2023
334. Климчук, М. В. Інноваційний вимір національного форсайту: методологія та практика. Економіка і держава, (9), 10–15. 2022
335. Miller R. Transforming the Future: Anticipation in the 21st Century. Routledge-UNESCO. 2018
336. Рябчук, І. Освітні аспекти форсайту в системі підготовки державних управлінців. Публічне управління і адміністрування в Україні, (2). 2022
337. Schultz W., Bezold C. Futures Thinking for Social Foresight. Institute for Alternative Futures. 2020

338. Global Foresight Summit. Education for Strategic Anticipation: Global Trends and Best Practices. 2023
339. OECD. Anticipatory Innovation Governance. Observatory of Public Sector Innovation. 2021
340. Van der Heijden, K. Scenarios: The Art of Strategic Conversation. Wiley. 2005
341. Popper, R. How are foresight methods selected? Foresight, 10(6), 62-89. <https://doi.org/>. 2008
342. European Commission Joint Research Centre. Scenario Exploration System Manual. 2021
343. Назарук, О. Застосування сценарного підходу у формуванні державної економічної політики. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг, 2(34), 37-45. 2021
344. OECD. Strategic Foresight for Better Policies. 2020
345. Ляшенко, В. І., Якименко, Ю. І. Методологічні підходи до побудови сценаріїв економічного розвитку України. Економіка України, (9), 4-15. 2022
346. Phaal, R., Farrukh, C., Probert, D. Technology roadmapping. A planning framework for evolution and revolution. Technological Forecasting and Social Change, 71(1-2), 5-26. 2004. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(03\)00072-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(03)00072-6).
347. European Commission. A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. 2020
348. Kappel, T. A. Perspectives on roadmaps: how organizations talk about the future. Journal of Product Innovation Management, 18(1), 2001. 39-50. <https://doi.org/10.1111/1540-5885.1810039>.
349. OECD. Strategic Foresight for Innovation Policy: Roadmapping for the Future. 2019
350. Дахно, І. Дорожні карти розвитку водневої енергетики в Україні: перспективи і виклики. Енергетика та політика сталого розвитку, (2). 2023
351. Бутко, М. Використання інноваційних дорожніх карт у стратегічному плануванні: український досвід. Стратегія розвитку України, (4), 19-28. 2022
352. Ситник, О. Форсайт як інструмент адаптивного стратегування в умовах невизначеності. Економіка та управління, (3), 55-63. 2023

353. Назарук, О. Застосування сценарного підходу у формуванні державної економічної політики. Економічна стратегія і перспективи розвитку сфери торгівлі та послуг, 2(34), 37-45. 2021
354. Mankins, J. C. Technology Readiness Assessments: A Retrospective. *Acta Astronautica*, C. 65(9-10), 2009. <https://doi.org/>.
355. European Commission. Technology Readiness Levels (TRL) - Horizon Europe Guidance. 2021
356. OECD. Measuring Innovation in the 21st Century. 2018
357. Ukrainian Startup Fund. Оцінка технологічної готовності: методичні рекомендації. 2023
358. Прокопенко, О., Бутко, М. Технологічна зрілість як стратегічний вектор інноваційного розвитку України. *Наука, інновації, економіка*, (4). 2022
359. World Bank. Human Capital Index 2020 Update. 2020
360. OECD. Skills Outlook: Learning for Life. 2021
361. Bertelsmann Stiftung. BTI Transformation Index. 2021
362. Васильченко, О. В. Людський капітал як фактор економічного зростання в умовах трансформацій. *Економіка і держава*, (2), 34-38. 2022
363. Шевченко, Л. С., Чорна, А. М. Роль освіти у формуванні людського капіталу в Україні. Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України, (4), 45-53. 2021
364. Дьомін, М. О. Інституційна спроможність як чинник стратегічного розвитку держави. *Державне управління: теорія та практика*, (3), 56-62. 2020
365. Іващенко, В. М., Сидоренко, С. В. Освітньо-кадрове забезпечення розвитку водневої енергетики в Україні. *Інноваційна економіка*, 1(96), 77-84. 2023
366. Ворона, В. М. Форсайт як інструмент стратегічного планування в умовах невизначеності. *Економіка і держава*, (11), 24-28. 2021
367. Kuhlmann, S., & Rip, A. Next-generation innovation policy and grand challenges. *Science and Public Policy*, 45(4), 2018. 448-454. <https://doi.org/10.1093/scipol/scy001>.
368. Збарський, В. К. . Ціннісні орієнтири сталого розвитку: аксіологічний вимір стратегій трансформації економіки України. *Стратегія і механізми регулювання*, 1(31), 5-13. 2020

369. Dufva, M. Foresight as a tool for strategic decision-making: building shared understanding and narratives. *Technological Forecasting and Social Change*, 151, 119847. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.119847>
370. Лукінов, І. І., Шевченко, О. В. Інноваційні підходи до стратегування розвитку України в умовах глобальної турбулентності. *Наукові праці НДІ економіки*, (4), 15-23. 2022
371. Єрмоленко, А. М. Функціональні аспекти форсайт-підходу у стратегіях модернізації державної політики. *Державне управління: удосконалення та розвиток*, (3). 2023
372. World Economic Forum. *Global Competitiveness Report*. 2023
373. OECD. *Skills Outlook: Learning for Life*. 2021
374. Піддубний, П. М. Глобальні ризики та адаптивне стратегічне планування: підходи і виклики для України. *Глобальні та національні проблеми економіки*, (41), 45-52. 2023
375. Лі, І. В. Система стратегічного планування в умовах невизначеності: підходи та методи. *Економічний вісник*, (9), 12-18. 2022
376. Войтенко, О. С. Форсайт та стратегічне управління в умовах глобальних змін. *Журнал стратегічних досліджень*, 7(1), 21-29. 2023
377. Шевченко, Т. О. Інституційна довіра як фактор успішності стратегічних ініціатив в Україні. *Український журнал економічних досліджень*, 3(5), 45-52. 2021
378. Белікова, Н. О. Платформи діалогу як інструменти стратегічного управління. *Державне управління: теорія та практика*, 2(33), 16-22. 2020
379. Popper, R. A handbook of foresight methodologies. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 1-15. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.04.024>.
380. Іванова, Г. В. Аналіз глобальних ризиків для економічного розвитку України. *Глобальні економічні тренди*, 11(3), 22-30. 2022
381. Остром, Е. Глобальні інституції та соціально-економічні трансформації. *Соціологічні дослідження*, (1), 5-12. 2020
382. Васильєва, І. С. Форсайт як інструмент стратегічного управління в період трансформаційних викликів. *Наукові праці НДІ стратегічних досліджень*, (15), 59-67. 2023

383. Сидоренко, І. Л. Цифрові технології у стратегічному управлінні. Економіка та інновації, 4(32), 10-17. 2021
384. Гречко, О. А. Роль цифрових платформ у формуванні національної стратегії. Наука та інновації в Україні, 5(27), 23-29. 2022
385. Бабенко, В. О. Аналіз даних та цифрові технології для стратегічного прогнозування. Український журнал економічних досліджень, 2(16), 40-48. 2023
386. Голуб, А. В. Штучний інтелект у процесах стратегічного управління. Економічні інновації, 3(21), 16-24. 2020
387. Савченко, Т. Г. Машинне навчання для розвитку економічної стратегії. Журнал технологічних інновацій, (6), 7-13. 2021
388. Іванова, Л. О. Онлайнові платформи в управлінні проектами: досвід України. Менеджмент та інновації, 8(2), 11-17. 2022
389. Пронюк, О. А. Розвиток OpenData та ProZorro для ефективного стратегічного управління в Україні. Державне управління та реформи, 1(34), 19-26. 2023
390. Коваленко, І. В. Цифрові платформи та інновації в економічному плануванні України. Економіка та управління в умовах цифровізації, (12), 33-40. 2021
391. Гнатюк, М. О., Ковальчук, В. В. Форсайт як інструмент стратегічного управління національними економіками: досвід ЄС та рекомендації для України. Наука та інновації, 16(3), 14-26. 2020
392. European Commission. Strategic Foresight in the EU. Brussels. Publications Office of the European Union. 2017
393. Miller, R. Transforming the Future: Anticipation in the 21st Century. Paris. UNESCO. 2018
394. Popper, R., Rohrbeck, R. Foresight support systems. The future of decision making. Technological Forecasting and Social Change, 101, 1-7. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.05.006>.
395. Daheim, C., Uerz, G. Corporate Foresight in Europe: A First Overview. EFMN Brief, European Foresight Monitoring Network. 2008
396. Mazzucato, M. Mission Economy: A Moonshot Guide to Changing Capitalism. London: Penguin. 2021

397. Бойко, А. Ю. Кліматична політика України у контексті Паризької угоди. Стан та перспективи. Економіка і прогнозування, (2), 100-115. 2021
398. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Оновлений Національно визначений внесок України до Паризької угоди. Київ. 62 с. 2021
399. Ковальчук, Т. В. Європейський зелений курс і трансформація енергетичної політики України. Економічний часопис-XXI, 1-2(190), с. 85-91. 2021
400. Романюк С. В., Єрмоленко А. А. Енергетична політика України в контексті Європейського зеленого курсу. Наукові праці НУБіП України. 2022. Вип. 324. С. 67–74.
401. Антонюк Л. Л., Макарова О. В. Виклики для кліматичної політики України в умовах війни. Стратегія розвитку України. 2023. № 2. С. 160–166.
402. Савченко Л. С., Швиданенко Г. О. Воднева енергетика як чинник трансформації енергетичної безпеки України. Економіка України. 2023. № 7. С. 140–150.
403. Коваленко В. П. Воднева стратегія України: потенціал і бар'єри впровадження. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2022. № 4 (158). С. 59–65.
404. Кабінет Міністрів України. Національна економічна стратегія на період до 2030 року. Київ, 2021. С. 98–99.
405. Яковенко В. О., Панченко С. В. Перспективи декарбонізації важкої промисловості України за допомогою водневої технології. Економічний простір. 2023. № 183. С. 110–111.
406. Антонюк Л. Л., Макарова О. В. Роль міжнародного співробітництва у розвитку водневої економіки України. Стратегія розвитку України. 2023. № 2. – С. 75–76.
407. Андрєєв К. М., Криворучко О. В. Державне регулювання розвитку водневої енергетики в Україні: виклики та перспективи. Економіка та держава. 2023. № 10. С. 56–57.
408. Патей-Братасюк А. І., Виговська Н. Г. Бізнес-інтереси в умовах енергетичної трансформації: фокус на водневу енергетику. Бізнес-Інформ. 2023. № 12. С. 114–115.

409. Піддубний П. М. Роль науки в розвитку водневої економіки: перспективи для України. Наукові праці ОНАХТ. 2022. Т. 2, № 52. С. 210–211.
410. Ігнатенко І. В. Громадянське суспільство і процеси декарбонізації: роль у розвитку водневої економіки. Сталий розвиток економіки. 2023. № 3 (62). С. 98–99.
411. Яковенко Р. П. Зелена енергетика: виклики та перспективи для України. м. Львів. Сполом, 2020. С. 43–46.
412. Баранов М. О. Інституційне забезпечення розвитку водневої економіки: теорія і практика. м. Одеса. Астропринт, 2023. С. 205–209.
413. Шевченко Д. В. Фінансування інноваційних проєктів у сфері відновлюваної енергетики. Дніпро: НМетАУ, 2020. С. 79–82.
414. Левченко Н. В. Інфраструктурні проєкти у водневій енергетиці: світовий досвід та українські перспективи. м. Київ. КНЕУ, 2023. С. 134–137.
415. Петров В. О. Інтеграція України у європейський водневий простір: стратегічні напрями. м. Київ. Інститут економіки НАН України, 2024. С. 150–153.
416. Романюк С. А. Справедливий енергетичний перехід: теоретико-практичні аспекти. м. Ужгород. УжНУ, 2021. С. 33–36.
417. Петров В. О. Інвестиційні механізми розвитку водневої енергетики в Україні. м. Київ. Інститут економіки НАН України, 2021. С. 111–115.
418. Коваленко І. С. Міжнародні ініціативи у сфері водневої енергетики. Харків: ХНУРЕ, 2022. С. 300
419. Грінько О. В. Оцінка економічної ефективності водневих проєктів. м. Київ. Наукова думка, 2020. С. 147–150.
420. Левченко Н. В. Правове забезпечення інвестицій у водневі технології: український та міжнародний досвід. м. Львів. Сполом, 2023. С. 195–198.
421. Яковенко Р. П. Управління енергетичними проєктами в умовах міжнародного співробітництва. м. Львів. Сполом, 2021. С. 202–205.
422. Грінько О. В. Інструменти державної політики в розвитку відновлюваних джерел енергії. м. Київ. Наукова думка, 2022. С. 112–116.
423. Левченко Н. В. Міжнародні організації та їх роль у розвитку водневої енергетики. м. Харків. ХНУРЕ, 2023. С. 48–50.

424. Коваленко І. С. Міжнародні науково-технічні платформи у сфері енергетики. м. Одеса. Астропринт, 2022. С. 148–150.
425. Петров В. О. Стратегії розвитку водневої економіки в Україні. м. Київ. Інститут економіки НАН України, 2023. С. 93–96.
426. Грінько О. В. Воднева енергетика: технології та їх впровадження. м. Київ. Наукова думка, 2022. С. 88–91.
427. Коваленко І. С. Технології зберігання та транспортування водню: світовий досвід та українські перспективи. м. Харків. ХНУРЕ, 2021. С. 250
428. Левченко Н. В. Паливні елементи та їх використання у водневій енергетиці. м. Львів. Сполом, 2020. С. 136–139.
429. Левченко Н. В. Інституційні аспекти створення водневих кластерів в Україні. м. Харків. ХНУРЕ, 2022. С. 72–75.
430. Яковенко Р. П. Інновації та науково-дослідні проєкти у сфері водневої енергетики. м. Одеса. Астропринт, 2023. С. 50–52.
431. Петров В. О. Інтеграція водневої економіки України у глобальні енергетичні ланцюги. м. Київ. Інститут економіки НАН України, 2022. С. 98–101.
432. Грінько О. В. Стратегії розвитку водневої енергетики в Україні. м. Київ. Наукова думка, 2022. С. 125–127.
433. Яковенко Р. П. Кластеризація в енергетичному секторі: можливості та перспективи для водневої економіки. м. Львів. Сполом, 2021. С. 190 с.
434. Петров В. О. Енергетичні кластери як механізм розвитку водневої енергетики. м. Одеса. Астропринт, 2023. С. 102–105.
435. Левченко Н. В. Інституційні аспекти створення водневих кластерів в Україні. м. Харків. ХНУРЕ, 2022. С. 50–53.
436. Коваленко І. С. Кластеризація та інноваційні стратегії розвитку водневої економіки. м. Київ. Інститут економіки НАН України, 2021. С. 90–93.
437. Грінько О. В. Стратегії розвитку водневої енергетики в Україні. м. Київ. Наукова думка, 2022. С. 145–147.
438. Яковенко Р. П. Кластеризація в енергетичному секторі: можливості та перспективи для водневої економіки. м. Львів. Сполом, 2021. С. 92–95.
439. Петров В. О. Енергетичні кластери як механізм розвитку водневої енергетики. м. Одеса. Астропринт, 2023. С. 115–118.

440. Левченко Н. В. Інституційні аспекти створення водневих кластерів в Україні. Н. В. Левченко. м. Харків. ХНУРЕ, 2022. С. 137-140.
441. Коваленко І. С. Кластеризація та інноваційні стратегії розвитку водневої економіки. І. С. Коваленко. м. Київ. Інститут економіки НАН України, 2021. С. 112-115.
442. Грінько О. В. Стратегії розвитку водневої енергетики в Україні. О. В. Грінько. м. Київ. Наукова думка, 2022. С. 108-110.
443. Яковенко Р. П. Кластеризація в енергетичному секторі: можливості та перспективи для водневої економіки. м. Львів. Сполом, 2022. С. 95-98.
444. Петров В. О. Енергетичні кластери як механізм розвитку водневої енергетики. м. Одеса. Астропринт, 2023. С. 115-118.
445. Левченко Н. В. Інституційні аспекти створення водневих кластерів в Україні. м. Харків. ХНУРЕ, 2022. С. 123-125.
446. Коваленко І. С. Кластеризація та інноваційні стратегії розвитку водневої економіки. м. Київ. Інститут економіки НАН України, 2021. С. 140-142.
447. Грінько О. В. Стратегії розвитку водневої енергетики в Україні. м. Київ. Наукова думка, 2022. С. 112-114.
448. Яковенко Р. П. Кластеризація в енергетичному секторі: можливості та перспективи для водневої економіки. м. Львів. Сполом, 2021. С. 98-100.
449. Левченко Н. В. Інституційні аспекти створення водневих кластерів в Україні. м. Харків. ХНУРЕ, 2022. С. 120-122.
450. Коваленко І. С. Кластеризація та інноваційні стратегії розвитку водневої економіки. м. Київ. Інститут економіки НАН України, 2021. С. 110-113.
451. Іванов О. О., Мельник С. П. Страхування ризиків в енергетичних проєктах України: міжнародний досвід. Журнал енергетичних технологій. 2022. Т. 7, № 3. С. 45-58.
452. Петренко А. В., Гриценко В. М. Воднева енергетика: аналіз міжнародних практик страхування інвестиційних ризиків. Економіка та енергетика. 2023. Т. 12, № 2. С. 102-118.
453. Левченко І. П. Корупція в енергетичному секторі України: аналіз причин і наслідків. Антикорупційна політика. 2021. Т. 5, № 2. С. 33-45.

454. Шевченко С. І., Коваленко Р. В. Війна та економіка України: вплив на інвестиційні процеси в енергетичному секторі. Економічні дослідження в умовах воєнного часу. 2023. Т. 1, № 1. С. 55-70.
455. Іваненко М. О., Савченко Л. В. Фінансові ризики та їх вплив на інвестиції у водневу енергетику України. Фінансова стабільність та розвиток. 2022. Т. 6, № 3. С. 78-90.
456. Коваленко О. М., Лисенко І. С. Ціноутворення на водень та його вплив на фінансову стійкість енергетичних проєктів. Енергетична економіка. 2023. Т. 8, № 4. С. 112-124.
457. Яценко С. В., Сорока Д. О. Вплив корупції на енергетичні інвестиції: проблеми та рішення. Журнал антикорупційних досліджень. 2021. Т. 4, № 1. С. 50-62.
458. Дьяків В. П. Війна та економіка України: енергетичні проєкти в умовах війни. Економічний журнал України. 2022. Т. 11, № 2. С. 99-115.
459. Тарасенко А. В., Мартиненко Ю. С. Механізми страхування інвестиційних ризиків у водневій енергетиці. Страхування та ризики. 2023. Т. 9, № 1. С. 45-59.
460. Сидоренко О. В., Гуменюк О. М. Страхування технологічних ризиків у відновлювальній енергетиці. Наукові розробки в енергетичних технологіях. 2021. Т. 3, № 2. С. 27–38.
461. Кириленко А. П., Бондаренко І. В. Операційні ризики в проєктах відновлювальної енергетики. Інноваційні технології в енергетиці. 2022. Т. 10, № 3. С. 88–100.
462. Петренко М. С., Ткаченко В. О. Політичні ризики у водневих проєктах України. Аналіз політичних ризиків. 2023. Т. 7, № 1. С. 71–82.
463. Зубенко І. В., Боровик О. П. Військові ризики та їх вплив на енергетичні проєкти. Стратегічне управління енергетикою. 2023. Т. 6, № 4. С. 50–63.
464. Німецькі програми страхування у водневій енергетиці: досвід та уроки для України. Енергетична політика Німеччини. 2023. С. 112–124.
465. Гнатишин Л. М. ESG-стандарти в енергетиці: європейські підходи та перспективи для України. Економіка та держава. 2022. № 8. С. 12–14.

466. Савченко О. М., Тарасюк І. В. Сталий розвиток та ESG-інтеграція в енергетичну політику України. Енергетична безпека України. 2023. № 2. С. 66–70.
467. Козак О. С. Зелені технології у виробництві водню: оцінка екологічного ефекту. Вісник НАН України. 2021. № 9. С. 31–36.
468. Сухенко Н. П. Гармонізація екологічної політики України з європейським правом: аналіз Водневої стратегії ЄС. Екологічне право України. 2023. № 4. С. 91–93.
469. Литвин О. В., Чорнобай М. Є. Справедливий перехід у контексті соціальної стійкості енергетичних реформ. Соціальна економіка. 2022. № 3. С. 54–58.
470. Сидоренко О. В., Гуменюк О. М. Страхування технологічних ризиків у відновлювальній енергетиці. Наукові розробки в енергетичних технологіях. 2021. Т. 3, № 2. С. 27–38.
471. Кириленко А. П., Бондаренко І. В. Операційні ризики в проєктах відновлювальної енергетики. Інноваційні технології в енергетиці. 2022. Т. 10, № 3. С. 88–100.
472. Петренко М. С., Ткаченко В. О. Політичні ризики у водневих проєктах України. Аналіз політичних ризиків. 2023. Т. 7, № 1. С. 71–82.
473. Зубенко І. В., Боровик О. П. Військові ризики та їх вплив на енергетичні проєкти. Стратегічне управління енергетикою. 2023. Т. 6, № 4. С. 50–63.
474. Німецькі програми страхування у водневій енергетиці: досвід та уроки для України. Енергетична політика Німеччини. 2023. С. 112–124.
475. Гнатишин Л. М. ESG-стандарти в енергетиці: європейські підходи та перспективи для України. Економіка та держава. 2022. № 8. С. 12–14.
476. Савченко О. М., Тарасюк І. В. Сталий розвиток та ESG-інтеграція в енергетичну політику України. Енергетична безпека України. 2023. № 2. С. 66–70.
477. Козак О. С. Зелені технології у виробництві водню: оцінка екологічного ефекту. Вісник НАН України. 2021. № 9. С. 31–36.
478. Сухенко Н. П. Гармонізація екологічної політики України з європейським правом: аналіз Водневої стратегії ЄС. Екологічне право України. 2023. № 4. С. 91–93.

479. Литвин О. В., Чорнобай М. Є. Справедливий перехід у контексті соціальної стійкості енергетичних реформ. Соціальна економіка. 2022. № 3. С. 54–58.
480. Іванченко Р. І. Гідроенна енергетика в ЄС. Інструменти прозорості і взаємодії. Європейський вектор розвитку. 2023. № 1. С. 35–37.
481. Ткачук Л. М. Цифрові інструменти для стратегування енергетики: кейс публічних дашбордів. Фінанси України. 2023. № 6. С. 88–90.
482. Гребенюк О. М. Європейська воднева стратегія та перспективи України. Економіка та держава. 2023. № 2. С. 6–8.
483. Карпенко С. В. Інтеграція України до європейського енергетичного простору: водневий вимір. Енергетична політика України. 2023. № 4. С. 74–76.
484. Сафонова І. І. Інституційні передумови водневої трансформації економіки України. Формування ринкових відносин в Україні. 2023. № 11. С. 29–31.
485. Кравченко І. П. Водневі технології в стратегії сталого розвитку ЄС. Інноваційна економіка. 2022. № 3. С. 115–117.
486. Трунова М. Г. Політична координація екологічної трансформації: уроки для України. Європейські студії. 2023. № 1. С. 49–52.
487. Якименко О. В. Hydrogen Backbone як стратегічний коридор для експорту українського водню до ЄС. Енергетика і право. 2023. № 5. С. 93–95.
488. Данилюк А. Л. Взаємодія України з Hydrogen Europe: поточний стан та перспективи. Міжнародна економічна політика. 2023. № 2. С. 38–40.
489. Пилипенко Т. М. Horizon Europe та можливості для водневої кооперації України. Науково-аналітичний вісник. 2023. № 4. С. 26–27.
490. Сидоренко Р. М. Європейські дослідницькі програми в енергетичному секторі: можливості для України. Інноваційна економіка. 2023. № 1. С. 21–23.
491. Мазур І. В. Перспективи участі українських наукових інститутів у водневих технологіях. Наука і інновації. 2022. № 3. С. 67–70.
492. Шевчук Д. С. Воднева мобільність як новий напрямок розвитку транспорту в Україні. Транспорт і логістика. 2023. № 5. С. 43–45.
493. Павлюк А. І. Енергетичні кластери на основі ВДЕ та H₂. Регіональні студії. 2023. № 3. С. 55–56.

494. Кириленко Н. Ю. Воднева енергетика в контексті науково-технічного розвитку держави. Проблеми науки. 2022. № 12. С. 55-57.
495. Бойко С. Є. Horizon Europe і перспективи участі України у водневих проєктах. Науково-аналітичний вісник. 2023. № 4. С. 44-45.
496. Козак Л. В. Система стратегічного моніторингу в енергетичних проєктах України. Економіка та держава. 2023. № 5. С. 116-118.
497. Дейнега Т. С. Публічно-приватне партнерство в енергетичному секторі України: виклики та перспективи. Інвестиції: практика та досвід. 2022. № 21. С. 64-66.
498. Павленко Ю. А. Екологічна оцінка водневих технологій: методологія та практика. Наука і екологія. 2023. № 2. С. 83-85.
499. Кравець І. М. Цифровізація управління в енергетиці: інструменти моніторингу та аналітики. Державне управління: теорія та практика. 2023. № 3. С. 29-31.
500. Козак Л. В. Тренди розвитку водневої енергетики: виклики для освіти та науки. Енергетика і наука. 2023. № 2. С. 120-122.
501. Мельник О. А. Підготовка спеціалістів для інноваційних технологій в Україні: воднева економіка. Інноваційні технології в енергетиці. 2022. № 4. С. 63-66.
502. Іваненко О. С. Міжнародні освітні програми в енергетичних науках: досвід та перспективи для України. Наука і техніка. 2023. № 5. С. 82-85.
503. Дейнега Т. М. Інтеграція науки і освіти у розвиток енергетичних технологій: від водню до сталого розвитку. Енергетичний вісник України. 2023. № 1. С. 44-47.
504. Кравченко П. М. Воднева енергетика та підготовка кадрів для сталого розвитку в Україні. Енергетичні системи і технології. 2023. № 3. С. 98-100.
505. Шевченко М. І. Енергетична безпека України в умовах війни та економічної нестабільності. Енергетичний журнал. 2022. № 3. С. 31-34.
506. Ковальчук О. В. Механізми фінансування відновлення енергетичної інфраструктури в Україні: проблеми та перспективи. Енергетична політика України. 2023. № 2. С. 54-56.

507. Мельник Т. І. Публічно-приватні партнерства в енергетичному секторі України: перспективи для водневої економіки. Енергетичний вісник України. 2022. № 1. С. 75-77.
508. Ткаченко П. М. Воднева економіка в умовах післявоєнної відбудови: стратегії і шляхи розвитку. Наукові дослідження в енергетичній галузі. 2023. № 5. С. 101-103.
509. Іваненко О. С. Воднева економіка та міжнародні освітні програми: роль України в глобальному контексті. Енергетика і наука. 2023. № 4. С. 44-46.
510. Горбачева Н. В. Міжнародна співпраця в відновленні енергетичної інфраструктури після війни. Економічний розвиток і відновлення України. 2023. № 3. С. 88-90.
511. Ковальчук О. В. Механізми розвитку водневої енергетики в Україні. Енергетичні стратегії і перспективи. 2023. № 1. С. 73-75.
512. Мельник Т. І. Міжнародна співпраця в секторі відновлювальної енергетики: водень як ключ до майбутнього. Економіка та енергетика. 2023. № 3. С. 55-57.
513. Ткаченко П. М. Стратегії розвитку водневої енергетики: відновлення та модернізація інфраструктури. Енергетичні технології України. 2023. № 5. С. 91-93.
514. Іваненко О. С. Розвиток людського капіталу в водневій економіці: навчання та дослідження. Енергетика та наука. 2023. № 2. С. 62-64.
515. Горбачева Н. В. Інвестиційна політика в енергетичному секторі України: водневі проекти. Економіка України. 2023. № 6. С. 104-106.
516. Романенко А. І. Освітній компонент форсайту в умовах енергетичного переходу. Наукові праці НАН України. 2023. № 2. С. 81-84.
517. Сидоренко В. П. Енергетична політика в умовах війни та перспективи відновлення інфраструктури. Стратегічні пріоритети. 2023. № 4. С. 109-111.
518. Mazon J. 5-E Levers: A New Conceptual Model for Achieving Carbon Neutrality in Cities. Sustainability. 2024. Vol. 16. P. 1678. URL: <https://doi.org/10.3390/su16041678> (дата звернення: 20.11.2023).
519. Європейський зелений курс і кліматична політика України : аналіт. Доп. С. П. Іванюта, Л. М. Якушенко. за заг. ред. А. Ю. Сменковського. м. Київ.

НІСД, 2022. С. 95. URL: <https://doi.org/10.53679/NISS-analytrep.2022.12> (дата звернення: 20.11.2023).

520. Кудря С. О., Тащєєв Ю. В. Підходи до прогнозування потреб водню при декарбонізації економіки. Відрновлювана енергетика та енергоефективність у ХХІ столітті: матеріали ХХІІ міжнародної науково-практичної конференції, Інститут відновлюваної енергетики НАНУ. м. Київ, 2022. С. 43-46.

521. Відновлювані джерела енергії: монографія. за заг. ред. С. О. Кудрі. м. Київ. Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

522. Шрайбер О. А., Дубровський В. В., Тесленко О. І. Сучасний стан і перспективи розвитку водневої енергетики у світі. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Т. 32 (71), № 5. С. 199-209.

523. Mazzucato, M. Mission-Oriented Research. Innovation in the European Union: A Problem-Solving Approach to Fuel Innovation-Led Growth. Brussels, Belgium: European Commission, 2018.

524. Xiaoma, L., Yuyu, Z., Sha, Y., Gensuo, J., Huidong, L., Wenliang, L. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*. 2019. Vol. 174. P. 407-419.

525. Рєпкін О. Плани ЄС щодо розвитку водневої галузі до 2030 р. 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-siy> (дата звернення: 20.11.2024).

526. Brown, C., Alexander, P., Arneth, A., Holman, I., Rounsevell, M. Achievement of Paris climate goals unlikely due to time lags in the land system. *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 203-208.

527. Peters, G. P., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Jackson, R. B., Korsbakken, J. I., Le Quéré, C., Peregon, A. Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies. *Nature Climate Change*. 2020. Vol. 10. P. 3-6.

528. Calzada, I. Democratising Smart Cities? Penta-Helix Multistakeholder Social Innovation Framework. *Smart Cities*. 2020. Vol. 3. P. 1145-1172.

529. Akbari, H., Konopacki, S. Calculating energy-saving potentials of heat-island reduction strategies. *Energy Policy*. 2005. Vol. 33. P. 721-756.

530. Лопушанська М., Іванов Є., Циганок Л. Перспективи розвитку кліматично нейтральної водневої енергетики (на прикладі Австрії). 2024. DOI: 10.13140/RG.2.2.31038.70725.
531. Kattel R., Mazzucato M. Mission-oriented innovation policy and dynamic capabilities in the public sector // *Industrial and Corporate Change*. 2018. Vol. 27. P. 787-801.
532. Бакуліч О. Дослідження екологічної безпеки транспортних потоків. Науково-технічні дослідження у галузі транспорту: колективна монографія за заг. ред. Д.В. Ломотька. Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М., 2022. Т. 1. С. 45-76. URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2024/04/transport1-45-76.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).
533. Morfoulaki M., Papathanasiou J. Use of the Sustainable Mobility Efficiency Index (SMEI) for Enhancing the Sustainable Urban Mobility in Greek Cities. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. P. 1709.
534. Дембіцький В. Дослідження енергетичних показників транспортних засобів з електричним приводом. Науково-технічні дослідження у галузі транспорту: колективна монографія за заг. ред. Д.В. Ломотька. Івано-Франківськ: Видавець Кушнір Г.М., 2022. Т. 1. С. 77-114. URL: <https://ukrtsa.org.ua/wp-content/uploads/2024/04/transport1-77-114.pdf> (дата звернення: 20.11.2024).
535. Цапко-Піддубна О. Енергетичний перехід в часи геополітичної нестабільності. *Економіка та суспільство*. 2022. № 43. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1720/165> (дата звернення: 20.11.2024).
536. Mazon J., Pino D., Vinyoles M. Is Declaring a Climate Emergency Enough to Stop Global Warming? Learning From the COVID-19 Pandemic. *Frontiers in Climate*. 2022. Vol. 4. Art. 848587.
537. Табахарнюк М. 10 перешкод для розвитку водневої економіки в Україні. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/05/16/700162> (дата звернення: 20.11.2024).
538. Воднева енергетика в Україні: веб-сайт. URL: https://saee.gov.ua/sites/default/files/3_Repkin_24_11_2020.pdf (дата звернення: 20.11.2024).

539. Дмітрієва О.В. Світова практика та міжнародне співробітництво у розвитку водневої економіки країн світу. Ефективна економіка. 2024. № 10. DOI: 10.32702/2307-2105.2024.10.
540. Ємельяненко Л. М., Дмітрієва О. В., Дмітрієва Д. С. Форсайт-підхід до стратегування економічного розвитку України в умовах невизначеності. Стратегічні імперативи сучасного менеджменту: зб. матеріалів VI Міжнар. наук.-практ. конф., 2022 р. м. Київ. КНЕУ, 2022. С. 206-209.
541. Дмітрієва О. В. Renewable Energy Sources as a Key Focus of Ukraine's Energy Policy Amid Military Threats: Geographical and Economic Dimensions. Economic Affairs. 2024. Vol. 69, No 3. P. 1461-1469. DOI: 10.46852/0424-2513.4.2024.30.
542. Дмітрієва О. В. Міжнародні інструменти економічної аналітики водневої економіки та їх адаптація в Україні. Зб. матеріалів II Міжнар. наук.-практ. конф., 2025 р. м. Київ. КНЕУ, 2025. С. 32-35.

ДОДАТКИ

Додаток А

Трактування сутності водневої економіки закордонними науковцями

Автор, праці	Трактування сутності, основна ідея	Ключові аспекти
Джеремі Ріфкін (Jeremy Rifkin) "The Hydrogen Economy: The Creation of the Worldwide Energy Web and the Redistribution of Power on Earth"	«Воднева економіка як революція енергетичної системи». Воднева економіка - невідворотний етап енергетичної трансформації, подібний до промислових революцій. На його думку, водень стане універсальним енергоносієм, який замінить вуглеводневі ресурси.	Водень розглядається як "енергетична валюта", що може інтегрувати різні види відновлюваної енергії. Енергетична децентралізація: завдяки водню енергетичні системи перейдуть до розподілених мереж, що зробить споживачів і виробників більш автономними.
Аморі Ловінс (Amory Lovins) Статті у виданнях Rocky Mountain Institute	«Водень як частина сталого енергетичного переходу». Воднева економіка - ключовий інструмент для досягнення сталого розвитку. Він наголошує на поєднанні водню з іншими технологіями енергоефективності, щоб створити інтегровану систему.	Водень розглядається як складова багатокомпонентної енергетичної системи, а не як повна заміна викопного палива. Використання водню для декарбонізації транспорту, зокрема розробка "гіперавтомобіля" на паливних елементах.
Пол Екінс (Paul Ekins) "Hydrogen Energy: Economic and Social Challenges"	«Соціо-економічний потенціал водневої економіки». Воднева економіка - шлях до зменшення соціальної нерівності, покращення доступу до енергії та екологічної справедливості.	Воднева економіка сприяє зниженню викидів CO ₂ та забезпечує екологічну безпеку. Інвестиції у водневую інфраструктуру створюють нові робочі місця та стимулюють розвиток "зелених" секторів економіки.
Джон Мартін (John A. Mathews) Роботи, опубліковані в Австралійських енергетичних дослідженнях	«Інтеграція водню з відновлюваною енергетикою». Майбутнє водневої економіки залежить від інтеграції з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонце і вітер.	Водень використовується як засіб зберігання енергії в умовах змінного виробництва відновлюваної енергії. Важлива роль зеленого водню в декарбонізації промисловості та транспорту.
Міхаель Баллард, Мартін Вайсхаймер. Звіти в межах європейських проєктів HyWays та H2Mobility	«Воднева економіка як технологічний виклик». Вчені наголошують на технологічних і економічних викликах створення водневої економіки, зокрема у виробництві, зберіганні та транспортуванні водню.	Розробка ефективних електролізерів для виробництва зеленого водню. Інфраструктурні виклики: створення мережі водневих заправок і транспортних коридорів. Аналіз витрат і перспектив зниження собівартості виробництва.
Джеремі Ріфкін, Томас Кадз Статті у спільних європейських і британських дослідженнях	«Глобальна геоекономіка водню». Воднева економіка розглядається як засіб перерозподілу геополітичного впливу між країнами.	Розвинені країни можуть стати експортерами водню завдяки інвестиціям у технології. Воднева економіка здатна зменшити залежність від нафти й газу.
Роберт Фрідман Дослідження у межах програм DOE (США)	«Інновації в контексті водневої економіки». Наголошення на ролі технологічних стартапів і інновацій у створенні водневої економіки.	Підтримка стартапів, які працюють у сфері водневих технологій (виробництво електролізерів, паливних елементів). Необхідність державної підтримки досліджень і розвитку в цій галузі.

Джерело: побудовано автором

Теоретичні школи водневої економіки та їхні представники

Назва школи	Основні тези та положення	Представники
Технократична	Основна теза: розвиток нових технологій знизить собівартість водню, зробить його доступним та масштабованим. Виробництво, зберігання та транспортування водню через інноваційні підходи. Заміна викопного палива технологіями на основі водню. Інтеграція водню з відновлюваними джерелами енергії.	Джеремі Ріфкін Автор книги <i>"The Hydrogen Economy"</i> , у якій пропонує концепцію переходу до водневого суспільства. Основна ідея: водень стане ключовим енергетичним носієм майбутнього. Джон Шейвенс Фокус на розробці нових матеріалів для паливних елементів. Дослідження у сфері ефективності електролізу води. Умберто Кампос Інженер, що вивчає ефективність транспортування зрідженого водню.
Екологічна	Основна теза: водень є ключовим елементом декарбонізації енергетики, транспорту і промисловості. Водень як шлях до сталого розвитку. Підтримка "зеленого водню", виробленого з відновлюваних джерел. Зменшення вуглецевого сліду у важкій промисловості.	Альберто Валеро Екологічний активіст, який працює над моделями "зеленого водню". Аморі Ловінз Прихильник відновлюваних джерел енергії та інтеграції водню у циркулярну економіку. Клаус Шваб Засновник Всесвітнього економічного форуму, який підтримує ідею сталого розвитку через водневу економіку.
Економічна	Основна теза: економічні стимули, державна підтримка та міжнародна співпраця забезпечать розвиток водневого сектору. Аналіз ринкової вартості водню. Розробка фінансових механізмів підтримки водневих проєктів. Глобальна торгівля воднем як нова економічна ніша.	Кенічі Омуро Досліджує механізми субсидування виробництва водню у Японії. Дітмар Целлінгер Економіст, який аналізує водень як частину глобальної енергетичної торгівлі. Пітер Беккер Автор досліджень про економічну ефективність водневих інвестицій у ЄС
Соціально-економічна	Основна теза: воднева економіка повинна бути соціально справедливою та забезпечувати нові робочі місця. Створення робочих місць у нових секторах. Рівний доступ до екологічно чистих технологій. Розвиток водневої інфраструктури у регіонах із високою залежністю від викопного палива.	Ніколас Стерн Автор звіту про економіку змін клімату, де наголошується на важливості справедливого енергетичного переходу. Мері Робінсон Колишня президентка Ірландії, яка виступає за соціальну відповідальність у водневих проєктах. Кейт Рейворт Розробниця концепції "економіки пончика", яка інтегрує водневі рішення у рамки соціальних потреб.

Скептична	Основна теза: воднева економіка є надто дорогою, енергоємною і поки що недостатньо масштабованою. Високі витрати на виробництво "зеленого водню". Складність транспортування та зберігання. Недостатній розвиток технологій для повсюдного впровадження.	Майкл Лібрайх Енергетичний аналітик, який ставить під сумнів економічну доцільність водню. Вацлав Сміл Дослідник енергетичних систем, який вважає, що водень може бути лише частковим рішенням. Джеймс Темперсон Автор критичних робіт про перспективи водневого транспорту.
Інноваційна	Основна теза: інновації забезпечать майбутнє водневої економіки. Розробка нових типів паливних елементів. Використання штучного інтелекту для оптимізації водневих процесів. Пошук альтернативних методів виробництва водню (наприклад, фотокаталіз).	Джон Гуденаф Лауреат Нобелівської премії, який працює над удосконаленням акумуляторів і паливних елементів. Девід Кіт Дослідник у галузі виробництва водню з атмосферного CO₂. Хіроші Накамура Інженер, який працює над створенням компактних електролізерів.

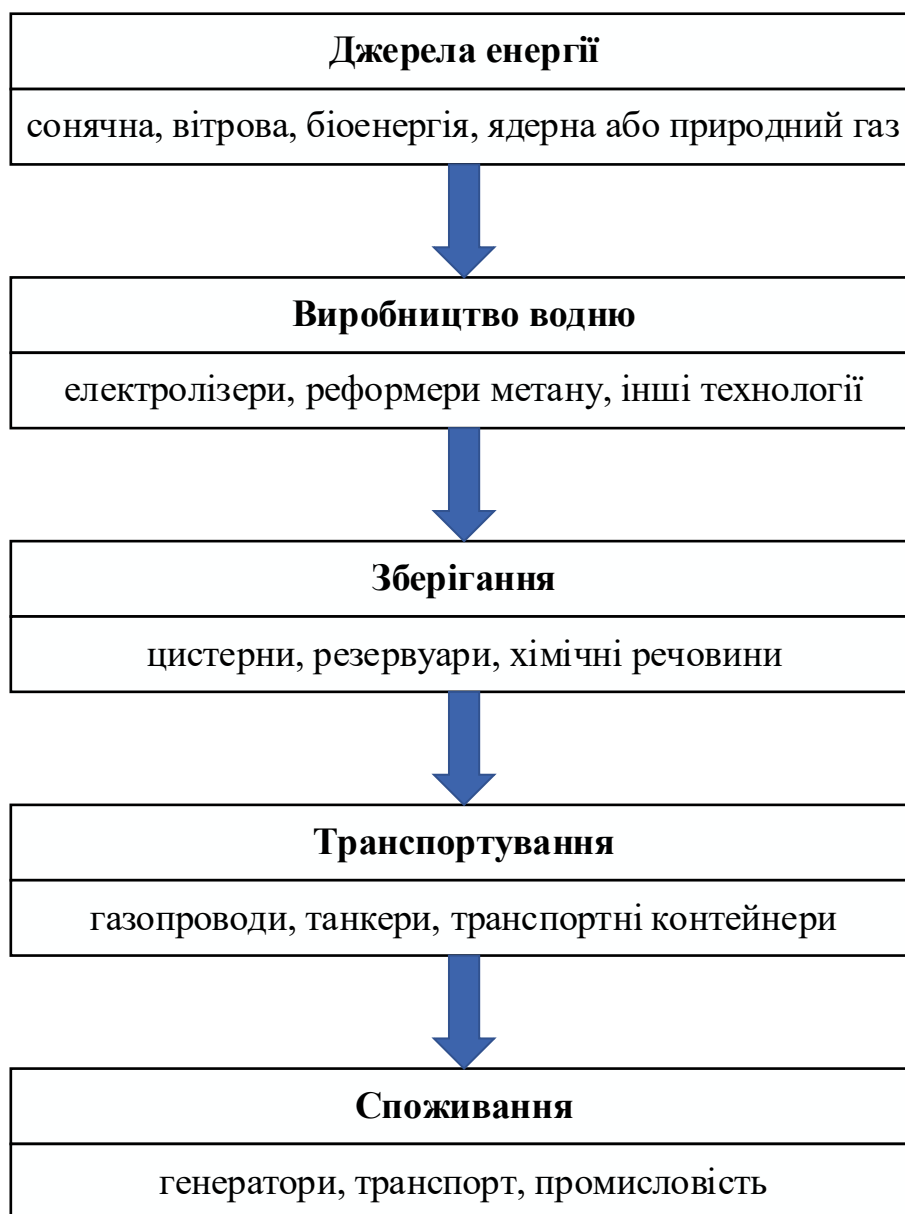
Джерело: побудовано автором

Додаток В

Взаємозв'язок водневої економіки з іншими видами економік

Вид економіки	Взаємозв'язок	Приклади
Економіка знань	Воднева економіка базується на інноваційних технологіях, дослідженнях і розробках. Економіка знань забезпечує розвиток наукових підходів до виробництва, зберігання та транспортування водню.	Розробка нових матеріалів для паливних елементів. Вдосконалення технологій електролізу води. Використання інформаційних технологій для моніторингу водневої інфраструктури.
Циркулярна економіка	Воднева економіка інтегрується в циркулярну модель через ефективне використання ресурсів і повторну переробку. Водень може вироблятися з відходів, що сприяє зменшенню навантаження на екосистему.	Виробництво водню з органічних та промислових відходів. Переробка компонентів водневої інфраструктури (електролізери, паливні елементи). Закриті цикли з утилізацією відходів водневої енергетики.
Зелена економіка	Воднева економіка є одним із ключових елементів зеленої економіки, оскільки сприяє декарбонізації енергетики, транспорту та промисловості. Використання "зеленого водню" відповідає принципам сталого розвитку.	Використання відновлюваних джерел енергії для виробництва водню. Заміна викопного палива у промислових процесах (наприклад, виробництві сталі). Скорочення викидів CO ₂ у транспортному секторі за рахунок водневого палива.
Інноваційна економіка	Воднева економіка є продуктом інноваційної економіки, яка стимулює розвиток технологій, спрямованих на підвищення ефективності виробництва, зберігання та використання водню.	Розробка нових типів паливних елементів. Інноваційні методи транспортування водню (зрідження, використання амоніаку). Автономні водневі енергетичні системи для будівель.
Індустріальна економіка	Водень активно використовується в промисловості, особливо в хімічному виробництві, металургії та переробці. Воднева економіка сприяє декарбонізації цих секторів.	Використання водню для виробництва аміаку, метанолу та інших хімічних сполук. Заміна коксу воднем у виробництві сталі. Подача водню для високотемпературних процесів у промисловості.
Енергетична економіка	Воднева економіка є частиною глобальної енергетичної системи, зосереджуючи увагу на зберіганні енергії, її транспортуванні та генерації.	Використання водню як засобу накопичення енергії. Енергетичні системи на основі водневих паливних елементів. Виробництво електроенергії з водню у пікові періоди споживання.
Транспортна економіка	Водень є перспективним паливом для транспортних засобів, сприяючи декарбонізації транспортного сектору.	Легкові автомобілі на паливних елементах. Водневі автобуси та вантажівки. Використання водню в авіації та морських суднах.
Цифрова економіка	Розвиток водневої економіки залежить від цифрових технологій, які забезпечують управління інфраструктурою, прогнозування попиту і оптимізацію витрат.	Цифрові платформи для моніторингу водневих заправних станцій. Використання штучного інтелекту для оптимізації енергетичних процесів. Смарт-мережі для інтеграції водневої енергетики з іншими джерелами енергії.
Глобальна економіка	Воднева економіка має глобальний характер, адже країни об'єднуються для виробництва, транспортування та торгівлі воднем.	Експорт "зеленого водню" з країн із великим потенціалом ВДЕ (наприклад, України, Австралії) до ЄС, Японії чи Південної Кореї. Міжнародні проекти водневих коридорів для транспортування водню. Глобальні ініціативи щодо розробки водневих стандартів.

Джерело: побудовано автором



Структурно-логічна схема взаємодії визначальних складових в повному
циклі водневої економіки

Джерело: складено автором

Додаток Д

Порівняльна характеристика видів водню

Вид водню	Джерело	Технологія виробництва	Екологічність	Переваги	Недоліки
Зелений водень	Відновлювані джерела енергії (сонячна, вітрова енергія)	Електроліз води з використанням відновлюваної енергії	Найбільш екологічний	Відсутність викидів CO ₂ . Стійкий розвиток.	Висока вартість електролізерів. Дороге обладнання для відновлюваної енергії
Синій водень	Природний газ	Реформінг метану з уловлюванням та зберіганням CO ₂ (CCS)	Частково екологічний	Зниження викидів CO ₂ . Використання існуючої інфраструктури.	Додаткові витрати на CCS. Залежність від викопного палива.
Сірий водень	Природний газ	Реформінг метану без уловлювання CO ₂	Неекологічний	Найнижча вартість виробництва. Широка доступність сировини.	Високі викиди CO ₂ . Негативний вплив на довкілля.
Бурий водень	Викопне паливо (вугілля, лігніт)	Газифікація вугілля	Дуже неекологічний	Дешевий процес. Широка доступність вугілля.	Найвищі викиди CO ₂ . Великі екологічні ризики.
Біоводень	Біомаса	Мікробіологічне розщеплення або газифікація біомаси	Відносно екологічний	Використання відновлюваної біомаси. Замкнений вуглецевий цикл	Низька ефективність. Висока вартість технологій.
Жовтий водень	Електрика з атомних станцій	Електроліз води з використанням електроенергії від АЕС	Частково екологічний	Низькі викиди CO ₂ . Використання наявної атомної інфраструктури.	Залежність від ядерного палива. Високі витрати на безпечність.
Бірюзовий водень	Природний газ	Піроліз метану (розкладання на водень і тверду сажу)	Частково екологічний	Відсутність викидів CO ₂ при правильній утилізації.	Висока вартість процесу. Необхідна утилізація твердої сажі.

Джерело: складено автором

Інноваційні інструменти розбудови водневої економіки

Інструмент	Змістовна характеристика	Функціональне призначення	Взаємозв'язок з іншими складовими
Водневі технології	Інновації в таких сферах, як виробництво водню (електроліз води, парова конверсія метану, біомасові технології), його зберігання, транспортування та використання.	Водневих ініціатив для інфраструктури. Виробництво водню: використання відновлювальних джерел енергії (сонце, вітер) для електролізу води. Транспортування водню: розробка нових матеріалів та технологій для ефективного транспортування водню (під високим тиском, в рідкому стані). Зберігання водню: технології, як-от високотемпературне зберігання або застосування металогідридів для безпечного зберігання водню.	Основа для водневих хабів, коридорів, долин та інших елементів інфраструктури, що забезпечують практичну реалізацію водневої економіки.
Водневі долини (Hydrogen Valleys)	Географічні регіони або промислові зони, де зосереджені всі етапи водневої економіки: від виробництва водню до його застосування в енергетичних системах, транспорті та промисловості.	Відновлювальні джерела енергії для "зеленого" водню: спеціалізовані підприємства для виробництва водню; мережа для транспортування водню; логістичні та інфраструктурні потужності для зберігання та експорту водню.	Стимулюють розвиток місцевої економіки через концентрацію інвестицій, досліджень і технологій; є частиною водневих хабів та коридорів, де можна реалізувати масштабні водневі проєкти.
Водневі хаби (Hydrogen Hubs)	Інфраструктурні центри, що займаються виробництвом, зберіганням і розподілом водню.	Центри для виробництва водню на основі відновлювальної енергії. Мережі для транспортування водню (газопроводи, водневі термінали). Потужності для зберігання водню та його дистрибуції.	Інтегруються в водневі долини, надаючи потужності для розподілу водню у промислових регіонах; можуть стати частинами водневих коридорів і магістралей, сприяючи розвитку міжнародних торгових шляхів для водню.
Водневі коридори (Hydrogen Corridors)	Маршрути для транспортування водню, що з'єднують водневі хаби з іншими регіонами або країнами.	Трубопроводи або транспортні шляхи для водню та можуть бути інтегровані в глобальні енергетичні мережі: експорт водню до Європи, Азії та інших ринків через спеціалізовані порти і газопроводи; створення міжнародних водневих маршрутів для забезпечення енергетичної безпеки.	Забезпечують міжнародну інтеграцію, сприяють розвитку водневих хабів та інфраструктури, створюють глобальні ланцюги поставок водню.
Воднева магістраль (Hydrogen Backbone)	Розгалужена система трубопроводів або інфраструктури, яка зв'язує водневі хаби, долини та коридори, забезпечуючи інтеграцію різних елементів водневої економіки	Може бути частиною загальноєвропейської чи глобальної водневої мережі: створення єдиної водневої транспортної мережі для інтеграції внутрішніх і міжнародних ринків; система, що дозволяє транспорт водню великими обсягами між різними територіями.	Складова частина водневих коридорів, хабів і долин, що об'єднує всі регіони в одну інтегровану водневу мережу

Продовження дод. Е

Водневі меморандуми (Hydrogen Memoranda)	Офіційні угоди між країнами, компаніями чи організаціями, спрямовані на спільну реалізацію водневих проєктів.	Вони можуть включати: співпрацю в наукових дослідженнях; обмін технологіями; спільне фінансування водневих інфраструктурних проєктів.	Основа для реалізації водневих хабів і коридорів, оскільки створюють політичні та економічні умови для співпраці між державами і компаніями.
Водневі стратегії (Hydrogen Strategies)	Національні або міжнародні плани, що визначають цілі, пріоритети та напрямки розвитку водневої економіки.	Вони включають: розробку політик для підтримки інвестицій у водневі технології; визначення ключових секторів для водневих інфраструктур (енергетика, транспорт, промисловість); плани інтеграції водню в енергетичні та промислові системи.	Основи для розвитку водневих хабів, коридорів та долин. Вони визначають пріоритети національних політик, необхідних для підтримки інфраструктурних та технічних проєктів
Водневі проєкти (Hydrogen Projects)	Конкретні ініціативи, спрямовані на розвиток технологій, інфраструктури та застосування водню.	Вони можуть бути пов'язані з: будівництвом електролізерів для виробництва водню; розвитком водневих заправок для транспорту; створенням інфраструктури для зберігання і транспортування водню.	Конкретизація цілей водневих стратегій і часто реалізуються в рамках водневих хабів або долин. Вони є основою для досягнення більш амбітних завдань у водневій економіці
Водневі центри (Hydrogen Centers)	Спеціалізовані науково-дослідні установи або виробничі підприємства, де проводяться дослідження і розробки нових водневих технологій.	Вони можуть бути зосереджені на: вивченні ефективності використання водню; розробці нових методів.	

Джерело: складено автором

Передумови, детермінанти та виклики розбудови водневої економіки в Україні

Категорія	Змістовна характеристика
Передумови	
Енергетичний потенціал	- ВДЕ: вітрова, сонячна енергія, біомаса. - Розвинена газотранспортна система (ГТС).
Географічне положення	- Вигідне розташування для експорту водню в Європу.
Підтримка з боку ЄС	- Україна як стратегічний партнер у водневій стратегії ЄС.
Зобов'язання щодо декарбонізації	- Участь у Паризькій угоді та зобов'язання зі скорочення викидів.
Ресурсна база	- Водні ресурси для електролізу. - Високопалеве паливо для "синього" водню.
Детермінанти	
Технологічні фактори	- Модернізація інфраструктури для виробництва, транспортування, зберігання водню. - Інвестиції в дослідження та розробки.
Економічні умови	- Залучення іноземних інвестицій. - Висока вартість виробництва водню. - Експортний потенціал до ЄС.
Політична підтримка	- Розробка Національної водневої стратегії. - Податкові пільги та держпідтримка бізнесу.
Соціальні аспекти	- Підготовка кадрів для водневої економіки. - Популяризація(інформування) населення.
Екологічні міркування	- Зменшення викидів CO ₂ . - Перехід до екологічно чистих джерел енергії.
Інтеграція з іншими галузями	- Використання водню в металургії, хімічній промисловості, транспорті, енергетиці.
Виклики	
Відсутність стратегії	- Немає затвердженої національної стратегії розвитку водню.
Недостатнє фінансування	- Обмежені ресурси для наукових досліджень та інновацій.
Високі витрати	- Значна вартість виробництва "зеленого" водню.
Невідповідність інфраструктури	- Недостатня готовність до транспортування та зберігання водню.
Політичні та економічні ризики	- Нестабільність політичної ситуації. - Залежність від зовнішніх інвесторів.

Джерело: сформовано автором

Синергетичні ефекти розбудови водневої економіки в Україні

Ефект	Сутність
1. Енергетична безпека	Диверсифікація енергопостачання: водень може доповнити або замінити традиційні джерела енергії, зменшуючи залежність від імпорту викопного палива. Інтеграція з ВДЕ: зберігання енергії, виробленої вітровими і сонячними станціями, через перетворення в водень.
2. Декарбонізація економіки	Зниження викидів CO₂: водень як паливо для транспорту, енергетики та промисловості сприяє зменшенню викидів парникових газів. "Зелений водень": виробництво водню з використанням відновлюваних джерел енергії сприяє переходу до безвуглецевої економіки.
3. Інновації та технології	Стимулювання R&D: розвиток водневої економіки сприяє впровадженню інновацій у виробництві, транспортуванні та зберіганні водню. Суміжні галузі: розвиток технологій електролізу, паливних елементів і криогенних систем для водню позитивно впливає на інші сектори.
4. Економічний розвиток	Нові ринки та інвестиції: формування ринку водню створює нові можливості для інвестицій, зокрема у виробництво, інфраструктуру та експорт. Створення робочих місць: розвиток водневої економіки потребує кваліфікованих кадрів для нових галузей.
5. Галузева інтеграція	Металургія: використання водню замість коксівного вугілля у виробництві сталі. Хімічна промисловість: водень як сировина для виробництва аміаку, добрив та метанолу. Транспорт: водневі паливні елементи для автомобілів, кораблів, авіації.
6. Регіональний розвиток	Інтеграція з ЄС: співпраця з Європейським Союзом у рамках "водневих коридорів". Розвиток інфраструктури: створення водневих хабів у регіонах з високим потенціалом ВДЕ.
7. Зміцнення економічних зв'язків	Експортний потенціал: Україна може стати важливим постачальником водню для ЄС. Скорочення енергетичних конфліктів: водень може зменшити геополітичну напругу, пов'язану з залежністю від викопних палив.
8. Енергетична ефективність	Зменшення втрат енергії: використання водню як проміжного енергоносія сприяє підвищенню загальної ефективності енергетичних систем.
9. Соціальні ефекти	Підвищення екологічної свідомості: воднева економіка сприяє популяризації екологічних цінностей. Поліпшення якості життя: чисте паливо забезпечує зменшення забруднення повітря в містах.

Джерело: систематизовано автором

Додаток І

Стратегічні документи, які регламентують основні міжнародні ініціативи в сфері водню, енергетики та водневої економіки

№ п/п	Назва документа	Дата публікації	Характеристика	Стратегічні цілі та індикатори
1.	Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (UNFCCC)	1992 р.	Глобальна угода щодо боротьби зі зміною клімату, що поклала основу для міжнародної кліматичної політики.	Обмеження глобального потепління до 2°C, зусилля для 1,5°C.
2.	Міжнародна енергетична хартія (Energy Charter Treaty)	1994 р.	Міжурядовий документ, що забезпечує юридичні основи для співпраці в галузі енергетики.	Встановлення правил для міжнародної енергетичної співпраці, забезпечення доступу до енергії та сталого розвитку енергетичних ресурсів.
3.	Київський протокол	1997 р.	Юридично зобов'язуючий документ, який встановлює обмеження на викиди парникових газів для промислово розвинутих країн.	Скорочення викидів на 5,2% порівняно з рівнем 1990 року у період 2008-2012 рр.
4.	Паризька угода	2015 р.	Глобальна угода, яка надає міжнародні зобов'язання для обмеження глобального потепління.	Утримання температури планети значно нижче 2°C, бажано – 1,5°C до кінця століття.
5.	Глобальна стратегія сталого розвитку (2030 Agenda for Sustainable Development)	2015 р.	Глобальна програма ООН з 17 Цілей сталого розвитку (SDGs).	Забезпечення економічного зростання, сталого розвитку та подолання бідності.
6.	Порядок денний для кліматичних дій 2016 (UN Climate Action Summit)	2016 р.	Платформа для міжнародних дій по клімату, що фокусується на спільних зусиллях для зниження викидів.	Ключові дії для досягнення кліматичних цілей, підвищення амбіцій щодо скорочення викидів.
7.	Глобальний водневий альянс (Global Hydrogen Alliance)	2021 р.	Ініціатива з розвитку міжнародного ринку водню через співпрацю різних країн.	Підтримка виробництва та транспортування водню на глобальному рівні, сприяння екологічному переходу до водневих технологій.

Джерело: систематизовано автором

Основні етапи Дорожньої карти Європейської зеленої угоди

Етап, період	Комплекс заходів
<i>Етап 1.</i> Підготовчий етап та законодавчі ініціативи, 2020–2023 рр.	2019 (грудень) – Офіційне представлення та прийняття EuropeanGreenDeal. 2020 – Прийняття Європейського Кліматичного закону (законодавче закріплення цілі досягнення нульових викидів до 2050 року). Розробка Європейської водневої стратегії. 2021 – Запуск Механізму справедливого переходу (JustTransitionMechanism) – фінансова підтримка регіонів, залежних від викопного палива. Впровадження "Fitfor 55" – законодавчого пакета для скорочення викидів CO₂ на 55% до 2030 року. Старт Європейського фонду водню. 2021–2023 – Розширення фінансування через фонд NextGenerationEU та інвестиції в зелений перехід. Інтеграція України в Європейську енергомережу ENTSO-E. Затвердження нового Зеленої промислової стратегії ЄС для підтримки кліматично чистих технологій. Впровадження механізму CBAM (CarbonBorderAdjustmentMechanism) – вуглецевого мита для імпортерів продукції з великим вуглецевим слідом.
<i>Етап 2.</i> Масштабування проєктів та зниження викидів, 2024–2030 рр.	До 2025 року – Всі країни ЄС повинні впровадити нові стандарти енергоефективності для будівель та транспорту. Розширення виробництва водню та будівництво водневої інфраструктури. 2026–2030 – Скорочення використання викопного палива (вугілля, нафти, газу). 42,5% енергії в ЄС має походити з ВДЕ. Повний запуск CBAM (вуглецевого мита) для всіх секторів. Масштабне впровадження електромобілів та розвиток водневого транспорту. Енергетика: масове розширення відновлюваної енергетики (сонячна, вітрова, воднева енергетика); виведення з експлуатації вугільних електростанцій; розвиток інфраструктури для виробництва та зберігання водню. Транспорт: збільшення виробництва електромобілів та розширення зарядних станцій; посилення стандартів викидів для автомобілів та літаків; інвестиції в залізничний та водний транспорт. Промисловість та економіка: підтримка «зелених» технологій у виробництві (сталеливарна промисловість, цементна галузь, хімія); впровадження механізму вуглецевого коригування імпорту (CBAM); запуск повноцінного ринку вуглецевих квот. Сільське господарство та біорізноманіття: виконання стратегії «Від ферми до столу» (зменшення використання пестицидів, екологізація аграрного сектору); відновлення лісів та екосистем; скорочення використання антибіотиків у тваринництві.
<i>Етап 3.</i> Повний перехід на чисту економіку (Декарбонізація та кліматична нейтральність), 2031–2050 рр.	До 2035 року – Заборона на продаж автомобілів з ДВЗ в ЄС. Розширення "зелених" міст – екологічний транспорт, ефективні будівлі. Закриття більшості вугільних ТЕС. До 2040 року – Викиди CO₂ мають бути скорочені на 90% (порівняно з рівнем 1990 року). ЄС переходить на повністю декарбонізовану енергосистему. До 2050 року – Досягнення кліматичної нейтральності ЄС (викиди CO₂ компенсуються або усуваються): вся енергія – з чистих джерел; нульові викиди в промисловості, транспорті, енергетиці. Створення циркулярної економіки – мінімізація відходів, перехід до повного вторинного використання ресурсів.

Джерело: складено автором

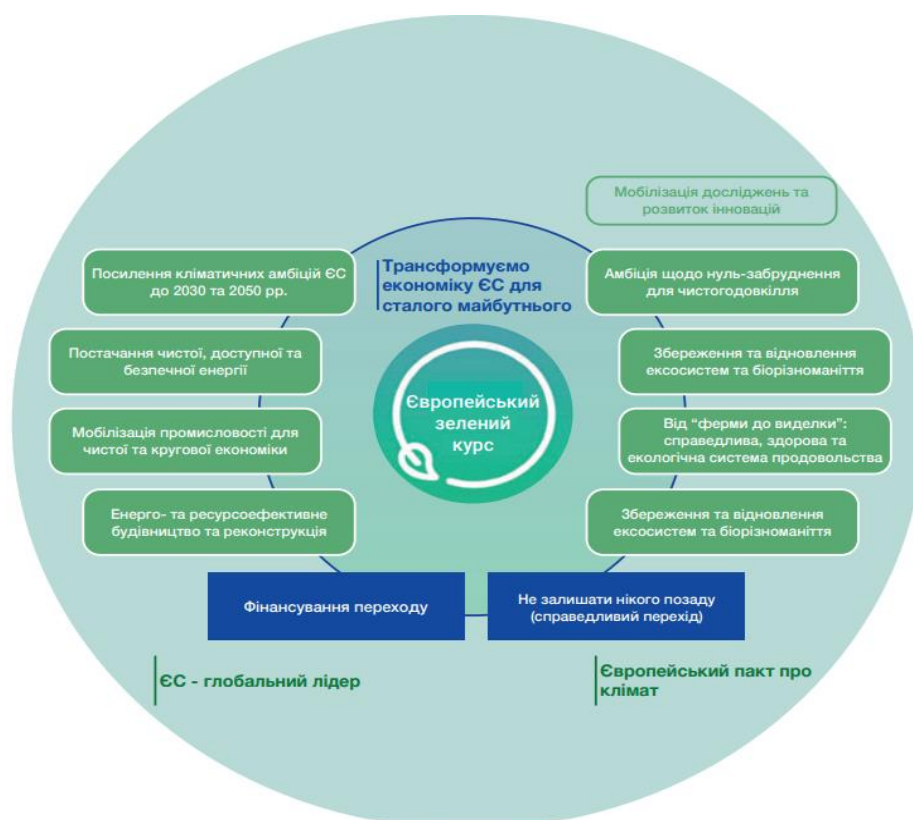


Рис. Л.1. "European Green Deal" як реформа в історії ЄС [1]

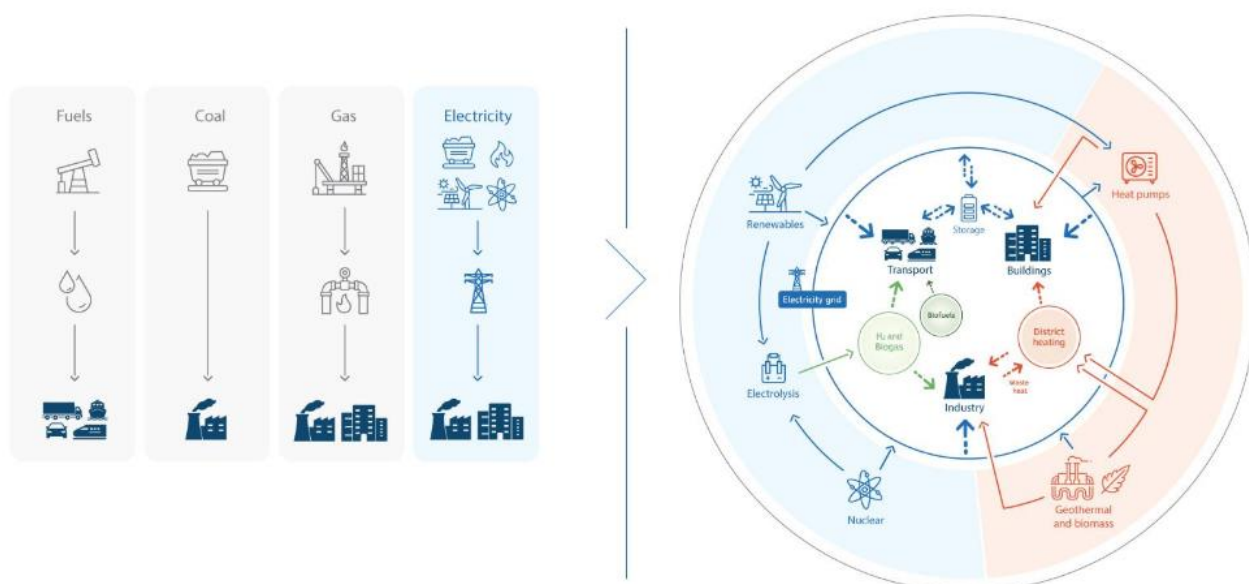


Рис. Л.2. Енергетичний перехід в Стратегії інтеграція енергетичної системи Європейського Союзу [1]

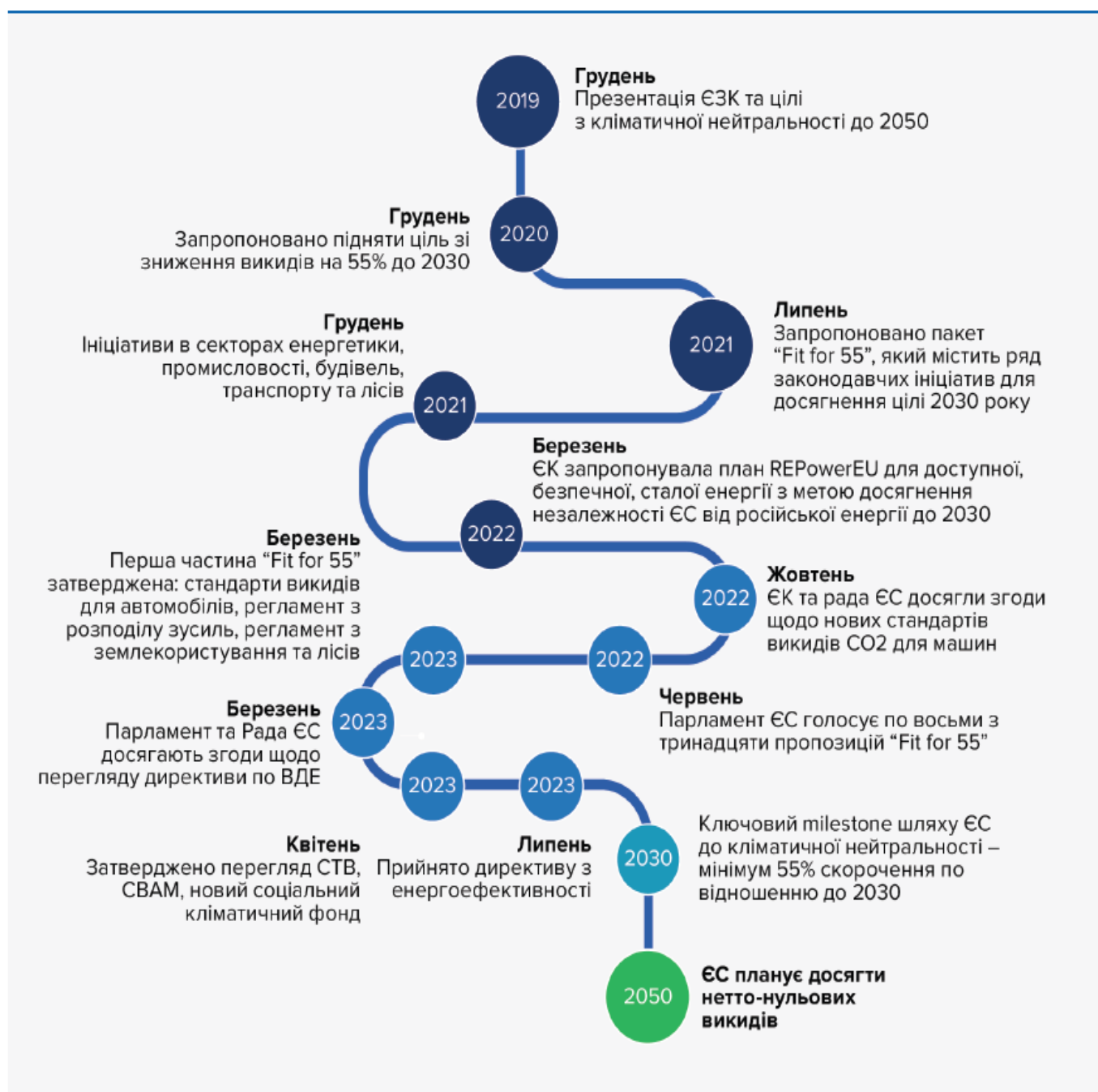


Рис. М.1. Хронологічна схема впровадження ЄЗК та пакету «Fitfor 55» [1]

Додаток Н



Рис. Н.1. Розвинена європейська воднева мережа у 2040 році [1]

Додаток П

Основні стратегічні документи, які регламентують основні європейські ініціативи в сфері водню

№ п/п	Назва документа	Дата публікації	Характеристика	Стратегічні цілі та індикатори
1.	Стратегія ЄС щодо сталого розвитку (EU Sustainable Development Strategy)	2001 р.	Окреслює довгострокові орієнтири розвитку ЄС з урахуванням сталого розвитку.	Досягнення сталого економічного зростання, інтеграція екологічних та соціальних аспектів у політику.
2.	Європейський зелений курс (European Green Deal)	2019 р.	Комплексна стратегія досягнення кліматичної нейтральності ЄС до 2050 р.	Зниження викидів CO ₂ на 55% до 2030 р., кліматична нейтральність до 2050 р.
3.	Воднева стратегія ЄС	2020 р.	План розвитку водневих технологій як частини переходу до чистої енергетики.	6 ГВт електролізерів до 2024 р., 40 ГВт – до 2030 р.
4.	Кліматичний закон ЄС	2021 р.	Закріплює юридично обов'язкову мету кліматичної нейтральності ЄС до 2050 р.	Скорочення викидів на 55% до 2030 р., кліматична нейтральність до 2050 р.
5.	Фіт для 55 (Fitfor 55 Package)	2021 р.	Законодавча ініціатива щодо підтримки виробництва чистих технологій в ЄС.	Посилення норм ETS, зміни у транспортному секторі, оподаткування викидів CO ₂ .
6.	План REPowerEU	2022 р.	Стратегія енергетичної незалежності ЄС від російських викопних палив.	До 2030 р. виробництво 10 млн тонн зеленого водню, імпорт 10 млн тонн водню.
7.	Декларація щодо водневих долин (Hydrogen Valleys Declaration)	2022 р.	Ініціатива щодо створення регіональних водневих кластерів в Європі.	Створення масштабних водневих проєктів до 2030 р.
8.	Net-Zero IndustryAct	2023 р.	Законодавча ініціатива щодо підтримки виробництва чистих технологій в ЄС.	Збільшення виробництва чистої енергії, водневих технологій.

Джерело: систематизовано автором

Додаток Р

Участь України в європейських ініціативах розвитку водневої економіки

Ініціатива	Опис	Основні учасники	Мета та цілі	Участь України
Воднева стратегія ЄС (2020)	Європейська стратегія для розвитку водневої економіки. Розробка водневих технологій для промисловості, транспорту, енергетики.	Європейська комісія, уряди держав-членів, приватний сектор	Виробництво до 10 млн тонн зеленого водню до 2030 року, досягнення водневої нейтральності до 2050 року.	Україна не є основним учасником цієї стратегії, але інтерес до водневої економіки є, зокрема через можливості експорту водню до ЄС.
Європейський водневий альянс (2020)	Об'єднання компаній та організацій для сприяння розвитку водневої економіки в ЄС, залучення інвестицій, розвиток інфраструктури.	понад 200 компаній, уряди країн-членів ЄС	Розвиток водневих хабів, розширення водневої інфраструктури, збільшення виробництва зеленого водню.	Україна не є членом альянсу, але активно взаємодіє з ЄС щодо можливостей водневих коридорів і експорту водню.
IPCEI-Hydrogen (2020)	Важливі проекти спільного європейського інтересу для фінансування водневих технологій, 10 млрд євро інвестицій на розвиток водневої економіки.	Німеччина, Франція, Іспанія, Нідерланди, Італія, компанії водневої галузі	Розвиток водневих технологій, створення водневої інфраструктури, розвиток водневої економіки на рівні ЄС.	Україна бере участь в рамках ініціативи REPowerEU, активно працює над інтеграцією у водневу інфраструктуру ЄС.
HydrogenBackbone (2020)	Ініціатива для створення водневої магістральної мережі в Європі: трубопроводи для транспортування водню між країнами ЄС.	30+ європейських газових компаній	Побудова водневої інфраструктури для інтеграції водню в енергетичну систему ЄС. Створення 39 700 км водневих трубопроводів до 2040 року.	Україна бере участь у створенні водневої магістралі через підключення своєї газотранспортної системи до водневої мережі ЄС.
Воднева долина у Німеччині (HyLand) (2020)	Розвиток водневої долини в Німеччині, яка об'єднує виробництво, зберігання та споживання водню для різних секторів економіки.	Уряди, місцеві органи влади, компанії в Німеччині	Створення водневих хабів, розвиток водневої інфраструктури для місцевого використання, збереження і транспортування водню.	Україна не є прямим учасником, але потенційно може брати участь в ініціативах через транскордонні водневі проекти.
Партнерство водневої економіки в ЄС	Створення партнерств для розвитку водневої економіки на рівні ЄС, сприяння інвестиціям у водневі технології та інфраструктуру.	Європейська комісія, уряди країн ЄС, приватний сектор	Розвиток водневої економіки через інвестиції в інфраструктуру та технології, зміцнення міжнародних зв'язків для експорту водню.	Розвиток водневої економіки через інвестиції в інфраструктуру та технології, зміцнення міжнародних зв'язків для експорту водню.

Джерело: систематизовано автором

Додаток С

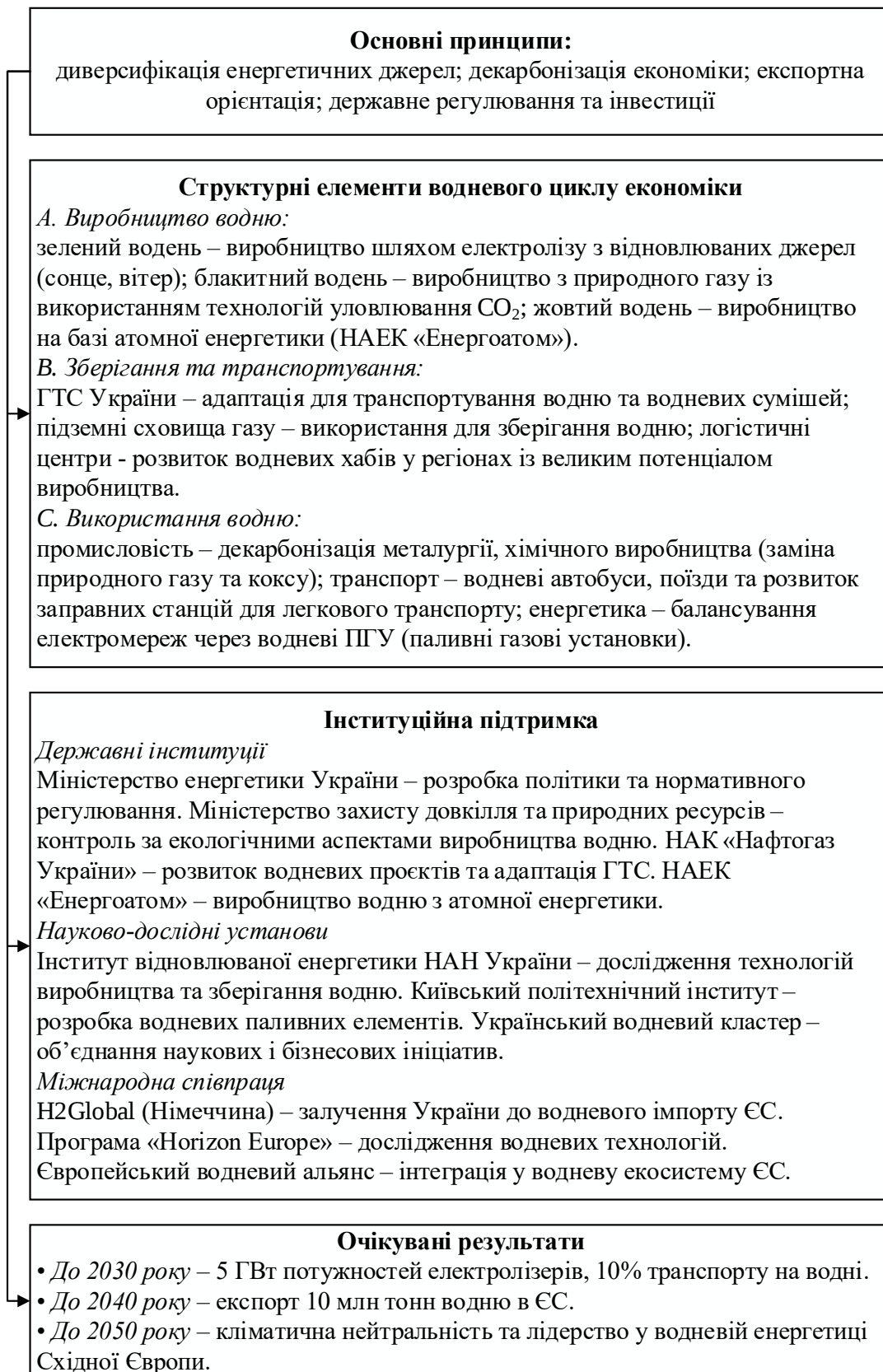


Рис. С.1. Національна модель водневої економіки України

Етапи розвитку глобальної енергетичної кризи

Етапи	Тенденції	Події
Передумови (2010–2019 роки)	Зниження інвестицій у нафтову та газову промисловість	Після світової фінансової кризи 2008 року інвестиції у видобуток енергоносіїв знижувалися. У 2014–2016 роках через обвал цін на нафту (до \$30 за барель) нафтові компанії скоротили виробництво.
	Посилення кліматичної політики	Країни ЄС ухвалюють "Зелений курс" та скорочують використання викопного палива. Обмеження на фінансування нових нафтових і газових проєктів.
	Ріст залежності Європи від російського газу	Газопроводи «Північний потік-1» і «Ямал-Європа» збільшують імпорт газу з РФ, що робить ЄС вразливим до маніпуляцій.
Загострення кризи (2020–2022 роки)	Пандемія COVID-19 (2020–2021)	Скорочення світового попиту на нафту → зниження інвестицій у видобуток. Перебої в глобальних ланцюгах постачання.
	Післяпандемійний стрибок попиту (2021)	Відновлення економік викликало стрімке зростання потреби в енергоносіях. Ціни на газ у Європі восени 2021 року зросли в 5 разів (із \$100 за 1000 куб. м до \$500+).
	Повномасштабна війна Росії проти України (2022)	Санкції проти російського газу та нафти призвели до енергетичного шоку в Європі. "Газовий шантаж" РФ – скорочення постачання через «Північний потік-1». Вибухи на «Північних потоках» у вересні 2022 року. Ціни на газ досягли рекордних \$3500 за 1000 куб.м у серпні 2022 року.
Сучасний стан (2023–2024 роки)	Енергетична переорієнтація Європи	Різке скорочення імпорту російського газу (з 40% до менше ніж 10%). Збільшення закупівель СПГ (зрідженого природного газу) з США, Катару, Норвегії. Відновлення вугільних електростанцій у деяких країнах ЄС.
	Прискорений перехід на відновлювані джерела енергії	Ріст інвестицій у сонячну, вітрову та водневу енергетику. Німеччина, Франція та Іспанія розширюють використання ядерної енергетики.
	Ціни стабілізувалися, але ризики залишаються	Нафта стабілізувалася в межах \$75–85 за барель. Газ у Європі – \$300–500 за 1000 куб.м (нижче пікових значень 2022 року). Проблеми через нестабільність постачання, зокрема через війну на Близькому Сході.

Джерело: складено автором на основі [1]

Додаток У

Основні сегменти світового енергетичного ринку

Сегмент	Головні виробники	Головні споживачі	Тенденції
Ринок нафти	США, Саудівська Аравія, Росія	США, Китай, Індія	Скорочення попиту через розвиток електротранспорту. Коливання цін через геополітичні конфлікти. Поступова декарбонізація, що знижує перспективи зростання ринку. <i>Очікувана тенденція:</i> Скорочення попиту через електромобілі.
Ринок природного газу	США, Росія, Катар	ЄС, Китай, Японія	Розвиток LNG (зрідженого природного газу) та скорочення залежності від трубопровідного газу. Відмова ЄС від російського газу та зростання імпорту LNG із США та Катару. Інвестиції в "зелені" гази (біогаз, водень). <i>Очікувана тенденція:</i> Розвиток LNG та "зелених" газів.
Вугільна промисловість	Китай, Індія, США	Китай, Індія	Скорочення використання у розвинених країнах через екологічні норми. Продовження активного використання у Китаї та Індії. <i>Очікувана тенденція:</i> Подальше скорочення, крім Азії.
Ядерна енергетика	США, Франція, Китай, Росія	США, Франція, Китай, Росія, Японія, Канада, Німеччина (до 2023р.), Південна Корея, Великобританія, Україна, Індія	Використання атомних електростанцій (АЕС) для виробництва електроенергії. Поширення спектру споживачів – від великих промислових корпорацій до пересічних громадян, сприяючи стабільному енергопостачанню та розвитку передових технологій. Ядерна енергетика має потенціал для зменшення викидів CO ₂ , але стикається з проблемами безпеки та утилізації відходів.
Альтернативна енергетика	Китай, США, ЄС	Всі країни світу	Різке зростання інвестицій у сонячну та вітрову енергетику. Розвиток технологій акумулювання енергії, водневих технологій, розумних мереж (smartgrids) та енергозберігаючих рішень. Державні субсидії для переходу на "зелену" енергію. Воднева енергетика набуває популярності як потенційне чисте паливо майбутнього. <i>Очікувана тенденція:</i> Бурхливе зростання, особливо сонячної та вітрової енергетики.

Джерело: розроблено і складено автором на основі [143-148]

Реалізація національних стратегічних ініціатив щодо розвитку водневої економіки в провідних країнах ЄС та Україні

Країна	Воднева ініціатива (стратегічний документ)	Основні інвестиції	Ключові Проекти	Основний фокус
Німеччина	Національна Воднева стратегія (2020, оновлена 2023)	9 млрд. євро	Водневі потяги Alstom, HyPerformer, імпорт водню	"Зелений" водень, промисловість, транспорт
Франція	Воднева стратегія (2020)	7 млрд. євро	AirLiquide, HyPort, HydrogenValleys	Водневі електролізери, авіація, транспорт
Італія	Воднева стратегія (2020)	3,3 млрд. євро до 2030 року	Проекти у транспорті та промисловості	Водневий транспорт, сталий розвиток
Нідерланди	Воднева стратегія (2020)	9 млрд. євро	Порт Роттердама, імпорт водню з Близького Сходу	Імпорт водню, транспорт, енергетика
Іспанія	Воднева стратегія (2020)	1,6 млрд. євро до 2024 року	Водневі хаби в Андалусії, експорт водню в ЄС	Воднева енергетика, виробництво та експорт водню
Португалія	Воднева стратегія (2020)	1,4 млрд. євро до 2030 року	Водневі проєкти в портовій інфраструктурі	Водневі хаби, зелений водень, транспорт
Швеція	Воднева стратегія (2020)	1,3 млрд. євро до 2030 року	Окремі проєкти для залізниць та важкої промисловості	Водневий транспорт, промисловість, сталий розвиток
Фінляндія	Воднева стратегія (2020)	1,1 млрд. євро до 2030 року	Проекти з виробництва водню з відновлювальних джерел	Відновлювальна енергетика, водневі хаби
Норвегія	Воднева стратегія (2021)	1 млрд. євро до 2030 року	Водневі заправки, імпорт водню в ЄС	Водневі технології в морському транспортуванні
Швейцарія	Воднева стратегія (2020)	2 млрд. євро до 2030 року	Водневі мобільні станції, електролізери	Водневі технології для транспорту
Австрія	Воднева стратегія (2020)	3 млрд. євро до 2030 року	Водневі автобуси, мобільні заправки	Водневий транспорт, екологічні рішення
Україна	Стратегія розвитку водневої енергетики (2022)	15 млрд. євро до 2030 року	Водневі проєкти для енергетики, транспорту, експорту	Водневі хаби, зелений водень, експорт в ЄС

Джерело: складено і систематизовано автором

Додаток X

Структурно-логічна схема порівняльного аналізу стану водневої економіки за показниками міжнародної статистики

Показник (одиниця виміру)	Сутнісна характеристика	Призначення
Етап 1. Прогрес в розвитку водневої економіки		
Обсяг виробництва водню (млн тонн)	Визначає загальний обсяг виробленого водню в країні чи регіоні.	Оцінка масштабів водневої індустрії та здатності країни до задоволення внутрішнього попиту та експортних можливостей.
Частка "зеленого" водню в загальному обсязі виробництва	Визначає частку водню, виробленого з використанням відновлювальних джерел енергії	Оцінка прогресу в досягненні цілей декарбонізації та впровадження відновлювальних джерел.
Етап 2. Інвестиції та інфраструктура		
Інвестиції в водневі технології (млн дол.)	Визначає обсяги фінансування для розвитку водневих технологій і проектів.	Оцінка залучення приватних та державних інвестицій у водневу економіку.
Кількість водневих заправних станцій	Визначає кількість інфраструктури для заправки водневих транспортних засобів.	Оцінка розвитку інфраструктури водневого транспорту.
Кількість водневих транспортних засобів	Визначає кількість водневих автомобілів, автобусів, вантажівок та інших транспортних засобів на водневому паливі	Оцінка розвитку водневого транспорту та зниження викидів CO ₂ від традиційних видів транспорту.
Кількість водневих трубопроводів (км)	Визначає довжину водневих трубопроводів, що забезпечують транспортування водню між регіонами та країнами.	Оцінка розвитку інфраструктури для транспортування водню.
Етап 3. Екологічний ефект		
Викиди CO ₂ , знижені за рахунок водневих технологій (млн.тонн)	Оцінка зниження викидів парникових газів завдяки впровадженню водневих технологій.	Оцінка ефективності водневої економіки в контексті боротьби зі змінами клімату.
Етап 4. Міжнародні зв'язки		
Інвестиції в міжнародні водневі проекти (млн.дол.)	Визначає інвестиції в міжнародні водневі ініціативи та проекти.	Оцінка участі країни у глобальних водневих проектах і її інтеграції в міжнародні ринки.

Джерело: узагальнено автором на основі міжнародної звітності

Додаток Ц

**Взаємозв'язок між показниками, індикаторами та критеріями
ефективності розвитку водневої економіки**

Критерії	Індикатори	Показник
1. Екологічна ефективність	Зниження викидів CO ₂ в енергетичному секторі	Кількість тонн CO ₂ зменшено на 1 тону водню (відновлювальний водень)
	Частка водню у зниженні викидів парникових газів	% зменшення викидів CO ₂ при переході на водневі технології
2. Економічна вигідність	Створення нових робочих місць в галузі водневої енергетики	Кількість створених робочих місць у водневих технологіях
	Рівень інвестицій у водневі технології	Загальна сума інвестицій в інфраструктуру водневої економіки
	Економічні переваги використання водню	Вартість виробництва водню на одиницю енергії (грн/кВт·год)
3. Технічна здійсненність	Доступність технологій для масового впровадження	Кількість наявних промислових установок для виробництва водню
	Рівень розвитку технологій зберігання та транспортування водню	Кількість водневих заправних станцій на 1000 км
4. Енергетична безпека	Інтеграція водню в національні енергосистеми	Частка водневих станцій у загальній енергетичній інфраструктурі країни
	Зменшення залежності від традиційних джерел енергії	% зменшення споживання нафти та газу в енергетичному балансі
5. Інновації та наукові дослідження	Підвищення ефективності виробництва водню	Кількість наукових публікацій у галузі водневої енергетики
	Розвиток нових технологій в галузі водневої економіки	Кількість патентів на нові водневі технології
6. Стійкий розвиток	Вплив на екологічні показники і сталий розвиток	Рівень зниження викидів CO ₂ на одиницю ВВП, досягнутий завдяки використанню водню
	Підвищення рівня використання відновлювальних джерел для виробництва водню	Частка водню, виробленого з відновлювальних джерел (%)
7. Міжнародна співпраця	Участь у міжнародних угодах та партнерствах	Кількість міжнародних угод про співпрацю у сфері водневої енергетики
	Спільні інвестиційні проекти з іншими країнами	Загальний обсяг інвестицій від міжнародних партнерів у водневу інфраструктуру

Джерело: систематизовано і побудовано автором

Додаток III

**Динаміка ключових макроекономічних показників у світі за період
2020–2024 років**

Показник	Роки				
	2020	2021	2022	2023	2024 (прогноз)
Світовий ВВП, %	-3,1% (реcesія)	+5,9% (відновлення)	+3,2% (уповільнення)	+2,4%	+2-2,3%
Інфляція, %	2-3% (низька)	4-5% (зростання)	7-10% (пікові значення)	5-7% (стабілізація)	3-4% (зниження)
Безробіття, %	6,5-7% (зростання)	6,0% (часткове відновлення)	5,8% (нерівномірний ринок)	5,5% (стабільність)	5,2% (поліпшення)
Ціни на нафту, \$/барель	40-45\$ (обвал)	65-70\$ (зростання)	90-100\$ (пікові ціни)	75-85\$ (стабілізація)	80-90\$ (очікується)
Ціни на газ у ЄС, \$/1000 м³	150-200\$ (низькі)	500-700\$ (зростання)	2000-3500\$ (криза)	300-500\$ (зниження)	400-600\$ (прогноз)
Державний борг (у% до ВВП)	98%	102%	107%	105%	103%

Джерело: складено автором

Додаток Ш

**Динаміка визначальних чинників світового енергетичного балансу за
2021-2023 роки**

Чинник як рушійна сила (через показник)	Роки		
	2021	2022	2023
Глобальне споживання первинної енергії, ексаджоулів (ЕДж)	608	615	620
Ціна на нафту (середня за рік), \$/барель	70,6	100,6	85
Ціна на природний газ, \$/тис. куб. м	18	50	30
Частка викопного палива в енергоспоживанні, %	81,9	82,4	81,5
Збільшення частки відновлювальних джерел, % від загального виробництва	10,4	11	12
Викиди CO ₂ (глобальні, гігатонни)	36,8	37,2	40 (рекордне значення)
Частка електроенергії у кінцевому енергоспоживанні, %	20,3	20,4	20,6
Енергетична інтенсивність (зниження), %	-1,7	-0,8	-1

Джерело: складено автором на основі [144]

Індекс привабливості ТОП-10 країн для інвестицій у відновлювану енергетику RECAI за 2021-2023 рр.

Країна	RECAI					
	2021		2022		2023	
	Значення	Рейтинг	Значення	Рейтинг	Значення	Рейтинг
США	75,2	1	76,5	1	77,8	1
Китай	73,8	2	74,9	2	76,0	2
Німеччина	70,1	4	71,2	3	72,3	3
Велика Британія	69,5	5	70,4	4	71,2	4
Франція	67,8	6	68,9	5	69,7	5
Іспанія	65,3	8	66,7	6	67,9	6
Японія	64,7	7	65,9	7	67,1	7
Індія	63,5	3	64,8	8	66,0	8
Австралія	62,2	9	63,5	9	64,8	9
Нідерланди	60,9	10	62,1	10	63,4	10

Джерело: побудовано автором на основі [149]

Систематизація інформації про урядові стратегічні ініціативи розвитку водневої економіки в різних країнах світу за 2017-2023 рр.

Країна (рік прийняття стратегій/ ініціатив)	Поширення (статус)	Сегментація (сектори економіки)	Тип інвестування/ фінансування (обсяг)	Цілі/ Пріоритети	Термін реалі- зації
Японія (2017, оновлена у 2023)	Міжнародна Національна	Енергетика, транспорт, промисловість	Державні інвестиції Приватні інвестиції (18,5 млрд дол. США)	Екологічні, енергетична безпека, економічний розвиток	До 2030 року
Австралія (2019)	Міжнародна Національна	Енергетика, транспорт, експорт	Державні інвестиції Приватні інвестиції (2 млрд дол. США)	Екологічні, енергетична безпека, економічний розвиток	До 2030 року
Південна Корея (2019)	Національна	Транспорт, промисловість, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (20 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, енергетична безпека	До 2030 року
Німеччина (2020)	Міжнародна Європейська Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (9 млрд євро)	Екологічні, енергетична безпека, економічний розвиток	До 2030 року
Канада (2020)	Міжнародна Національна	Промисловість, енергетика, транспорт	Державні інвестиції Приватні інвестиції (15 млрд канад.дол.)	Екологічні, енергетична безпека, економічний розвиток	До 2030 року
Франція (2020)	Європейська Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (7 млрд євро)	Екологічні, енергетична безпека, економічний розвиток	До 2030 року
Данія (2020)	Європейська Національна	Виробництво водню, експорт	Державні інвестиції Приватні інвестиції (4 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2030 року
Італія (2020)	Європейська Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (5 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2030 року
Нідерланди (2020)	Європейська Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (9 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2030 року
Норвегія (2020)	Європейська Національна	Виробництво зеленого водню, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (3,6 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, енергетична безпека	До 2030 року
Португалія (2020)	Європейська Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (7 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2030 року
Чилі (2020)	Міжнародна Національна	Виробництво зеленого водню, експорт	Державні інвестиції Міжнародне фінансування (25 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2050 року
Іспанія (2020)	Європейська Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (8,9 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2030 року

Продовження дод. Я

Велика Британія (2021)	Міжнародна Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (12 млрд фунтів)	Екологічні, енергетична безпека, економічний розвиток	До 2030 року
Фінляндія (2021)	Європейська Національна	Промисловість, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (5 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2035 року
Польща (2021)	Європейська Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (4 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, енергетична безпека	До 2030 року
Об'єднані Арабські Емірати (2021)	Національна	Виробництво зеленого водню, експорт	Державні інвестиції Приватні інвестиції (40 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2040 року
Південна Африка (2021)	Міжнародна Національна	Виробництво зеленого водню, експорт	Державні інвестиції Міжнародне фінансування (15 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2035 року
Саудівська Аравія (2021)	Національна	Виробництво зеленого водню, експорт	Державні інвестиції Міжнародне фінансування (50 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, енергетична безпека	До 2040 року
Марокко (2021)	Національна	Виробництво водню, експорт	Державні інвестиції Міжнародне фінансування (10 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2030 року
Австрія (2022)	Європейська Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (5 млрд євро)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2030 року
Китай (2022)	Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (100 млрд дол. США)	Екологічні, енергетична безпека, економічний розвиток	До 2035 року
США (2022)	Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (8 млрд дол. США)	Екологічні, енергетична безпека, економічний розвиток	До 2030 року
Бразилія (2022)	Національна	Виробництво зеленого водню, експорт	Державні інвестиції Міжнародне фінансування (30 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, інфраструктура	До 2040 року
Єгипет (2022)	Національна	Виробництво зеленого водню, експорт	Державні інвестиції Міжнародне фінансування (40 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, енергетична безпека	До 2040 року
Оман (2022)	Національна	Виробництво зеленого водню, експорт	Державні інвестиції Міжнародне фінансування (40 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, енергетична безпека	До 2040 року

Продовження дод. Я

Індія (2023)	Національна	Промисловість, транспорт, енергетика	Державні інвестиції Приватні інвестиції (2,5 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, енергетична безпека	До 2030 року
Туреччина (2023)	Національна	Промисловість, енергетика, транспорт	Державні інвестиції Приватні інвестиції (5 млрд дол. США)	Екологічні, економічний розвиток, енергетична безпека	До 2030 року

Джерело: складено автором

Додаток А1

Кількісний аналіз водневих стратегій та ініціатив, прийнятих урядами різних країн світу за 2017-2023 рр.

Ознака	Кількість стратегій/ініціатив	% від загальної кількості (28 країн)
Рік прийняття:		
2017	1	3,57
2019	2	7,14
2020	10	35,72
2021	7	25,00
2022	6	21,43
2023	2	7,14
Поширення:		
- національна	28	100,00
- європейська	12	42,86
- міжнародна	7	25,00
Сегментація за секторами економіки:		
- енергетика	26	92,86
- транспорт	18	64,29
- промисловість	17	60,71
- виробництво водню	10	35,71
- експорт	10	35,71
Тип інвестування та фінансування:		
- державні інвестиції	28	100,00
- приватні інвестиції	19	67,86
- міжнародне фінансування	7	25,00
Цілі та пріоритети:		
- екологічні	28	100,00
- енергетична безпека	24	85,71
- економічний розвиток	22	78,57
- інфраструктура	15	53,57
Терміни реалізації:		
- до 2030 року	19	67,86
- до 2035 року	3	10,71
- до 2040 року	5	17,86
- до 2050 року	1	3,57

Джерело: сформовано автором за результатами власних досліджень

Стратегічні підходи до визначення пріоритетів водневої економіки

Стратегічний підхід	Основні аспекти
Енергетична безпека та сталий розвиток: - зменшення залежності від викопного палива та зміцнення енергетичної автономії; - впровадження чистих технологій для збереження довкілля та боротьби зі зміною клімату.	<i>Зменшення імпорту енергоресурсів:</i> перехід на водневі технології допомагає знизити залежність від імпорту газу та нафти (актуально для ЄС, Японії, Південної Кореї). <i>Диверсифікація джерел енергії:</i> використання водню поряд з ВДЕ (сонячна, вітрова, гідроенергетика) створює надійну енергетичну систему (Австралія, Канада, Чилі, Норвегія). <i>Акумуляування енергії з ВДЕ:</i> водень виступає засобом зберігання надлишкової електроенергії для забезпечення безперебійного постачання (Данія, Німеччина, Нідерланди). <i>Енергетична автономія:</i> Держави з великими ресурсами ВДЕ прагнуть до незалежного виробництва енергії (Марокко, ОАЕ, Саудівська Аравія, Оман).
Декарбонізація важкої промисловості та транспорту: - важка промисловість та транспорт є одними з найбільших джерел викидів CO ₂ ; - водневі технології відіграють ключову роль у їхній декарбонізації.	<i>Промисловість:</i> Використання водню в металургії (замінник коксівного вугілля), виробництві аміаку та цементу (Німеччина, Франція, Канада, Китай). <i>Транспорт:</i> водневі поїзди (Німеччина, Франція, Японія); вантажний та громадський транспорт (США, Корея, Китай, Великобританія); судноплавство та авіація (Нідерланди, Норвегія, Японія, Франція). <i>Зменшення викидів CO₂:</i> Водень використовується для заміни природного газу в енергетичному секторі (Іспанія, Данія, Фінляндія).
Інфраструктурні інвестиції та розвиток водневих технологій: - розвиток водневої економіки потребує значних інвестицій у виробництво, транспортування та зберігання водню, розвиток інфраструктури	<i>Будівництво водневих трубопроводів:</i> H₂ Backbone – проєкт створення європейської водневої інфраструктури (Нідерланди, Німеччина, Франція); Hydrogen Highway – мережа водневих заправок (США, Японія, Південна Корея). <i>Технології зберігання водню:</i> підземні сховища (Німеччина, США, Австралія); рідкий водень (Японія, Південна Корея). <i>Виробничі потужності:</i> електролізери (Китай, ЄС, США); синій водень із CCUS (Канада, Норвегія, Саудівська Аравія).
Створення ринку водневих технологій та експорту водню: - країни-лідери інвестують у розвиток внутрішнього ринку водню та створюють експортні хаби для міжнародної торгівлі.	<i>Експорт водню:</i> зелений водень – Австралія, Чилі, Марокко, Саудівська Аравія; синій водень – Канада, Норвегія, ОАЕ. <i>Розвиток внутрішнього ринку</i> (Китай, Японія, США, Південна Корея). <i>Інвестиції у водневу економіку</i> (ЄС, Великобританія, Франція, Німеччина).
Кліматичні цілі та екологічні аспекти: - багато країн інтегрують водневі технології у свої стратегії щодо досягнення вуглецевої нейтральності.	<i>Зменшення викидів CO₂:</i> відмова від викопного палива (ЄС, США, Японія). <i>Підтримка зелених технологій:</i> субсидії та податкові пільги на виробництво водню (Канада, Австралія, Німеччина). <i>Національні водневі стратегії:</i> Fitfor 55 – ЄС; Hydrogen Energy Roadmap – Японія, Південна Корея; Clean Hydrogen Future – США.
Державна підтримка та інвестиції в НДДКР: - дослідження та розробки є критично важливими для розвитку водневих технологій.	<i>Фінансування НДДКР:</i> Європейська воднева ініціатива (IPCEI Hydrogen) – фінансування технологій у ЄС; Hydrogen Shot (США) – програма зниження вартості водню; Moonshot R&D (Японія) – підтримка проривних водневих технологій. <i>Підтримка стартапів та інновацій</i> (Канада, Франція, Великобританія).
Міжнародне співробітництво та угоди: - міжнародні партнерства допомагають країнам ефективніше розвивати водневу економіку.	<i>ЄС та Африка:</i> Партнерства щодо імпорту водню (Марокко, Єгипет). <i>ЄС та Австралія:</i> Створення експортних хабів. <i>США та Канада:</i> Спільні проєкти у сфері синього водню. <i>Японія та Близький Схід:</i> Інвестиції у виробництво та транспортування рідкого водню. <i>Південна Корея та Німеччина:</i> Спільне розроблення водневих паливних елементів.

Джерело: сформовано автором за результатами власних досліджень

Додаток В1

**Порівняльний аналіз стратегем та критеріїв розбудови водневої економіки
в Україні та інших країнах світу за 2021-2023 роки**

Країна	Стратегема	Інвестиції (млрд. USD)	Виробництво водню (тис. т на рік)	Використання водню	Технологічні досягнення
Україна	Національна стратегія до 2035 року	0,5	30	Переважно в промисловості (металургія, хімічна промисловість)	Впровадження технологій водневих паливних елементів
Німеччина	Воднева стратегія 2020 року. План розвитку до 2030 року	9,0	2000	Транспорт, енергетика, промисловість	Впровадження водневих заправних станцій, розробка зеленого водню
Японія	Стратегія водневої економіки з акцентом на транспорт та енергетику	10,0	1200	Транспорт (водневі автомобілі, автобуси), енергетика (водневі ТЕЦ)	Розробка водневих паливних елементів, запуск великих проектів водневої енергетики
США	Включена в стратегію зменшення викидів парникових газів	12,0	1800	Транспорт, промисловість, зберігання енергії	Активна розробка технологій водневих паливних елементів для автомобілів і вантажівок
Китай	План розвитку водневої економіки з акцентом на декарбонізацію	17,0	2500	Промисловість, транспорт (водневі автобуси, вантажівки)	Масове виробництво водню, створення великої кількості заправних станцій
Франція	Воднева стратегія з акцентом на енергетичний перехід та транспорт	7,0	1000	Транспорт, енергетика	Розробка та впровадження водневих паливних елементів для громадського транспорту
Австралія	Стратегія розвитку водневої економіки до 2030 року	3,0	800	Енергетика, транспорт (водневі поїзди)	Впровадження інфраструктури для виробництва та експорту зеленого водню
Південна Корея	Стратегія розвитку до 2040 року, план виробництва 6 млн. т водню	11,0	1500	Транспорт, енергетика, промисловість	Розробка водневих паливних елементів, запуск водневих електростанцій

Джерело: побудовано автором на основі [174]

Стратегічні пріоритети розвитку водневої економіки країн світу

Країна	Стратегічні пріоритети	Цілі	Термін реалізації
Україна	1. Розробка національної стратегії розвитку водневої економіки. 2. Створення інфраструктури для виробництва та транспортування водню.	1. Зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв. 2. Інтеграція в європейську водневу економіку.	2021-2035
Німеччина	1. Впровадження водневих паливних елементів у транспорт. 2. Підтримка проектів з виробництва зеленого водню. 3. Створення водневої інфраструктури.	1. Скорочення викидів CO ₂ на 80% до 2050 року. 2. Збільшення частки зеленого водню у енергетичному секторі до 2030 року.	2020-2050
Японія	1. Розробка водневих паливних елементів для автомобілів і громадського транспорту. 2. Запуск водневих ТЕЦ.	1. Скорочення залежності від викопного палива. 2. Перехід на використання водню в транспортному секторі до 2030 року.	2017-2030
США	1. Підтримка досліджень і розробок у сфері водневих технологій. 2. Стимулювання інвестицій у водневу інфраструктуру.	1. Зменшення викидів CO ₂ на 50% до 2030 року. 2. Створення водневих хабів по всій країні.	2021-2035
Китай	1. Розширення виробництва та споживання водню в промисловості. 2. Створення мережі водневих заправок. 3. Інтеграція водню в енергосистему.	1. Скорочення викидів парникових газів на 60% до 2035 року. 2. Масове впровадження водневих транспортних засобів.	2020-2040
Франція	1. Стимулювання виробництва зеленого водню. 2. Розвиток водневого транспорту. 3. Підтримка водневих проектів на рівні ЄС.	1. Зниження викидів CO ₂ на 70% до 2050 року. 2. Використання водню як ключового джерела енергії.	2021-2050
Австралія	1. Інвестиції в інфраструктуру для виробництва зеленого водню. 2. Розвиток експорту водню до країн Азії та Європи.	1. Досягнення статусу одного з найбільших експортерів зеленого водню до 2030 року. 2. Створення нових робочих місць.	2020-2030
Південна Корея	1. Впровадження водневих електростанцій. 2. Розробка водневих транспортних засобів. 3. Підтримка досліджень у сфері водню.	1. Створення 200 тисяч робочих місць у водневій галузі до 2040 року. 2. Досягнення вуглецевої нейтральності до 2050 року.	2019-2040

Джерело: сформовано автором за результатами власних досліджень

Потенціал регіонів України у розвитку водневої економіки

Регіон України	Тип водню	Основні джерела енергії / ресурси	Інфраструктурні переваги	Перспективи експорту / інтеграції
Південь (Одеська, Миколаївська, Херсонська)	Зелений	Сонячна енергія (до 1600 кВт·год/м²/рік), вітер	Морські порти, розвинута енергомережа, логістика	Морський експорт (човни, порти), зв'язки з ЄС
Південний Схід (Запорізька, Дніпропетровська, Донецька)	Зелений, Синій	Вітер, природний газ, CO ₂ для CCS	Газотранспортна система, промислові кластери	Потенціал трубопровідного експорту до ЄС
Центральна Україна (Кіровоградська, Черкаська)	Зелений, Біоводень	Біомаса, сонячна енергія (1350–1400 кВт·год/м²/рік)	Агросектор, середній рівень ВДЕ	Локальне використання, експорт до центр. Європи
Західна Україна (Львівська, Івано-Франківська)	Зелений, Бірюзовий	Гідроенергія, доступ до газових родовищ, біомаса	Транскордонна інфраструктура, наукові центри	Напрямок Словаччина, Польща, участь у європейських ініціативах
Північна Україна (Сумська, Чернігівська)	Синій, Зелений	Природний газ, біомаса, можливість для підземного зберігання	Залишки нафтогазової інфраструктури, доступ до транзитної ГТС	Сховища водню, транзитний потенціал

Джерело: розроблено та побудовано автором на основі [204-208].

Додаток Е1

Регіональна оцінка технологічної готовності до виробництва водню в Україні.

№	Регіон	Промисловий потенціал	Ключові підприємства / галузі	Наявність ВДЕ/ресурсів	Потенціал виробництва H ₂	Пріоритетні сценарії трансформації до 2050 р.
1	Дніпропетровська обл.	Металургія, машинобудування	«Інтерпайп», «ДніпроАзот»	Помірні (сонце, газ)	Високий	Перехід до H ₂ -доменного циклу, створення індустріального хабу
2	Запорізька обл.	Енергетика, кольорова металургія	ЗАЕС, «Запоріжсталь», «Мотор Січ»	Високі	Високий	Пілотні проєкти електролізу на базі ЗАЕС, H ₂ для промисловості
3	Одеська обл.	Транспорт, нафтогаз, аграрний сектор	Портова інфраструктура, ПАТ «ОПЗ»	Високі (сонце, вітер)	Середній	Водень для експорту, H ₂ -хімія (аміак), H ₂ -термінали
4	Львівська обл.	Легка промисловість, логістика	Технопарки, логістичні хаби	Помірні	Середній	R&D-центри, освітні програми, інтеграція в європейську мережу
5	Кіровоградська обл.	Сільське господарство, біоенергетика	Агрокластери, біогазові комплекси	Високі (сонце, біомаса)	Середній	Виробництво H ₂ з біомаси, створення H ₂ -агроіндустріального кластеру
6	Харківська обл.	Наука, ВПК, хімія	НТК «ІМЗ», ХФТІ оборонні підприємства	Середні	Високий	Розробка нових H ₂ -технологій, пілотні проєкти в оборонно-космічній сфері

Джерело: сформовано автором за результатами власних досліджень

Додаток Ж1

**Порівняння систем зберігання водню в Україні та ЄС за технічними,
економічними й екологічними параметрами**

Тип зберігання	Параметри	Україна	ЄС
Стиснений водень (700 бар)	Технічні	Обмежена кількість високотискових балонів	Стандартизовано в транспорті (HRS), розвинена інфраструктура
	Економічні	\$3–5/кг зберігання; 12–15% енерговтрат на стиснення	\$2.5–4/кг; частково субсидується в рамках H2Global та IPCEI
	Екологічні	Вуглецевий слід залежить від джерела енергії; при ВДЕ – низький	Залежить від країни: Франція – ВДЕ; Німеччина – частково з газу
Зріджений водень (-253 °C)	Технічні	Дуже обмежені можливості. Високі втрати при скрапленні	Широко використовується в аерокосмічній сфері; зростає роль у портах
	Економічні	~\$6/кг, до 30% енергії на скраплення	\$4–6/кг; використовуються високоефективні теплообмінники
	Екологічні	Високий вуглецевий слід за рахунок енерговитрат	Скорочення сліду за рахунок зелених джерел електроенергії
Підземне зберігання	Технічні	Доступні геологічні структури (соляні каверни на сході)	Активно використовується у Німеччині, Нідерландах (H2Store)
	Економічні	Вартість капіталу висока, але низька ціна за 1 кг/міс (~\$1)	Більша ефективність на великих обсягах; підтримка в рамках TEN-E
	Екологічні	Практично нульовий вплив, за умов безпеки	Мінімальний вплив; сертифікація з боку EU ETS
Метал-гідридні системи	Технічні	Експериментальні лабораторії. Залежність від імпорту сплавів	Впровадження в транспорті (військові та малі системи) [18, р. 31]
	Економічні	\$8–10/кг; висока вартість матеріалів [8, с. 149]	\$6–8/кг; застосовуються в автономних системах [18, р. 32]
	Екологічні	Відсутність токсичних викидів, повна безпечність	Висока екологічна оцінка; проблеми з утилізацією старих систем [18, р. 34]
LOHC (рідкі органічні носії)	Технічні	Низька практична реалізація; потребує високотемпературної регенерації [9, с. 82]	Використовується для імпорту H ₂ (напр., Німеччина–Японія) [19, р. 40]
	Економічні	\$5–7/кг; середня ефективність; дорогі каталізатори [9, с. 82]	\$4–6/кг, залежно від обсягів і наявності установок [19, р. 41]
	Екологічні	Потрібне енергетичне джерело для десорбції; частково ВДЕ	Досить екологічно чисто за умови ВДЕ-регенерації [20, р. 13]

Джерело: сформовано автором за результатами власних досліджень

Додаток З1

Технічна придатність ділянок української ГТС до транспортування водню та орієнтовні витрати на адаптацію

Регіон/ Ділянка ГТС	Матеріал трубопров оду	Стан знос (% від ресурс у)	Придатність до транспортува ння Н ₂ (у суміші до 20%)	Придатність до транспортув ання 100% Н ₂	Необхідні заходи для адаптації	Орієнтовна вартість адаптації (млн євро/100 км)
Західна Україна (Волинь, Львів)	Сталь 17Г1С, 20, сучасна	45– 55%	Висока	Середня	Моніторинг на водневу крихкість, модернізація компресорів	1,2–1,6
Центральн а Україна (Київ, Полтава)	Сталь 17Г1С, 10ХСНД	60– 70%	Середня	Низька	Часткова заміна ділянок, нові облікові системи	1,8–2,2
Східна Україна (Харків, Дніпро)	Сталь 20, зношена	75– 85%	Низька	Дуже низька	Повна заміна трубопроводу та обладнання	3,5–4,0
Південна Україна (Одеса, Миколаїв)	Сталь 17Г1С, 10Г2СФ	50– 60%	Висока	Середня	Удосконаленн я обліку, заміна ущільнень	1,4–1,7
Північна Україна (Чернігів, Суми)	Сталь 20, стара	65– 75%	Середня	Низька	Діагностика, локальні ремонти	2,0–2,5
Придатність до транспортування Н ₂ (у суміші до 20%) – оцінюється можливість використання існуючої інфраструктури без значних змін, за сценарієм короткострокової адаптації.						
Придатність до транспортування 100% Н ₂ – враховується перспективний сценарій повного переходу на водень до 2050 р.						
Орієнтовна вартість адаптації – надана як середній діапазон витрат на 100 км мережі відповідно до оцінок проєктів Hydrogen Europe Ukraine і УІГ.						

Джерело: розроблено та побудовано автором

Додаток ІІ

**Ключові техніко-економічні та регуляторні вимоги до стандартизації
водневої інфраструктури та пов'язані виклики**

Параметр	Технічні вимоги	Економічні аспекти	Регуляторні вимоги	Виклики
Стандарти для обладнання	Визначення специфікацій для компресорів, трубопроводів, резервуарів	Вартість розробки стандартів та їх впровадження	Відсутність єдиних стандартів на міжнародному рівні	Витрати на перехід від традиційних до водневих технологій
Безпека	Сертифікація обладнання за рівнями безпеки (наприклад, TUV, ISO)	Вартість адаптації до нових вимог безпеки	Встановлення чітких норм для зберігання та транспортування водню	Необхідність забезпечення високих стандартів безпеки
Інтероперабельність	Розробка стандартів для сумісності різних водневих технологій	Залучення інвестицій у розробку сумісних систем	Визначення норм для сумісності водню в існуючих енергосистемах	Нестабільність технологій та змінність стандартів
Сертифікація продуктів	Перевірка відповідності до міжнародних сертифікаційних норм (наприклад, ISO 9001)	Затрати на проведення сертифікаційних випробувань	Відсутність стандартів для водневих технологій на національному рівні	Складність гармонізації національних і міжнародних сертифікацій
Екологічні вимоги	Визначення викидів, енергоефективності в процесі виробництва водню	Оцінка вартості екологічної сертифікації та контролю за викидами	Встановлення стандартів для зменшення екологічного впливу	Залучення громадських і політичних сил для підтримки екологічної сертифікації

Джерело: розроблено та побудовано автором

**Форсайт-аналіз викликів інтеграції енергосистеми України до
водневої та європейської енергетичної архітектури**

№	Сфера виклику	Зміст проблеми / бар'єру	Форсайт-аспекти
1	Технічна сумісність	Відмінності у параметрах частоти, напруги, стандартів диспетчеризації між ОЕС України та ENTSO-E.	Потреба у прогнозуванні адаптацій інфраструктури до євростандартів.
2	Резервування та акумуляція	Відсутність маневрових потужностей та систем зберігання енергії для балансування нестабільної генерації з ВДЕ.	Необхідність сценаріїв впровадження power-to-gas та водневих резервів.
3	Цифровізація управління	Відставання в розвитку smart-grid технологій, відсутність автоматизації та цифрових протоколів.	Потреба у впровадженні розумних мереж для гнучкого реагування на змінні навантаження.
4	Законодавча адаптація	Відсутність гармонізації нормативно-правової бази з європейськими енергетичними та водневими стандартами.	Форсайт правового середовища та моделювання сценаріїв регуляторних змін.
5	Геополітична вразливість	Ризики кіберзагроз, атак на критичну інфраструктуру, дезінтеграції в умовах війни.	Сценарне планування ризиків, створення децентралізованих водневих кластерів.
6	Перспективи адаптації	Необхідність впровадження енергетичного форсайту, резервних систем на базі водню, цифрових технологій, міжнародної кооперації.	Комплексне бачення трансформації ОЕС України до 2035 р. на основі сценаріїв «зеленої» інтеграції з ЄС.

Джерело: розроблено та побудовано автором

**Потенціал використання водню в енергоємних галузях
промисловості та перспективи декарбонізації**

Промисловість	Основні напрямки використання водню	Потенціал декарбонізації	Технічні вимоги	Перешкоди	Перспективи
Металургія	Водневе відновлення заліза замість вуглецю у доменних печах, водень для виробництва сталі	Від 30% до 100% зниження викидів CO ₂ в залежності від технології	Високі температури для водневих печей, великий обсяг водню для заміни коксу	Висока вартість водню, необхідність розробки нових технологій для інтеграції водню в процеси	Високий потенціал для зниження викидів, нові можливості для екологічного сталевих виробництва
Цементна промисловість	Використання водню в процесах нагріву печей для випалювання цементу, водневе паливо	Зниження викидів CO ₂ на 20-40% при переході на водень у процесі спалювання	Інтеграція водню в існуючі технології спалювання, збереження температурних характеристик	Високі початкові інвестиції, складнощі з ефективною поставкою водню на місця виробництва	Потенціал для значного зниження викидів, включення водню у «зелені» сертифікати цементної продукції

Джерело: розроблено та побудовано автором

Додаток М1

Форсайтна оцінка стану та перспектив розвитку наукових досліджень і інновацій у сфері водневої енергетики в Україні

Компонент оцінки	Стан в Україні	Форсайтна інтерпретація
Ключові наукові установи	Близько 15 інституцій, зокрема ІВЕ НАНУ, Інститут газу, ІЕ ім. Патона, КПІ, ХНУРЕ тощо	Потреба у створенні міжінституційних кластерів та науково-промислових консорціумів
Тематика досліджень	Електроліз, паливні елементи, зберігання водню, синтез палив	Необхідність узгодження досліджень з глобальними технологічними дорожніми картами
Обсяги фінансування	Низький рівень, епізодична підтримка з боку держави	Потреба в довгостроковому бюджетуванні через цільові програми (форсайтно орієнтоване планування)
Комерціалізація розробок	Слабкий зв'язок науки й промисловості, низька трансферність технологій	Створення інноваційних хабів, платформ для трансферу технологій
Міжнародна інтеграція	Низька участь у Horizon Europe, Clean Hydrogen Partnership	Розробка програми міжнародної наукової кооперації на водневу тематику
Прогностична та сценарна діяльність	Обмежене використання сценарного моделювання та foresight-досліджень	Впровадження форсайт-платформ у науково-технічну політику
Політика і регулювання НДДКР	Відсутність специфічної політики щодо розвитку водневої науки	Необхідність створення окремої частини у стратегії НДДКР для водневої енергетики

Джерело: розроблено та побудовано автором

Додаток Н1

Ключові виклики національного розвитку України та можливі форсайтні стратегії реагування

№	Категорія	Опис викликів	Можливі стратегічні відповіді
1	Глобальні трансформації	Кліматичні ризики: екстремальні погодні явища, зростання температур, вплив на аграрний сектор та енергетику. Технологічні зрушення: ШІ, блокчейн, IoT — потреба в нових навичках. Геополітичні переформатування: нові альянси, торговельні обмеження.	- Розробка стратегії кліматичної адаптації та підтримка "зеленого" переходу. - Інвестиції в освіту та перекваліфікацію кадрів у сфері нових технологій. - Диверсифікація міжнародних торговельних партнерів.
2	Військовий конфлікт	Агресія РФ: руйнування інфраструктури, внутрішня міграція, криза довіри. Відновлення: потреба відновити економічні та соціальні зв'язки.	- Програми реконструкції інфраструктури з фокусом на стійкість. - Створення стимулів для повернення внутрішньо переміщених осіб. - Зміцнення інституційної спроможності та прозорості управління.
3	Структурні дисбаланси	Енергетична залежність: потреба у відновлюваній енергетиці. Регуляторна складність: корупція, неефективність. Соціально-демографічні зміни: старіння, міграція, нерівність.	- Підтримка децентралізованих ВДЕ-проектів (сонячна, вітрова енергія). - Реформа державного управління і боротьба з корупцією. - Програми демографічного розвитку, підтримка молоді, доступ до якісної освіти та медицини.

Таблиця створена автором

**Аксіологічний вимір форсайту: роль цінностей у стратегічному
плануванні та державній політиці**

№	Категорія	Зміст / Приклади
1	Поняття і роль аксіологічного ядра	- Цінності як основа стратегічного мислення. - Форсайт як механізм закріплення цінностей у стратегіях. - Аксіологія як «економічний компас».
2	Ключові цінності форсайту	Сталий розвиток – баланс економіки, соціуму й екології. Соціальна справедливість – інклюзія, рівність доступу. Технологічна інноваційність – розвиток R&D, національних технологій. Цифровізація та відкритість – прозорість, відкриті дані, е-платформи.
3	Механізми реалізації цінностей	Ціннісні воркшопи – колективна генерація цінностей. Стейкхолдерна картографія – узгодження цінностей груп інтересів. Візіонерські сценарії – сценарії майбутнього на основі ціннісної перспективи.
4	Протидія короткостроковості	Баланс КРІ – поєднання стратегічних і оперативних цілей. Інституційні гарантії – нормативне закріплення цінностей. Ціннісні «рев'ю» – регулярне оновлення стратегічного базису.
5	Приклади впровадження в Україні	Воднева стратегія-2050 – цінності енергонезалежності та екологічності. Цифрова платформа КІП – прозорість і громадський контроль у форсайті.

Таблиця створена автором

**Аналітичні напрямки та методи форсайту для стратегічного
прогнозування соціо-економічного розвитку**

Напрямок аналітики/Метод	Зміст
Макроекономічний аналіз	Аналіз динаміки ВВП, інвестицій, торгівлі, зайнятості, а також структури економіки в контексті глобальних змін
Техно-економічний моніторинг	Оцінка розвитку ключових технологій, інноваційних кластерів, наукових відкриттів та патентної активності, зокрема у сферах енергетики, ІТ, Н ₂
Глобальні мегатренди	Відстеження геополітичних, кліматичних, демографічних та соціальних трендів, що формують контекст розвитку країни
Оцінка ризиків та нестабільностей	Виявлення потенційних точок напруги (економічних, екологічних, соціальних), які можуть спричинити кризи або прискорене переформатування систем
Соціокультурна аналітика	Вивчення ціннісних орієнтацій населення, очікувань, страхів і сприйняття майбутнього, що впливають на стратегічні рішення
Аналіз сценаріїв (Scenario Analysis)	Побудова альтернативних сценаріїв розвитку на основі факторного впливу
Метод Дельфі (Delphi method)	Експертна оцінка ймовірних подій і тенденцій
Аналіз патентної та наукової активності (foresight intelligence mapping)	Картографування науково-технологічного ландшафту шляхом аналізу патентної та наукової активності
Big Data та штучний інтелект (AI)	Використання інструментів машинного навчання для обробки великих масивів даних, зокрема з відкритих джерел (OSINT)

Таблиця створена автором

Матриця сценаріїв

	Висока технологічна автономія	Низька технологічна автономія
Висока міжнародна інтеграція	Сценарій 1: “Воднева кооперація” – Україна стає частиною спільного водневого ринку ЄС. – Розвиває власні технології та експортну інфраструктуру. – Доступ до "зелених" інвестицій і техстандартів. – Високий попит на український водень.	Сценарій 2: “Сировинна периферія” – Україна інтегрована в ринок ЄС, але залишається постачальником сировини (H₂ без глибокої переробки). – Ключові технології імпорتنі. – Залежність від політики ЄС та інвесторів.
Низька міжнародна інтеграція	Сценарій 3: “Автономний прорив” – Україна фокусується на внутрішньому ринку та власних розробках. – Розвиток через військово-промислову та енергетичну конверсію. – Висока науково-інноваційна активність. – Можливий вихід на нові ринки Азії або MENA.	Сценарій 4: “Ізоляційна стагнація” – Низький рівень інтеграції, залежність від імпортних технологій. – Воднева економіка маргіналізована. – Ризик стратегічної відсталості. – Розвиток фрагментарний та хаотичний.

Джерело: складено автором на основі [442, 443].

Додаток Т1

**Приклади застосування форсайт-інструментів у стратегічному
плануванні державної політики в Україні**

Сфера	Приклад	Інструменти форсайту	Опис застосування
Енергетика	Воднева стратегія України до 2050 року	Сценарне моделювання, дорожні карти	Аналіз альтернативних сценаріїв розвитку водневої економіки, SWOT-аналіз, визначення етапів реалізації.
Освіта	Нова українська школа (НУШ)	Горизонтальне сканування, Delphi	Визначення навичок майбутнього, створення моделі компетентностей, консультації з експертами й громадськістю.
	Цифрова платформа на базі КІП ім. І. Сікорського	Поеднання форсайту з цифровими twins	Тестування енергетичних рішень у віртуальному середовищі.
Регіональна політика	Стратегії розвитку громад 2021–2027	Індикативне моделювання, стратегічні карти	Планування майбутнього розвитку ОТГ на основі демографічних і економічних прогнозів, карта стейкхолдерів.
Технології / е-урядування	Цифрова трансформація (Мінцифра)	Горизонтальне сканування, стратегічні карти	Виявлення глобальних цифрових трендів, планування послуг «Дії», інтеграція цифрової ідентичності, державної хмари.
Безпека й оборона	Центр безпекових досліджень, аналітика для РНБО	Сценарне моделювання, Delphi	Моделювання гібридних загроз, стратегія кібербезпеки, залучення експертного середовища до формування сценаріїв розвитку подій.

Таблиця створена автором

Додаток У1

Ключові методи форсайт-аналізу для стратегічного планування у сфері водневої енергетики

№	Метод	Опис
1	Експертні опитування (метод Delphi)	Цей метод передбачає систематичне збирання думок та прогнозів експертів у різних галузях для формування колективного уявлення про майбутнє. У результаті можна отримати більш збалансовані й точні оцінки сценаріїв розвитку.
2	Аналіз трендів	Оцінка нинішніх тенденцій і «слабких сигналів» дає змогу передбачити вплив змін у технологіях, економіці, екології та соціумі. Це допомагає виявити ключові напрямки для стратегічного розвитку.
3	Сценарне моделювання	Створення варіативних сценаріїв розвитку дозволяє розробляти адаптивні стратегії з урахуванням невизначеностей і майбутніх подій.
4	Стратегічні карти	Візуалізація напрямів і зв'язків у стратегічному плануванні, що допомагає визначити пріоритети та оцінити ефективність реалізації стратегій.

Таблиця створена автором [361-363]

Додаток Ф1

Основні методи форсайту в стратегічному прогнозуванні

№	Методологічний інструмент	Короткий опис
1	Горизонтальне сканування	Виявлення нових трендів і загроз на різних рівнях
2	Делфійські опитування	Анонімне опитування експертів для досягнення консенсусу
3	Сценарне моделювання	Побудова 3–5 сценаріїв з урахуванням невизначеностей
4	Стратегічні карти та дорожні карти	Візуалізація пріоритетів і зв'язків між стейкхолдерами
5	Індикативне моделювання	Моніторинг і коригування стратегій на основі індикаторів

Таблиця створена автором [365, 366].

Додаток Х1

Форми залучення стейкхолдерів у форсайт-процеси стратегічного планування

Форма	Опис
Форсайт-форуми	Широкі стратегічні зібрання за участю національних і регіональних стейкхолдерів для обговорення викликів і можливостей майбутнього
Експертні панелі та фокус-групи	Майданчики для глибокого аналізу окремих аспектів майбутнього розвитку (наприклад, воднева енергетика, цифровізація, трудовий ринок)
Сценарні сесії	Інтерактивні заходи зі спільного створення сценаріїв майбутнього за участю представників бізнесу, науки, держави та громад
Громадські консультації	Цифрові платформи для участі громадськості в обговоренні стратегій та верифікації ідей, що підвищує соціальну довіру й резонанс

Таблиця створена автором [422 - 425].

Додаток Ц1

Покращення дорожніх карт у форсайт-політиці

№	Ключова дія	Рекомендація
1	Спільні програми уряду, бізнесу та науки	Інституалізація міжвідомчих програм
2	Публічний онлайн-моніторинг реалізації	Розвиток цифрової платформи
3	Форсайт-методи в картографуванні	Використання Delphi, SWOT, PESTEL
4	Регулярна ревізія карт кожні 2–3 роки	Актуалізація з урахуванням змін

Таблиця створена автором [444 - 450]

Додаток Ш1

Індикатори людського капіталу

№	Індикатори	Призначення
1	Human Capital Index (Світовий банк)	Рівень освіти, здоров'я, очікувана тривалість
2	Global Talent Index (INSEAD)	Потенціал до залучення / утримання талантів
3	Education Index (UNDP)	Рівень освіченості населення
4	Skills for Jobs (OECD)	Відповідність навичок ринку праці

Таблиця створена автором [457; 458]

Додаток Щ1

Таблиця Щ1.3.10 – Індикатори інституційної спроможності

№	Індикатори	Призначення
1	Індекс ефективності урядування (WGI)	Управління, регулювання, верховенство права
2	Індекс сприйняття корупції (Transparency Int.)	Довіра до публічних інституцій
3	Індекс верховенства права (World Justice)	Незалежність суду, дотримання законів
4	Індекс державної спроможності (BTI)	Ефективність, легітимність, інклюзивність

Таблиця створена автором [461]

Додаток Ю1

Інструменти партнерства у сфері водневої енергетики

Напрямок	Опис
Меморандуми та угоди	Формалізація співпраці між урядом, бізнесом і наукою у сфері водневої енергетики.
Юридична значимість	Забезпечення правової стабільності та довіри для залучення інвесторів.
Держава та бізнес	Синергія публічного і приватного секторів через спільні угоди.
Міжнародне партнерство	Інтеграція до глобального водневого ринку, обмін технологіями.
Моніторинг ефективності	Оцінка виконання зобов'язань та результативності через відповідні механізми..

Таблиця створена автором [540 - 544]

Додаток Я1

Нормативно-правові засади розвитку водневої економіки України

Напрямок	Опис
Нормативно-правова база	Забезпечення стабільності водневої економіки через законодавчу підтримку інвестицій і партнерств.
Міжнародна інтеграція	Узгодження законодавства з міжнародними кліматичними та енергетичними угодами.
Інвестиційна підтримка	Пільги, спрощені процедури та фінансові стимули для водневих проєктів.
Регулювання інфраструктури	Встановлення стандартів безпеки, ефективності та екологічності для водневих технологій.
Актуалізація законодавства	Оновлення нормативної бази відповідно до технологічного прогресу та ринкових змін.

Таблиця створена автором [545 - 548]

Додаток А2

Ризики впровадження водневої енергетики та міжнародні підходи до їх страхування

Тип ризику	Опис ризику	Механізм страхування	Міжнародний досвід
Технологічний	Неефективність або недоступність нових технологій	Покриття втрат від технологічних збоїв	Німеччина: страхування в проєктах ВДЕ
Регуляторний	Зміни в законодавстві, що впливають на рентабельність	Захист від правових змін	США: поліси для енергетичних проєктів
Фінансовий	Валютні коливання, нестача фінансування	Компенсація валютних / кредитних втрат	ЄС: покриття валютних ризиків
Корупційний	Бюрократичні перешкоди, несанкціоновані дії	Захист від затримок і витрат, спричинених корупцією	ЄС: спеціальні страхові програми
Військовий	Пошкодження об'єктів через бойові дії	Страхування втрат від воєнних ризиків	США: поліси для зон конфлікту
Політичний	Нестабільність, націоналізація, зміна уряду	Компенсація інвестзбитків від політичних змін	МФІ: програми для країн, що розвиваються

Джерело: створена автором [555 - 562]

Додаток Б2

ESG-компоненти у контексті водневої енергетики України

Компонент	Ключові напрями	Виклики	Рекомендовані дії
Е (Екологія)	Зелений водень, CO ₂ -нейтральність, збереження ресурсів	Відсутність стандартів, слабка експертиза	Гармонізація з ЄС, нацстандарты, розвиток «зелених» кластерів
S (Соціум)	Зайнятість, діалог з громадами, безпека праці	Війна, недовіра, соціальна нерівність	Just Transition, соціальні фонди, цифрова участь громад
G (Управління)	Прозорість, антикорупція, ESG-звітність	Корупція, слабка культура управління	Цифровий комплаєнс, навчання, моніторинг через публічні платформи

Джерело: створена автором [569 - 571]

Додаток В2

Ключові компоненти реєстру водневих ініціатив

Компонент	Зміст	Виклики	Рішення
Типи даних	Інформація про проєкти, партнерів, фінансування, статус	Фрагментарність, відсутність стандарту	Нацстандарт метаданих
Функції реєстру	Моніторинг, аналітика, інвестпрозорість, контроль	Відсутність автоматизації	Інтеграція з eData, «Дією»
Цільові користувачі	Держава, інвестори, наука, громадськість, партнери	Обмежений доступ, недовіра	API-доступ, відкриті дашборди
Орган управління	Нацофіс або Держенергоефективності	Немає уповноваженого органу	Затвердження порядку адміністрування
Безпека даних	Верифікація, аудит, захист від фальсифікацій	Корупція, людський чинник	Цифровий комплаєнс, блокчейн
Правова база	Законодавче регулювання та підзаконні акти	Прогалини в законодавстві	Прийняття спеціального закону

Джерело: створена автором [578 - 583]

Додаток Г2

Пріоритетні напрями наукових досліджень у сфері водневої енергетики в Україні

Ціль	Зміст
Розвиток фундаментальних досліджень	Створення нових каталізаторів, електролітів, фотокаталітичних систем
Прикладні дослідження	Оптимізація процесів електролізу, зберігання та транспортування H ₂
Інтеграція з виробництвом	Створення прототипів водневих установок, пілотні водневі хаби
Дослідження впливу на довкілля	Аналіз життєвого циклу водневих технологій, LCA-методології
Інституційна координація	Взаємодія між НАН України, МОН, бізнесом, регіональними хабами

Джерело: створена автором [595]

Додаток Д2

Етапи організації НД проєктів у сфері водневої енергетики в Україні

Етап	Зміст	Учасники	Результати
Ініціювання партнерств	Вибір тем, формування консорціумів	МОН, НАН, університети	Меморандуми, дорожні карти
Формування проєктів	Розробка програм, вибір фокусів	Університети, бізнес	Заявки до Horizon Europe, Clean Hydrogen Partnership
Фінансування	Пошук коштів, бюджетування	Мінфін, EIB, EBRD	Гранти, проєктні бюджети
Реалізація досліджень	Теоретичні й прикладні дослідження	НДІ, лабораторії, технопарки	Прототипи, публікації
Інтеграція результатів	Впровадження у виробництво, стандартизація	Промисловість, уряд	Стартапи, техрішення, регуляторні ініціативи
Моніторинг і масштабування	Оцінка, адаптація, розширення	МОН, Нацфонд, експерти	Звіти, масштабовані платформи

Джерело: створена автором [596 - 600]

Додаток Е2

Ключові компоненти системи моніторингу водневих проєктів в Україні

Компонент	Зміст та функція
Цілі моніторингу	Визначення ступеня досягнення цілей проєкту, відповідності кліматичним, енергетичним та соціальним цілям
Індикатори ефективності (KPI)	Технічні (ефективність електролізу), економічні (ROI, IRR), екологічні (зменшення CO ₂), соціальні (кількість робочих місць, локалізація)
Інституційна структура	Формування незалежних координуючих груп або наглядових рад із представників влади, науки, бізнесу, громадськості
Регламент звітності	Періодичність (щоквартально, щорічно), форма подачі (реєстри, платформи відкритих даних)
Аудит і коригування	Впровадження зовнішнього технічного аудиту та механізмів гнучкої адаптації проєктів до нових обставин

Джерело: створена автором [602; 603]

Додаток Ж2

**Компоненти освітніх програм у сфері водневої енергетики:
міждисциплінарний підхід**

Компонент освітніх програм	Зміст та функція
Технічні дисципліни	Основи водневої енергетики, виробництво водню, зберігання та транспортування, екологічні аспекти використання водню
Економічні дисципліни	Фінансування водневих проєктів, бізнес-моделі, стратегії комерціалізації водневих технологій
Управлінські дисципліни	Проектний менеджмент, регуляторні вимоги, державне управління в галузі енергетики
Соціальні та екологічні аспекти	Взаємодія з громадськістю, зміни в соціальній структурі, моніторинг та оцінка впливу на довкілля
Міжуніверситетські та науково-дослідні партнерства	Залучення наукових установ до освітнього процесу, створення лабораторій для практичних робіт

Джерело: створена автором [608]

Додаток 32

**Напрями адаптації механізмів партнерства для відновлення водневої
економіки України**

Компонент адаптації механізмів партнерства	Зміст та функція
Гнучкість механізмів фінансування	Залучення міжнародних грантів, публічно-приватні партнерства, адаптація фінансування до кризових умов
Відновлення інфраструктури та технологічна модернізація	Відновлення та модернізація водневої інфраструктури, інтеграція нових технологій у водневу економіку
Спільні науково-дослідні ініціативи і навчання	Участь у міжнародних програмах, підготовка кадрів для реалізації водневих проєктів після війни
Міжнародна співпраця у рамках відбудови	Створення консорціумів з міжнародними партнерами, інтеграція нових технологій та відновлення енергетичних мереж

Джерело: створена автором [614 - 617]

Стратегічні орієнтири водневої економіки України до 2050 року

№	Орієнтир	Ключовий зміст	Інструменти	Форсайт-акценти
1	Доля водню в енергобалансі	20–25 % до 2050	Зелений водень, модернізація мереж	Сценарії попиту
2	Інтеграція з ЄС	Гармонізація з Hydrogen Europe	Horizon Europe, євростандарти	Аналіз ризиків інтеграції
3	ESG-інтеграція	Екологічність, прозорість, інклюзія	ESG-критерії, аудит	Соціоекологічний моніторинг
4	Кадрова база	Освітні програми, лабораторії, наука	Університетські консорціуми	Форсайт-компетенції та міждисциплінарність
5	Інфраструктурна стійкість	Адаптація до війни та клімату	Мобільні модулі, локальні кластери	Геополітичні сценарії в плануванні
6	Відбудова через водень	Регіональна модернізація у післявоєнний період	PPP, гранти, зонування	Форсайт для діалогу бізнес–влада–громада

Джерело: створена автором

**Логіка взаємозв'язку між ключовими категоріями у сфері
дослідження економічних аспектів водневої проблематики**

Категорія	Сутність	Ціль	Логічна роль
Енергетичний перехід (startpoint)	Процес глобального переходу від використання викопного палива(вугілля, нафти, газу) до відновлюваних джерел енергії (сонця, вітру, гідроенергії).	Забезпечення енергетичної безпеки, зменшення залежності від обмежених ресурсів, скорочення викидів CO ₂ .	Основа для впровадження водневих технологій, оскільки водень, як енергоносіє, інтегрується у відновлювану енергетичну систему. Відновлювані джерела енергії (сонячна та вітрова енергетика) стають джерелом для виробництва "зеленого водню".
Водневі технології (інструмент)	Сукупність технологій, які дозволяють виробляти, зберігати, транспортувати та використовувати водень як енергоносіє.	Виробництво водню: електроліз води, парова конверсія метану (з уловлюванням CO ₂). Зберігання водню: стиснений газ, рідкий водень, хімічні сполуки (аміак, метанол). Використання водню: паливні елементи для транспорту, водневі турбіни для енергетики, водень у промисловості.	Технологічна основа для декарбонізації економіки. Вони дозволяють замінити викопне паливо у ключових секторах (транспорт, важка промисловість, електроенергетика), де електроенергія з відновлюваних джерел не може бути ефективно використана.
Декарбонізація економіки (мета)	Процес скорочення викидів парникових газів у всіх секторах економіки з метою досягнення вуглецевої нейтральності.	Перехід на відновлювану енергетику. Заміна викопного палива в транспорті та промисловості. Розвиток енергетичної ефективності.	Кінцева мета енергетичного переходу і впровадження водневих технологій. Водень грає ключову роль у зменшенні викидів CO ₂ у секторах, де інші технології (наприклад, електрифікація) є менш ефективними.
Воднева економіка (результат)	Нова економічна система, у якій водень є основним енергоносієм для зберігання, транспортування та використання енергії.	Використання водню в усіх секторах економіки. Інтеграція відновлюваної енергетики через виробництво "зеленого водню". Розбудова водневої інфраструктури (заправні станції, трубопроводи, заводи з виробництва водню).	Фінальна фаза енергетичного переходу та інструментом для досягнення декарбонізації економіки. Вона дозволяє створити екологічно чисту, стійку та інтегровану енергетичну систему.

Джерело: створена автором

**Основні парадигмально-концептуальні положення у публікаціях щодо
взаємозв'язку енергетичного розвитку та водневої економіки**

Парадигма/ концепція	Публікація (рік), автор	Цитата
Парадигма енергетичного розвитку	"The Energy Transition: History, Status and Future" (2011), автор V. Smil. В публікації висвітлено історію енергетичних змін і ставить питання щодо майбутніх енергетичних систем. Парадигма аналізується через призму переходу від викопних джерел енергії до відновлювальних.	V. Smil: "Energy transitions are long-term processes, and they are driven by a combination of technological innovation, environmental concerns, and economic pressures".
Концепція сталого розвитку	"Our Common Future" (1987), Світова комісія з навколишнього середовища та розвитку (Доклад Брундтланд). Основний документ, що популяризував концепцію сталого розвитку, де зазначено, як поєднання економічних, екологічних та соціальних аспектів повинно відображатися в політиках розвитку.	"Development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs." — Brundtland Report.
Концепція зеленої економіки	"Green Economy: A New Definition" (2011), автор P.C. Smith В статті відображено концепцію зеленої економіки, яка передбачає економічну стратегію, спрямовану на стійке використання природних ресурсів з мінімальним негативним впливом на довкілля.	Smith P.C.: "Green economy is one that results in improved human well-being and social equity, while significantly reducing environmental risks and ecological scarcities".
Концепція енергетичної безпеки	"Energy Security: The Foreign Policy Dimensions" (2005), W. O'Neill, J.G. Soroos. Дослідження зосереджено на політичних і стратегічних аспектах енергетичної безпеки, аналізує залежність від імпортованих енергоресурсів та її вплив на національні політики.	O'Neill W., Soroos J.G.: "Energy security means reliable access to affordable and diverse energy supplies. It is an essential element of national security".
Концепція декарбонізації	"The Climate Change Crisis: The Greenhouse Effect and What We Can Do" (1999), James Hansen. Автор публікації є одним із основних активістів декарбонізації, в його дослідженні висвітлені ідеї боротьби з глобальним потеплінням та необхідності зменшення викидів CO ₂ .	Hansen James: "Global warming is not a future problem. It is already with us and it is caused by the burning of fossil fuels".
Концепція енергетичного переходу	"The Energy Transition: A New Paradigm" (2015), J.A. Turner. У роботі розглядається енергетичний перехід як довготривалий процес, що включає значні технологічні та економічні зміни для заміни викопних джерел енергії на відновлювані.	Turner J. A.: "Energy transition involves not only the shift from fossil fuels to renewable sources, but also a fundamental restructuring of energy systems that will require both technological and behavioral changes".
Концепція водневої економіки	"Hydrogen Economy: Opportunities and Challenges" (2007), M.P.L. Moret. У книзі розглядається роль водневих технологій як потенційного джерела чистої енергії в майбутньому. Воднева економіка стає однією з найбільш обговорюваних тем, що може змінити світову енергетичну систему.	Moret M.P.L.: "The hydrogen economy is a future vision where hydrogen is used as a clean, sustainable energy carrier, facilitating the transition from fossil fuels to renewable energy".

Джерело: створена автором

Ключові етапи еволюції концепції водневої економіки

Етап (назва, період)	Характерні особливості етапу (процеси, явища)
Ранні наукові відкриття водню (XIX століття)	1766 р.: Генрі Кавендіш (англійський фізик і хімік, член Лондонського королівського товариства) відкрив водень як хімічний елемент і встановив, що при його згорянні утворюється вода. 1839 р.: Уільям Роберт Гроув (англійський фізик і хімік, Оксфордський університет) розробив перший прототип паливного елемента, що генерував електрику через реакцію водню та кисню. 1860-ті рр.: Жюль Верн (французький письменник, засновник наукової фантастики, член Французького географічного товариства) у своєму романі <i>"Таємничий острів"</i> передбачив майбутнє використання водню як універсального джерела енергії.
Початок практичного використання водню (XX століття)	1920-ті рр.: водень використовувався для наповнення дирижаблів (наприклад, дирижабль "Гінденбург"). 1950-ті рр.: водень став важливим елементом у ракетобудуванні. NASA активно використовувала рідкий водень як паливо для своїх космічних програм. 1960-ті рр.: початок досліджень паливних елементів для живлення космічних апаратів, зокрема в місіях "Аполлон".
Початок сучасної концепції водневої економіки (1970–1990-ті рр.)	1970-ті рр.: перша нафтова криза привернула увагу до альтернативних джерел енергії. З'явилися перші ідеї про водневу економіку як спосіб зменшення залежності від викопних палив. 1979 р.: опублікована книга Джеремі Ріфкіна (американський соціальний філософ, теоретик посткапіталізму, економіст, пропагандист сталого розвитку та альтернативної енергетики) <i>"Енергетична революція"</i>, де водень позиціонувався як майбутнє енергетики. 1990-ті рр.: початок експериментів з водневими автомобілями (наприклад, Daimler-Benz представила перший концепт автомобіля на водневих паливних елементах).
Екологічний акцент та технологічні прориви (2000–2010-ті рр.)	2000-ті рр.: посилення інтересу до водневої економіки через проблеми зміни клімату; початок програм державної підтримки водневих технологій у Японії, США, ЄС; Toyota представила перший комерційний автомобіль на паливних елементах (Toyota Mirai). 2010-ті рр.: розвиток технологій відновлюваної енергетики (сонячної та вітрової), що забезпечили перспективи для "зеленого" водню; у ЄС було започатковано проекти для створення "водневих кластерів"; Китай, США та інші країни почали масштабні інвестиції у водневу інфраструктуру.
Воднева економіка як стратегічний пріоритет (2020-ті рр.–сьогодня)	2020 р.: Європейська комісія ухвалила Водневу стратегію ЄС, що передбачає досягнення водневої нейтральності до 2050 року. 2021 р.: США виділили мільярди доларів на розвиток технологій чистого водню в рамках програми декарбонізації; Японія стала світовим лідером у водневих проєктах, запустивши водневі міста та масштабні виробничі потужності. 2023 р.: в Україні оголошено плани інтеграції водневих технологій для енергетичної незалежності та експорту "зеленого" водню до ЄС.

Джерело: створена автором

Додаток Н2

Плани та інвестиції в розвиток водневої економіки країн світу

Країна	Планові інвестиції в водневу економіку	Основні цілі (до 2030 року)	Основні напрямки
Європейський Союз	10 мільйонів тонн водню	Виробництво 10 мільйонів тонн водню, розвиток водневої інфраструктури	Відновлювальні джерела енергії, водневі хаби, транспортування водню
Німеччина	9 мільярдів євро	Розвиток водневої інфраструктури, будівництво заводів для виробництва водню	Водень з відновлювальних джерел, водневі автомобілі, заправки
Японія	500 мільярдів доларів	Виробництво водню, розвиток водневих автомобілів, створення водневої інфраструктури	Експорт водню, водневі автозаправки, використання водню в промисловості
Австралія	3 мільярди доларів	Розвиток "зеленого" водню, експорт водню до Азії (Японія, Південна Корея)	Відновлювальні джерела енергії, розвиток експорту водню
Китай	14,5 мільярда доларів	Використання водню в промисловості, транспортуванні, будівництво водневих хабів	Водневі автомобілі, промисловість, енергетика
Південна Корея	10 мільярдів доларів	Використання водню для транспорту, будівництво водневих заправок	Водневі автозаправки, розвиток водневих автомобілів
США	8 мільярдів доларів	Створення водневих хабів, використання водню для важкої промисловості, транспорту	Водневі технології для транспорту, виробництво водню, інфраструктура
Норвегія	1,2 мільярда євро	Розвиток "зеленого" водню за допомогою гідроелектростанцій, водневі автомобілі	Відновлювальні джерела, водневі транспортні засоби, промисловість
ОАЕ	3 мільярди доларів	Виробництво водню за допомогою сонячної енергії, розвиток водневих проектів	Зелений водень, експорт водню до Європи та Азії
Катар	1,5 мільярда доларів	Виробництво водню, орієнтуючись на експорт до Європи і Азії	Водень з природного газу, експорт водню

Джерело: створено на основі [630 -, 636]

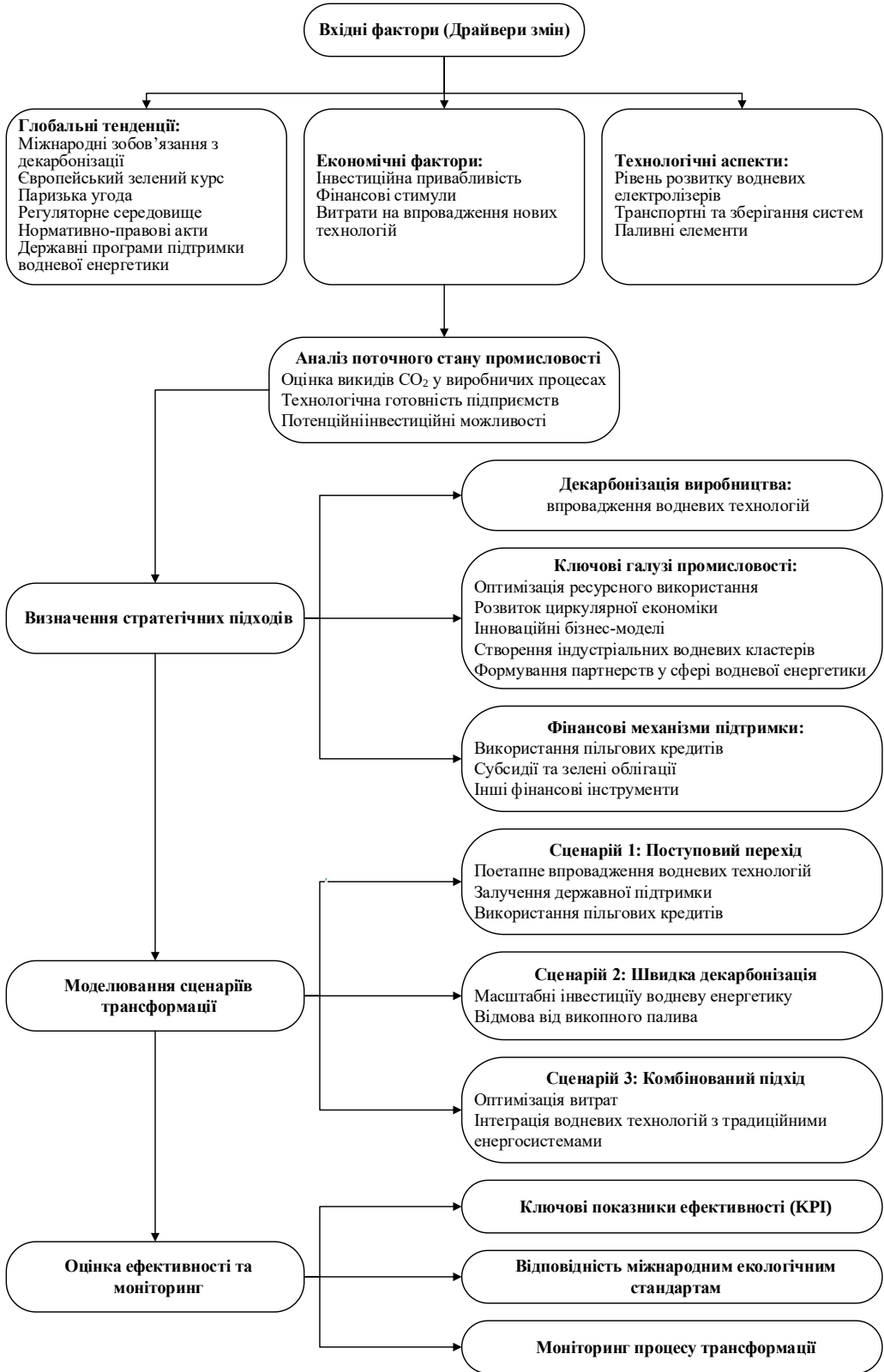


Рис. М2.1. Концептуальна модель оцінки промислової трансформації у водневій економіці

Джерело: створено автором

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

У наукових фахових виданнях України:

1. Контент-аналіз стратегічних ініціатив розвитку водневої економіки різних країн світу. Дмитрієва О.В., Ємельяненко Л.М.. *“Трансформаційна економіка”*. Хмельницький кооперативний торговельно-економічний інститут. 2024 № 3 (08) С. 26 -36. DOI: 10.32782/2786-8141/2024-8-4 (1,17д.а., особисто автору – 0,9 д.а.: запропоновано систему управління енергетичною безпекою на основі функціонального підходу). (дата звернення: 19.06.2024).
2. Дмитрієва О.В., Світова практика та міжнародне співробітництво у розвитку водневої економіки країн світу *"Ефективна економіка"* № 10, жовтень 2024 р. DOI: 10.32702/2307-2105.2024.10., (0,9 д.а.). (дата звернення: 19.06.2024).
3. Дмитрієва О.В., 2024. Вплив соціальних факторів на управління енергоефективністю та розвиток відновлювальних джерел енергії. *Вчені записки.2024.№36 (3) С. 42-49.* DOI: 10.33111/vz_kneu.36.24.03.04.026.032. (0,7д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).

В інших виданнях:

4. Дмитрієва О. В. і інші. “Renewable Energy Sources as a Key Focus of Ukraine's Energy Policy Amid Military Threats: Geographical and Economic Dimensions” Журнал ECONOMIC AFFAIRS Quarterly Journal of Economics Print ISSN: 0424-2513 Online ISSN: 0976-4666 NAAS RATING : 5.45 SCOPUS INDEXED UGC-CARE GRP II <https://economicaffairs.co.in/> Economic Affairs, Vol. 69(03), pp. 1461-1469, September 2024 DOI: 10.46852/0424-25 13.4.2024.30. (0,9 д.а. , особисто автору - 0,3 д.а.).(дата звернення: 23.06.2024).
5. Dmitriiieva O., Dmitriiieva D. (2023). Hydrogen economy as a strategic priority for Ukraine’s recovery. *Global Prosperity*. Tom 3(3). Оpubліковано 2023-07-03. p. 48–58.

- Стаття Publisher: Oktan Print (Czech Republic). (0,9 д.а. , особисто автору - 0,3 д.а.).
(дата звернення: 23.06.2024).
6. Дмитрієва О.В., Косяк І.В., Тітов В.В., Смірнова О.Ю., Праворський В.В., Галицька О.Б. Діагностика та управління бізнес-процесами підприємства. *POLISH SCIENCE JOURNAL* (Республіка Польща), 2021 ISSUE 7(40). 199 р. Р. 51-59. (0,9 д.а. , особисто автору - 0,3 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024).
 7. Dmitrieva Oksana, Derbenova Yana, Kashyna Ganna, Leontovych Serhii, Ablova Olena, Yaremenko Lyudmyla. Impact of the Covid-19 Pandemic on Entrepreneurial Capacity and Financial Security in Ukraine. *Sustainable Development in the Post-Pandemic Period (SDPPP)*: International Scientific and Practical Conference. Tallin, Estonia, November 9-10, 2021. SHS Web of Conferences 126, 08002 (2021) P. 1-10 URL: <https://doi.org/10.1051/shsconf/202112608002> SDPPP-2021. (0,9 д.а. , особисто автору - 0,2д.а.). (дата звернення: 20.06.2024), (форма участі заочна).
 8. Дмитрієва О.В. Особливості фінансування виробництва інтелектуального продукту транснаціональних корпорацій конференції. *TOPICAL ISSUES OF MODERN SCIENCE, SOCIETY AND EDUCATION*: Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції. м. Харків, 5-7 вересня 2021р. Харків: НПЦ «Sciconf.com.ua». 2021. 624 с. С. 534-538. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024), (форма участі заочна).
 9. Ємельяненко Л.М., Дмитрієва О.В. Кліматичне фінансування як основа міжнародної взаємодії та партнерства в забезпеченні зеленого зростання. *Зелена економіка та низьковуглецевий розвиток: міжнародний та національний вимір*: Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, (форма участі заочна). м. Київ, 10 грудня 2021 р. Київ: Видавничий дім «Гельветика». Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління. 2021. 120 с. С.106-112. (0,5 д.а. , особисто автору - 0,3д.а.). (дата звернення: 21.06.2024), (форма участі заочна).
 10. Ємельяненко Л.М., Дмитрієва О.В. Кіберпростір України: безпекові загрози, виклики та перспективи розвитку. *Кібербезпека державних інституцій та*

подолання кризових станів: Матеріали I Міжнародної науково-практичної конференції . м. Київ-Вроцлав, 26 травня 2022 р. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024), (форма участі заочна)..

11. Ємельяненко Л.М., Дмитрієва О.В. Cybernetic Factors of Ukraine's Global Security. *Economic Security in the Global Environment (ESGE-2022)*: Матеріали Міжнародної конференції. м. Київ, 29-30 червня 2022 р. К.: КНЕУ. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 19.06.2024), (форма участі заочна).
12. Ємельяненко Л.М., Дмитрієва О.В. Дмитрієва Д.С. Форсайт-підхід до стратегування економічного розвитку України в умовах невизначеності. Стратегічні імперативи сучасного менеджменту: Зб. Матеріалів VI Міжнародної науково-практичної конференції. 21 жовтня 2022 р. К.: КНЕУ, 2022. 370 с. С. 206-209. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024), (форма участі заочна).
13. Дмитрієва О.В. Міжнародні інструменти економічної аналітики водневої економіки та їх адаптація в Україні. Зб. Матеріалів II Міжнародної науково-практичної конференції. 24 січня 2025 р. Україна, Київ: КНЕУ, 2025. 404 с. С. 32-35. (0,3 д.а. , особисто автору - 0,2 д.а.). (дата звернення: 20.06.2024), (форма участі заочна).



ГОЛОВНЕ УПРАВЛІННЯ РОЗВІДКИ МІНІСТЕРСТВА ОБОРОНИ УКРАЇНИ

вул. Електриків, 33, м. Київ, 04176, тел./факс: (044) 428-40-11
E-mail: contact@gur.gov.ua, сайт: www.gur.gov.ua, код згідно з ЄДР 43966883

від 20.06. 2025р. № 222/40/1699

На № 21/13620 від 19.06. 2025р.

Київський національний економічний
університет імені Вадима Гетьмана

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача
PhD-рівня за спеціальністю 051 – “Економіка” Дмитрієвої Оксани Віталіївни
на тему “Стратегування розбудови водневої економіки в Україні”

Розглянувши наукову доповідь “Дослідження стану, проблем та перспектив розбудови водневої економіки в світі”, підготовлену здобувачем PhD-рівня Дмитрієвою О.В., за результатами виконання дисертаційного дослідження за темою “Стратегування розбудови водневої економіки в Україні”, інформуємо, що запропонований інформаційний матеріал знайшов схвальний відгук.

В доповіді запропоновано категоріальний апарат методичного забезпечення оцінювання водневої економіки, надані практичні рекомендації щодо комплексної системи оцінювання ефективності розвитку водневої економіки та наведені результати:

дослідження стану, проблем та перспектив розбудови водневої економіки в світі;

контент-аналізу стратегічних ініціатив щодо розвитку водневої економіки в країнах світу;

компаративного аналізу тенденцій розвитку водневої економіки в країнах світу та Європейського Союзу.

Результати зазначеної роботи враховані та будуть використовуватись під час підготовки інформаційних матеріалів для органів державної влади.

Заступник начальника Головного управління –
директор Четвертого департаменту Головного управління
розвідки Міністерства оборони України
генерал-майор

Вадим СКІБІЦЬКИЙ

1005991

ПН «ГУРЛІФТ І КО»

18031, м. Черкаси, вул. Добровольчих батальйонів, 138/1, т/факс (0472) 65-18-63,
e-mail: gurliftiko@ukr.net

№ 24 - 27 - 01 2025 р.

м. Черкаси

Київський національний
економічний
університет імені Вадима Гетьмана

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження здобувача
PhD-рівня за спеціальністю 051 – “Економіка” Дмитріскої Оксани Віталіївни
на тему “Стратегування розбудови водневої економіки в Україні”

Розглянувши наукову доповідь “Дослідження стану, проблем та перспектив розбудови водневої економіки в Україні та світі”, підготовлену здобувачем PhD-рівня Дмитріскою О.В., за результатами виконання дисертаційного дослідження за темою “Стратегування розбудови водневої економіки в Україні”, інформуємо, що запропонований інформаційний матеріал знайшов схвальний відгук.

Вважається за доцільне зазначити, що наведені результати роботи мають важливе значення, зокрема для суб'єктів, які працюють у сфері енергетичного консалтингу, технічного аудиту, проектування та модернізації інфраструктури.

Крім цього, надані інформаційні матеріали є корисними під час розробки інвестиційних проєктів в рамках яких планується впровадження водневих технологій. Зокрема, структурований аналіз світових та національних трендів, економічне обґрунтування водневих ініціатив, оцінка потенціалу виробництва та споживання водню є джерелом аналітики та систематизованих даних, які можуть бути використані під час прийняття управлінських рішень.

Директор



Віталій ГУРОВ

Громадська організація «МІЖНАРОДНИЙ ЦЕНТР
РОЗВИТКУ СМАРТ СУСПІЛЬСТВА»

ЄДРПОУ 40180832

Україна, 03150, місто Київ, вул. Горького

E-mail: icdsmartociety@gmail.com

№ 15
06 грудня 2024 року

Київський національний економічний
університет імені Валіма Гетьмана

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження
Дмітрієвої Оксани Віталіївни
на тему «Стратегування розбудови водневої економіки в Україні»

Розглянувши наукову доповідь «Оцінювання потенціалу розвитку водневої економіки України в розрізі її окремих складових (виробництво, зберігання, транспортування, споживання)», підготовлену О.В. Дмітрієвою, за результатами виконання дисертаційного дослідження за темою «Стратегування розбудови водневої економіки в Україні», Громадська організація « » інформує, що запропонований інструментарій щодо оцінювання потенціалу розвитку водневої економіки України знайшли схвальний відгук та використані під час опрацювання рекомендацій щодо проведення освітніх програм та просвітницьких рухів стосовно переваг водневої енергії у боротьбі з кліматичними змінами з метою формування громадської свідомості про необхідність зменшення негативного впливу на навколишнє середовище задля досягнення чистішого та екологічно безпечного майбутнього.

Заступник голови ГО
«МІЖНАРОДНИЙ ЦЕНТР
РОЗВИТКУ СМАРТ СУСПІЛЬСТВА»



О. І. Джадалла