

РОЗДІЛ V. БУДІВНИЦТВО ТА ГЕОДЕЗІЯ

DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1\(43\)-355-381](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2026-1(43)-355-381)

УДК 620.92

Віталій Іванович Зацерковний¹, Олександр Миколайович Васильєв²

¹ доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. ScopusID: 57200165109

² аспірант кафедри геоінформатики 2 року навчання, спеціальність 193 – Геодезія та землеустрій
Київський національний університет імені Тараса Шевченка ННІ «Інститут геології» (Київ, Україна)
E-mail: yasilyeva455@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2177-7859>

ОЦІНКА ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

Використання викопного палива супроводжується зростанням викидів діоксиду вуглецю (CO₂), посиленням кліматичних змін та енергетичними ризиками. У цих умовах розвиток відновлюваних джерел енергії та водневої енергетики розглядається як один із ключових напрямів декарбонізації та підвищення стійкості енергосистем. Водень може виконувати роль універсального енергоносія й засобу довгострокового накопичення енергії. Для України впровадження водневих технологій пов'язане з перспективами модернізації енергетичної інфраструктури, розширення інвестиційних можливостей та інтеграції до європейського енергетичного простору.

Ключові слова: викопне паливо; відновлювальні джерела енергії; воднева енергетика; водень; вуглецева нейтральність; енергетична ефективність.

Рис.: 17. Табл.: 17. Бібл.: 34.

Актуальність теми дослідження. Сучасний етап розвитку світової енергетики характеризується необхідністю глибоких структурних трансформацій, зумовлених посиленням кліматичних та екологічних викликів, зростанням глобального попиту на енергетичні ресурси та підвищенням ризиків енергетичної залежності [1; 3]. У цих умовах ключовим інструментом досягнення кліматичної нейтральності, зменшення викидів парникових газів і зміцнення енергетичної безпеки держав виступає декарбонізація енергетичного сектору шляхом диверсифікації джерел енергії та зниження залежності від викопних палив [5]. Це закріплено у глобальних кліматичних угодах та національних стратегіях розвитку, визначено зменшення антропогенних викидів парникових газів і перехід до низьковуглецевих економік. Досягти цих цілей можна за умови системного впровадження ВДЕ та розвитку водневої енергетики.

Однією з ключових глобальних екологічних проблем сучасності є забруднення атмосферного повітря (АП), що супроводжує індустріальний розвиток суспільства [1] і яке безпосередньо впливає на здоров'я людей і тварин, стан довкілля та кліматичні процеси на планеті. Особливої актуальності ця проблема набула у ХХ–ХХІ століттях у зв'язку зі зростанням енергоспоживання, урбанізації та інтенсифікації транспортних систем.

Основною причиною забруднення повітря є антропогенна діяльність людини, зокрема використання викопного палива для задоволення енергетичних і транспортних потреб. Головним чинником забруднення повітря є спалювання викопного палива – вугілля, нафти та природного газу, які широко застосовуються для виробництва електроенергії, опалення житлових і промислових приміщень, а також для забезпечення роботи транспорту [2].

У процесі згоряння викопного палива в атмосферу викидаються значні обсяги забруднюючих шкідливих речовин, зокрема вуглекислого газу (CO₂), діоксиду сірки (SO₂), оксидів азоту (NO₂ та NO_x), а також твердих завислих частинок (PM₁₀ і PM_{2.5}). Ці компоненти характеризуються високою токсичністю та здатністю до тривалого перебування в атмосфері, що зумовлює їхній негативний вплив на екосистеми та живих організмів.

Викиди CO₂ є одним із ключових чинників посилення парникового ефекту, що призводить до глобальних кліматичних змін [3]. Підвищення середньої температури повітря спричиняє порушення кліматичних режимів, танення полярних льодовиків, зростання рівня Світового океану та збільшення частоти екстремальних погодних явищ [34]. Діоксид сірки та оксиди азоту, взаємодіючи з атмосферною вологою, утворюють кислотні опади. Кислотні дощі спричиняють деградацію ґрунтів, зниження родючості сільськогосподарських угідь, ушкодження лісових екосистем і закислення поверхневих вод. Крім того, вони прискорюють корозійні процеси та руйнування об'єктів інфраструктури. Значну екологічну небезпеку становлять також тверді відходи згоряння, зокрема зола та шлаки. Їх накопичення і неналежне зберігання можуть призводити до забруднення ґрунтів і ґрунтових вод токсичними сполуками важких металів.

Тверді частинки та газоподібні забруднювачі проникають у дихальну систему людини, спричиняючи розвиток респіраторних і серцево-судинних захворювань. За даними епідеміологічних досліджень, тривалий вплив забрудненого повітря підвищує ризик виникнення бронхіальної астми, хронічного бронхіту, ішемічної хвороби серця та передчасної смертності. Особливу небезпеку становить смог, характерний для великих промислових міст, який є результатом поєднання транспортних і промислових викидів за несприятливих метеорологічних умов.

Мінімізація забруднення повітря потребує комплексних рішень, що передбачають низку технологічних, економічних та нормативно-правових заходів [4]. Пріоритетним напрямом є перехід до відновлюваних джерел енергії – сонячної, вітрової, гідро- та біоенергетики. Важливе значення має також підвищення енергоефективності промислових об'єктів і житлових будівель. Ефективними заходами також є розвиток низьковуглецевого громадського транспорту, впровадження електромобілів, а також посилення екологічних стандартів щодо викидів.

Актуальність теми дослідження викликана тим, що збереження поточних тенденцій домінування викопного палива в енергетичному балансі спричинить кумулятивний негативний вплив на кліматичну систему, довкілля та соціально-економічні процеси, що в довгостроковій перспективі сформує загрозу масштабних глобальних кризових явищ.

Запобігання цьому потребує своєчасного впровадження комплексних заходів, перед усім декарбонізації економіки, спрямованих на зменшення антропогенного навантаження на довкілля і недопущення екологічного колапсу. Серед пріоритетних напрямів – скорочення викидів парникових газів, перехід до ВДЕ, збереження та відновлення природних екосистем, а також формування моделей сталого виробництва і споживання.

Аналіз сучасних наукових досліджень і публікацій свідчить про високий рівень зацікавленості науковців усього світу проблематикою декарбонізації, як одного з ключових напрямів енергетичного переходу, зумовленого загостренням кліматичних змін, зростанням антропогенного навантаження на довкілля та необхідністю скорочення викидів парникових газів [3; 5]. При цьому, воднева енергетика розглядається перспективним шляхом декарбонізації енергетичного сектору, підвищення енергетичної безпеки та зниження негативного впливу на довкілля та переходу до сталого розвитку та формування низьковуглецевої економіки [6; 7; 8].

Значна частина досліджень зосереджена на технологіях виробництва «зеленого» водню, проблемах його зберігання та транспортування, а також можливостях інтеграції водню в існуючі енергетичні системи [9].

Порівняльний аналіз підходів українських учених до розвитку водневої енергетики засвідчує різноманітність наукових акцентів та методологічних підходів, що сформувалися в межах окремих наукових шкіл і напрямів досліджень. Коваленко В. С. та Лисенко О. М. основну увагу приділяють технологічним аспектам виробництва водню та можливостям його використання в енергетиці й транспорті, зокрема з позицій підвищення енергоефективності та екологічної безпеки [9]. Бондаренко О. В. зосереджується на аналізі перспектив

розвитку водневої енергетики в Україні, оцінці ресурсного потенціалу та економічної доцільності впровадження водневих технологій у національну енергетичну систему [10]. Шевченко І. В. та Петренко О. А. розглядають водневу енергетику переважно в контексті енергетичної безпеки держави та зниження викидів парникових газів, що підкреслює її стратегічне значення для сталого розвитку України [11]. Таким чином, наукові підходи українських дослідників взаємодоповнюють один одного, формуючи комплексне бачення ролі водневої енергетики в процесі декарбонізації економіки. Проте, проведений авторами аналіз літератури свідчить про переважно фрагментарний характер досліджень, обмежену кількість комплексних робіт, що поєднують технічні, економічні та нормативно-правові аспекти, що зумовлює актуальність подальших системних досліджень у цій сфері. Зокрема, актуальними залишаються питання перспектив розвитку водневої енергетики, її масштабування, економічної ефективності, інтеграції у національні енергетичні системи, а також оцінки довгострокових екологічних та соціально-економічних наслідків їх упровадження.

Мета дослідження є обґрунтування ролі ВДЕ та водневої енергетики у процесі декарбонізації економіки.

Завдання дослідження: аналіз сучасних тенденцій розвитку ВДЕ, оцінка потенціалу водневої енергетики та визначення перспектив їх спільного використання.

Виклад основного матеріалу. Сучасний етап розвитку цивілізації характеризується зростанням масштабів антропогенного впливу на довкілля, що проявляється у зміні клімату, деградації екосистем та зниженні рівня біорізноманіття. Однією з ключових причин зазначених процесів є надмірні викиди парникових газів, зумовлені використанням викопного палива в енергетиці, промисловості та транспорті. У зв'язку з цим декарбонізація розглядається як пріоритетний напрям екологічної та кліматичної політики, спрямований на недопущення екологічного колапсу.

Під декарбонізацією розуміють сукупність політичних, економічних і технологічних заходів, спрямованих на зниження інтенсивності викидів вуглецю та інших парникових газів у процесі господарської діяльності. Її реалізація передбачає трансформацію енергетичних систем, оптимізацію виробничих процесів, а також зміну моделей споживання з орієнтацією на принципи сталого розвитку.

У стратегічних документах Європейського Союзу та України визначено п'ять ключових напрямів декарбонізації економіки (табл. 1), реалізація яких спрямована на скорочення викидів парникових газів і досягнення кліматичної нейтральності [12–15]:

Таблиця 1 – Ключові напрямки декарбонізації економіки

№ п/п	Напрямок	Заходи
1	Енергоефективність та енергозбереження	Зниження енергоємності економіки шляхом модернізації промисловості, будівель та інфраструктури.
2	Розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ)	Формування водневого ринку як одного з ключових елементів низьковуглецевої енергетичної системи.
3	Удосконалення системи поводження з відходами	Впровадження принципів циркулярної економіки та скорочення обсягів захоронення відходів.
4	Розвиток електротранспорту	Ефективний інструмент зменшення викидів у транспортному секторі.
5	Декарбонізація промисловості	Впровадження чистих технологій, альтернативних видів палива та систем уловлювання і зберігання вуглецю.

Джерело: розроблено авторами.

Концепція декарбонізації ґрунтується на положеннях кліматології та екологічної економіки, відповідно до яких стабілізація кліматичної системи можлива лише за умов істотного скорочення антропогенних викидів парникових газів.

Основним практичним завданням декарбонізації є зменшення викидів вуглекислого газу (CO_2), метану (CH_4) та закису азоту (N_2O), які відіграють провідну роль у формуванні парникового ефекту. Скорочення їх концентрації в атмосфері досягається шляхом розвитку відновлюваної енергетики, підвищення енергоефективності, електрифікації транспортного сектору та впровадження технологій уловлювання і зберігання вуглецю.

Зниження обсягів викидів парникових газів сприяє зменшенню антропогенного навантаження на кліматичну систему та створює передумови для стабілізації глобального енергетичного балансу.

Декарбонізація безпосередньо впливає на динаміку кліматичних змін, оскільки скорочення викидів парникових газів дозволяє сповільнити зростання середньої глобальної температури. Це, у свою чергу, знижує ймовірність виникнення екстремальних кліматичних явищ, зокрема тривалих посух, інтенсивних опадів та теплових хвиль. Крім того, стабілізація кліматичних процесів сприяє збереженню кріосфери, морських та наземних екосистем, які є найбільш уразливими до кліматичних коливань.

Реалізація політики декарбонізації зменшує ризики деградації лісових, водних і ґрунтових екосистем, а також уповільнює процеси втрати біорізноманіття.

Зменшення викидів парникових газів і супутніх забруднювачів позитивно впливає на якість повітря та водних ресурсів, що є важливою передумовою підтримання екологічної рівноваги та безпеки життєдіяльності людини.

Таким чином, декарбонізація виступає науково обґрунтованим і стратегічно необхідним інструментом запобігання екологічному колапсу. Через скорочення викидів парникових газів вона забезпечує сповільнення зміни клімату та зниження ризиків для природних екосистем.

Ключовим інструментом декарбонізації економіки та переходу до кліматично нейтральної моделі розвитку виступають ВДЕ та воднева енергетика.

ВДЕ, зокрема сонячне випромінювання, енергія вітру, біомаса, гідроенергія та геотермальна енергія, розглядаються як ключові складові низьковуглецевої енергетичної системи та важливий інструмент декарбонізації економіки. Сонячна і вітрова енергетика характеризуються мінімальним рівнем викидів парникових газів на етапі експлуатації, однак їх змінна генерація зумовлює потребу в розвитку систем накопичення енергії та гнучких механізмів балансування енергосистеми. Біоенергетика має потенціал зменшення антропогенного навантаження за рахунок утилізації органічних відходів, проте її екологічна ефективність залежить від сталості сировинної бази та технологій переробки. Гідроенергетика забезпечує стабільне виробництво електроенергії з низьким вуглецевим слідом, водночас потребує врахування впливу на водні та прибережні екосистеми. Геотермальна енергія вирізняється високою надійністю та здатністю забезпечувати базове навантаження, однак її впровадження обмежується геологічними та економічними чинниками. У сукупності зазначені особливості свідчать про доцільність комплексного використання різних видів відновлюваних джерел енергії з урахуванням регіональних, технологічних та екологічних умов.

ВДЕ характеризуються часовою варіабельністю виробництва, зумовленою наявністю як добових, так і сезонних коливань генерації. Через це відновлювальна енергетика не спроможна самостійно забезпечити безперервне постачання енергії [16] і потребує оперативного балансування, розподілу та споживання, що за відсутності достатніх потужностей

накопичення та гнучких механізмів управління енергосистемою істотно ускладнює її інтеграцію в електроенергетичні мережі. Вирішити цю проблему дозволяє воднева енергетика, яка виконує функцію системного інтегратора, підвищуючи гнучкість енергосистеми та сприяючи ефективнішому використанню ВДЕ в процесі декарбонізації.

Водень, з одного боку, виступає універсальним енергоносієм, який може застосовуватися в енергетиці, промисловості та транспортному секторі та в опаленні житлово-комунального господарства без утворення прямих викидів парникових газів, за умови використання низьковуглецевих технологій виробництва, а з іншого – як перспективний засіб довгострокового акумулювання енергії (дозволяє перетворювати надлишкову електроенергію з ВДЕ для виробництва чистого водню з подальшим його зберіганням і використанням у періоди дефіциту генерації від ВДЕ).

Водень – це хімічний елемент з атомним номером 1 у Періодичній системі хімічних елементів. Він є найлегшим елементом і водночас найпоширенішим у Всесвіті, становлячи основну масу зірок і міжзоряного простору. Позначається символом H, належить до 1 періоду та умовно розміщується в 1 групі, хоча за своїми властивостями суттєво відрізняється від лужних металів. Це неметал, який здатний проявляти як відновні, так і (рідше) окисні властивості. За нормальних умов водень – це безбарвний, без запаху і смаку газ, який у 14 разів легший за повітря. Він має дуже низькі температури плавлення (-259°C) і кипіння (-253°C), погано розчиняється у воді та характеризується високою дифузійною здатністю.

У природі водень існує переважно у вигляді двохатомних молекул H_2 . Це горючий газ, який при взаємодії з киснем згоряє з утворенням води. Водень активно реагує з неметалами (киснем, галогенами), з металами утворює гідриди, а також відновлює оксиди металів до простих речовин. На Землі водень рідко трапляється у вільному стані. Найчастіше він входить до складу води, органічних речовин, кислот і мінералів. У космічному просторі водень є основним «паливом» термоядерних реакцій у зірках.

Водень широко використовується в промисловості: для синтезу аміаку, у нафтопереробці, металургії, ракетній техніці та перспективній водневій енергетиці як екологічно чисте паливо.

Стійке зростання енергоспоживання та посилення вимог до скорочення викидів парникових газів актуалізують необхідність впровадження енергоносіїв із високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) та мінімальним вуглецевим слідом протягом усього життєвого циклу. Водень характеризується однією з найвищих питомих теплот згорання серед хімічних енергоносіїв (до 120 МДж/кг) [19], що істотно перевищує відповідні показники традиційних викопних палив. За умови використання водню в паливних елементах загальний ККД перетворення енергії може сягати 55–65 %, а в когенераційних системах – понад 80 %. При цьому кінцевим продуктом окиснення водню є вода, що забезпечує відсутність прямих викидів CO_2 під час його використання та робить водень перспективним інструментом декарбонізації енергетики, транспорту й промисловості [17; 18].

Найбільша ефективність використання водню досягається в електрохімічних системах – паливних елементах. У таких установках хімічна енергія водню безпосередньо перетворюється на електричну, що дозволяє досягати коефіцієнта корисної дії на рівні 60–70 % [19]. Це значно перевищує ефективність традиційних теплових електростанцій, де значна частина енергії втрачається у вигляді тепла [20].

Водень може ефективно використовуватися як засіб акумулювання енергії, отриманої з відновлюваних джерел. Надлишкова електроенергія, вироблена сонячними або вітровими електростанціями, може застосовуватися для електролізу води з подальшим зберіганням енергії у вигляді водню [17; 18]. Це сприяє підвищенню загальної енергетичної

ефективності енергосистем, роблячи водневі технології доволі перспективними в сучасній енергетиці. А використання водню в паливних елементах і системах відновлюваної енергетики дозволяє досягти високого ККД та мінімізувати негативний вплив на довкілля [17–20]. Крім того, перевагою водню є висока енергетична щільність та можливість зберігання тривалий час.

За кількістю атомів водень належить до найпоширеніших елементів земної кори. За даними геохімічних досліджень, з кожних 100 атомів земної кори приблизно 17 становлять атоми водню [22]. Така висока атомна частка пояснюється участю водню у складі численних хімічних сполук, зокрема води, гідроксидів і органічних речовин. Попри значну атомну поширеність, масова частка водню є відносно невеликою. Встановлено, що водень складає близько 0,88 % від загальної маси Землі, якщо враховувати атмосферу, літосферу та гідросферу [23; 24]. Це зумовлено надзвичайно малою атомною масою водню порівняно з іншими елементами, такими як кисень, кремній чи залізо.

Основна кількість водню зосереджена в гідросфері, де він входить до складу молекул води. Значна частка водню міститься також у літосфері – у складі мінералів, кислот і гідроксидів [24]. В атмосфері водень наявний у незначних концентраціях, оскільки через малу густину він легко залишає гравітаційне поле Землі [25].

Основним джерелом водню є вода, яка у великих обсягах міститься в гідросфері. Окрім води, джерелами водню є також природний газ, біомаса, органічні сполуки та промилові відходи, що забезпечує різноманітність методів його виробництва та можливість широкого застосування в різних регіонах світу [24]. Завдяки практично необмеженій сировинній базі водень може відтворюватися практично безперервно. На відміну від традиційних енергоресурсів, запаси яких є скінченними, виробництво водню може здійснюватися за рахунок природних циклів та відновлюваних джерел енергії. Це робить водень потужним і стратегічно важливим елементом майбутньої енергетичної системи [17; 21].

Порівняння енергоносіїв за питомою енергією (кількістю енергії, що виділяється під час повного згоряння одиниці маси палива) та викидами діоксиду вуглецю (табл. 2) свідчить, що водень має суттєві переваги над традиційними видами палива.

Він суттєво перевершує традиційні викопні енергоносії за питомою енергоємністю та екологічними показниками, зокрема відсутністю прямих викидів CO₂ при використанні.

Високий енергетичний потенціал у поєднанні з відсутністю вуглецевих викидів визначає водень як один із ключових елементів переходу до сталої та екологічно безпечної енергетики. Його використання дозволяє зменшити залежність від викопних палив, підвищити енергетичну безпеку та скоротити викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище [18; 21]. А можливість інтеграції з ВДЕ робить водень важливою складовою енергетики майбутнього.

Водночас його ключовими технічними обмеженнями залишаються низька об'ємна енергетична щільність та підвищена складність зберігання і транспортування, що зумовлює необхідність розвитку відповідної інфраструктури та технологій.

Основні переваги та недоліки застосування водню над традиційними енергоносіями, за даними [4], представлені відповідно в табл. 3 та табл. 4.

Зростання інтересу до водню як альтернативного енергоносія зумовило активний розвиток технологій його виробництва. Водночас екологічна ефективність водневих технологій значною мірою залежить від кількості викидів CO₂, що утворюються на стадії отримання водню. Тому актуальним є поділ технологій виробництва водню за рівнем вуглецевого сліду [17].

Таблиця 2 – Порівняння водню та традиційних енергоносіїв за показниками питомої енергії та обсягами викидів діоксиду вуглецю під час їх використання [20]

Показник	Водень (H ₂)	Природний газ (CH ₄)	Нафтопродукти (бензин/дизель)
Питома теплота згоряння, МДж/кг	~120	~50	42–46
Об'ємна енергетична щільність, МДж/м ³ (н.у.)	~10,8	~35–39	~32 000 (у рідкому стані)
ККД перетворення енергії	55–65 % (паливні елементи), >80 % (когенерація)	35–55 % (ДВЗ, ТЕС, ТЕЦ)	25–40 % (ДВЗ)
Прямі викиди CO ₂ при використанні	0	~56 кг CO ₂ /ГДж	70–75 кг CO ₂ /ГДж
Викиди забруднювальних речовин (NO _x , SO _x , PM)	Мінімальні / відсутні	Помірні	Високі
Продукт згоряння / реакції	H ₂ O	CO ₂ , H ₂ O	CO ₂ , H ₂ O, NO _x , SO _x
Відновлюваність	Потенційно повністю відновлюваний	Невідновлюваний	Невідновлювані
Складність зберігання і транспортування	Висока (тиск, криоумови)	Середня	Низька
Вуглецевий слід (LCA)	Дуже низький (зелений водень)	Середній	Високий

Таблиця 3 – Основні переваги застосування водню над традиційними енергоносіями [20]

Нульові викиди при використанні	Весь процес виробництва екологічно безпечний і не забруднює навколишнє середовище. Чистота водню досягає 99,999%. В паливних елементах водень реагує з киснем, виробляючи електроенергію без утворення CO ₂ , тепло і водяну пару, що робить його ідеальним джерелом енергії для кліматично прийнятних рішень. Він має запобігти глобальному потеплінню.
Висока щільність енергії	За масою водень володіє найвищою питомою енергією. Це означає, що навіть його невелика кількість може забезпечити рух транспортних засобів на значні відстані. Наприклад, автобуси на водневих паливних елементах зазвичай мають запас ходу близько 500 км, порівняно з 200 км в електробусів.
Універсальність	Водень може використовуватись для живлення транспортних засобів (автомобілів, вантажівок, суден та літаків), опалення будинків (у суміші з природним газом або окремо), та слугувати сировиною для таких галузей як виробництво металів і добрив.
Спроможність накопичувати енергію	Надлишкова відновлювальна енергія (від вітру або Сонця) може використовуватись для виробництва зеленого водню, який потім може зберігатись у своїй первинній формі значно довше для наступного використання, на відміну від акумуляторів, балансуючи енергосистему.
Економічна ефективність	Зменшення витрат на обладнання за рахунок зменшення експлуатаційних витрат на технічне обслуговування, що дає відмінні економічні переваги для крупномасштабного виробництва.
Модульність та масштабованість виробництва	Удосконалені системи електролізу лужної води для вироблення зеленого водню містять в собі кілька незалежних електролизів, використовуючи одну систему допоміжного обладнання. Це істотно зменшує капітальні і поточні витрати на технічне обслуговування. Гнучка модульна конструкція дозволяє розширювати потужності у відповідності з виробничими потребами.
Поширеність	Водень – найпоширеніший елемент Всесвіту, тому може забезпечити безмежну кількість виробництва чистої енергії 70-80% в оптимальних умовах.

Таблиця 4 – Основні недоліки застосування водню над традиційними енергоносіями

Назва недоліку	Опис
Висока займистість та вибухонебезпечність	Водень має широкий діапазон займистості (від 4% до 75% у повітрі) та дуже низьку енергію займання і легко змішується з повітрям. Це означає, що навіть невелика іскра може спричинити вибух чи пожежу.
Складність та висока вартість виробництва	Воднева енергетика не є первинним джерелом енергії. Це спосіб збереження і передачі вже виробленої енергії. Як наслідок, викиди, що пов'язані з виробництвом водню сильно залежать від використовуваної енергії. Складність та висока вартість виробництва водню. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) вартість виробництва «чистого» водню з використанням низьковуглецевих джерел енергії становить від 3,2 до 7,39 дол. США/кг. Однак технологічні досягнення можуть дозволити зменшити ці витрати найближчим часом. За прогнозами МЕА до 2060 року, вартість виробництва наблизиться до 1,3-3,3 дол. США/кг. Водень потребує спеціальних умов зберігання (високого тиску або криогенних температур).
Низька ефективність перетворення енергії	Перетворення електроенергії у водень, його збереження, а потім зворотне перетворення в електроенергію в паливному елементі двигуна є вкрай неефективним. Загальна ефективність не перевищує 25-40% порівняно з понад 80-90% для акумуляторних електричних систем.
Низька об'ємна щільність енергії	Водень – найлегший елемент у світі, який володіє низькою об'ємною щільністю енергії. В нестиснутому стані кількість енергії в 1 літрі водню складає приблизно четвертину від кількості енергії бензину. Для збереження достатньої кількості водню для забезпечення практичного запасу ходу транспортних засобів його необхідно стискати до екстремально високого тиску (до 700 бар) або скраплювати при криогенних температурах (-253°C), що є енергоємним дорогим процесом. Але стиснення водню – дорогий процес, який створює додаткові фінансові перешкоди для впровадження водневої енергетики.
Невидимість полум'я	При загорянні водень має тьмяне полум'я (є майже невидимим), що надзвичайно ускладнює його виявлення та гасіння без тепловізійного обладнання.
Ризик задухи та обмороження	Вдихання «чистого» водню призводить до асфіксії (нестачі кисню), а рідкий водень може викликати сильні обмороження
Витоки та воднева крихкість	Атоми водню є доволі малими за розмірами і можуть легко проникати у тверді метали та ущільнення, викликаючи водневу крихкість, яке послаблює сталеві трубопроводи і резервуари, потенційно спричинюючи тріщини та руйнування конструкції. Це ускладнює зберігання та транспортування водню.
Інфра-структурна обмеженість	Обмежена кількість заправок. Існує гостра нестача водневих заправок станцій порівняно з автозаправними станціями або пунктами зарядки електромобілів, що робить подорожі на далекі відстані непрактичними для більшості споживачів.
Витрати на модернізацію	Існуючі газопроводи природного газу не можуть бути легко перефільовані для чистого водню, через крихкість та витоки, що вимагає багатомільярдних інвестицій в спеціалізовану інфраструктуру.
Білі плями технології	Вплив водневого очищення на складні сучасні датчики двигунів та системи очищення вихлопних газів вивчений не до кінця.

Джерело: розроблено авторами.

Для систематизації та порівняльної оцінки різних технологій виробництва водню у світовій практиці широко застосовується колірна схема класифікації (табл. 5), яка відображає джерело первинної енергії, технологічний процес отримання водню та рівень пов'язаних із цим викидів парникових газів, насамперед CO₂.

Такий підхід дає змогу комплексно оцінювати екологічну ефективність, вуглецевий слід і потенціал декарбонізації кожної з технологій у межах життєвого циклу. Крім того, вона є зручною для розуміння екологічних наслідків кожного методу видобутку водню.

Колірне позначення виробництва водню відображає не фізичні властивості газу, а спосіб його отримання та вуглецевий слід, що супроводжує процес виробництва. Наведена класифікація дозволяє об'єктивно оцінити екологічну доцільність видобутку водню.

Таблиця 5 – Класифікація H₂ за кількістю CO₂, що виділяється при його виробництві [1-7]

Позначення водню	Характеристика
Зелений H ₂	Отримують шляхом електролізу води з використанням відновлюваної електроенергії (сонячної, вітрової та гідро) за технологією power-to-gas (P2G). Хімічна формула виробництва: 2H ₂ O → 2H ₂ +O ₂ . Один з найбільш бажаних способів видобутку H ₂ . Але це досить коштовний спосіб, через великі втрати електроенергії в ході процесу електролізу. Зараз для виробництва 1 м3 зеленого H ₂ потрібно 3-5 кВт/год електроенергії. Зеленим його називають тому, що він на 100% є екологічним і найперспективнішим з точки зору декарбонізації різних секторів економіки. Для його видобутку потрібна лише вода, електроенергія та електролізер. В процесі електролізу пропускається електричний струм через H ₂ O і відбувається розщеплення молекули H ₂ O на два атоми H і один атом O. Технологія електролізу лужної води має тривалу історію, відпрацьовані процеси та високу технічну надійність. Збільшення видобутку альтернативної енергії передбачає збільшення видобутку зеленого H ₂ . Зелений H ₂ сумісний з кліматично нейтральним майбутнім, оскільки є абсолютно екологічним.
Блакитний H ₂	Отримують шляхом парової конверсії метану (CH ₄) – (steam methane reforming, SMR) за умови уловлювання та збереження CO ₂ (технологія carbon capture and storage, CCS). Хімічна формула виробництва: CH ₄ +2H ₂ O CO ₂ +4H ₂ . Вартість до дол. США/кг. Проте, 10-20% утвореного CO ₂ вловити не вдається. Існує кілька істотних недоліків добування водню в промислових масштабах, оскільки, по-перше неможливо створити нескінченне сховище для відпрацьованого вуглецю, а по-друге, для уловлювання вуглецевих відходів використовують CH ₄ , який на два порядки (у 100 разів) сильніше нагріває атмосферу, на відміну від CO ₂ . Оскільки CO ₂ при одержанні H ₂ виділяється відносно мало, то процес виробництва класифікують як вуглецево-нейтральний. Його екологічність значною мірою залежить від ефективності і надійності фільтруючих технологій.
Сірий H ₂	Отримують з викопного палива (газу, вугілля або нафти) як побічний продукт переробки під дією високих температур і тиску без уловлювання парникових газів. Хімічна формула виробництва: CH ₄ +2H ₂ O CO ₂ +4H ₂ . Вартість 2-3 дол. США/кг. Це найдешевший та найбільш поширений метод, проте не має екологічного статусу, оскільки при добуванні сірого водню виділяється велика кількість CO ₂ , (10-12 кг CO ₂ на 1 кг H ₂), що робить його неприпустимим джерелом енергії. На сьогодні 95-96% світового водню одержують з природного газу шляхом парового риформінгу, при цьому в атмосферу надходить біля 9,3 кг CO ₂ на 1 кг отриманого водню, що часто нівелює екологічні переваги використання водню в місці споживання.
Коричневий (чорний) H ₂	Отримують з вугілля (коричневий) шляхом газифікації вугілля або інших викопних видів палива без фільтрації. Хімічна формула виробництва: 2H ₂ O+C H ₂ CO. Вартість 2-3 дол. США/кг. Чорний та коричневий кольори відносяться до бітумінозного (чорного) і бурого (бурого вугілля). Процес є надзвичайно брудним. Викиди CO ₂ найвищі. CO ₂ і чадний газ є побічними продуктами і викидаються в атмосферу, що суттєво сприяє парниковому ефекту. Застосовується переважно в країнах із великими запасами вугілля.
Бірюзовий H ₂	Добувається в процесі термічного розщеплення метану на водень та твердий вуглець замість CO ₂ за допомогою піролізу. Хімічна формула виробництва: CH ₄ +2H ₂ O CO ₂ +4H ₂ . Вартість до 5 дол. США/кг. Може здатися відносно сталем з точки зору викидів, оскільки вуглець може або бути вловлений, або використаний для виробництва сталі або акумуляторів. Проте, технології використання уловлювання вуглецю є актуальними. Крім того, метан є парниковим газом, а його витокі можуть впливати на клімат.
Фіолетовий H ₂	Одержують за допомогою ядерної енергії та тепла шляхом комбінованого електролізу розщеплення води. Хімічна формула виробництва: CH ₄ +2H ₂ O CO ₂ +4H ₂ .
Рожевий H ₂	Генерується шляхом електролізу води за допомогою електроенергії з атомної електростанції, зберігаючи низькі викиди, але з урахуванням аспектів поводження з ядерними відходами
Червоний H ₂	Виробляється шляхом високотемпературного каталітичного розщеплення води з використанням як джерела ядерної енергії.
Жовтий H ₂	Добувається шляхом електролізу води атомною енергією за технологією power-to-gas (P2G). Хімічна формула виробництва: CH ₄ +2H ₂ +O. Викиди вуглецю відсутні, однак добутий таким чином водень є доволі коштовним, 9 -10 дол. США/кг.
Білий H ₂	Відноситься до природного водню, що зустрічається в газоподібному стані в природі в геологічних формаціях (підземних покладах).
Золотий H ₂	Отримують ферментацією мікроорганізмами у виснажених свердловинах, що забезпечує низьковуглецевий або потенційно нейтральний процес виробництва.

Найбільш перспективним з погляду сталого розвитку є зелений водень, тоді як сірий і блакитний водень можуть розглядатися як перехідні варіанти на шляху до повної декарбонізації енергетики [7; 17; 22].

Зелений водень є одним із ключових видів палива в середньостроковій перспективі розвитку енергетичних систем, оскільки володіє високим потенціалом для декарбонізації промисловості, транспорту та електроенергетики, а також можливістю інтеграції з ВДЕ.

Виробництво зеленого водню сьогодні здійснюється шляхом електролізу води з використанням електроенергії з відновлюваних джерел і практично не супроводжується викидами діоксиду вуглецю, що відповідає цілям кліматичної нейтральності та сталого розвитку [7]. У середньостроковій перспективі (10–20 років) очікується зниження вартості електролізерів і відновлюваної електроенергії, що підвищить конкурентоспроможність зеленого водню порівняно з традиційними видами палива [27].

У цьому контексті особливого значення набуває оцінка технічного потенціалу зеленого водню та його співвідношення з майбутніми енергетичними потребами людства [7; 27].

Технічний потенціал зеленого водню визначається як максимально можливий обсяг його виробництва з використанням відновлюваних джерел енергії за умови врахування реальних обмежень. До таких обмежень належать природно-заповідні території, ліси, водно-болотні угіддя, населені пункти, території зі значними ухилами місцевості, а також регіони з обмеженою доступністю прісної води для електролізу. Як свідчать результати сучасних досліджень, навіть з урахуванням зазначених обмежень технічний потенціал зеленого водню є надзвичайно високим. За оцінками міжнародних енергетичних організацій, сукупний потенціал виробництва зеленого водню у світі майже у 20 разів перевищує прогнозований глобальний попит на первинну енергію у 2050 році [29, 22]. Це свідчить про доцільність розгляду виробництва зеленого водню як одного з ключових елементів майбутньої глобальної енергетичної системи та важливого інструмента досягнення кліматичної нейтральності.

Світовий досвід свідчить, що воднева енергетика поступово переходить від концептуального рівня до практичної реалізації (табл. 6).

Таблиця 6 – Світовий досвід впровадження водневої енергетики [8-11]

Регіон	Характеристика
Європейський Союз	Лідер у впровадженні водневої енергетики. В рамках Європейської водневої стратегії водень розглядається як ключовий елемент досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року. Основний акцент зроблено на розвитку зеленого водню, створенні водневої інфраструктури та інтеграції водню в енергетичні ринки. Значна увага приділяється розвитку водневих трубопроводів, використанню водню в промисловості та важкому транспорті. У рамках стратегій ЄС планується встановити десятки гігават електролізерів до 2030 року з метою виробництва мільйонів тонн водню на рік.
Німеччина	Однією з перших ухвалила Національну водневу стратегію, у межах якої водень визначено стратегічним енергоносієм для досягнення кліматичних цілей. Країна активно інвестує у виробництво зеленого водню, створення демонстраційних проектів та міжнародне співробітництво з країнами-експортерами водню.
Японія	Виступає піонером у впровадженні водню в транспортному секторі та енергетиці. Воднева стратегія країни передбачає широке використання водню в паливних елементах, розвиток водневих заправних станцій та імпорту водню з інших регіонів світу. Японія розглядає водень як основу майбутньої безвуглецевої економіки.
Південна Корея	Активно розвиває водневу енергетику в рамках концепції «водневого суспільства». Основна увага приділяється виробництву водневих транспортних засобів, розвитку інфраструктури та використанню водню в електроенергетиці.
Сполучені Штати Америки	Воднева енергетика розвивається як на федеральному, так і на регіональному рівнях. Програми підтримки спрямовані на зниження вартості зеленого водню, розвиток водневих кластерів та використання водню в промисловості та транспорті. Водень розглядається як важливий інструмент скорочення викидів парникових газів.
Австралія	Позиціонує себе як майбутній глобальний експортер зеленого водню завдяки значному потенціалу сонячної та вітрової енергетики. Країна активно інвестує в інфраструктуру виробництва та експорту водню до країн Азійсько-Тихоокеанського регіону.
Китай	Домінує у світовій сумарній потужності електролізерів та їх виробництві, що становить значну частку глобального ринку. Одним із прикладів індустріальних кластерів є Changzhou Hydrogen Bay – спеціальний економічний район у провінції Цзянсу з комплексною водневою інфраструктурою для випробувань та масового впровадження водневих технологій.
Близький Схід	Країни регіону виходять на міжнародну арену як нові центри виробництва «зеленого» водню. Зокрема в Саудівській Аравії планується побудувати один із найбільших у світі комплексів для виробництва зеленого водню та аміаку потужністю сотні тисяч тонн щорічно з використанням сонячної та вітрової енергії. Він реалізується за участю китайської компанії Sinopec Engineering Group у партнерстві з місцевими підприємствами.

Функціонування ринку водню, а також вимоги до операторів водневих трубопровідних мереж у країнах Європейського Союзу визначаються Директивою (ЄС) 2024/1788 та Регламентом (ЄС) 2024/1789. Зазначені нормативно-правові акти формують комплексну правову основу для розвитку водневої інфраструктури та інтеграції водню в єдиний енергетичний ринок ЄС.

Основні нормативні документи, що регламентують засади кліматичної нейтральності та водневої трансформації у деяких країнах світу представлені в табл. 7.

Таблиця 7 – Основні нормативні документи, що регламентують засади кліматичної нейтральності та водневої трансформації у деяких країнах світу [14; 15; 30; 33]

Країна	Назва документу	Рік
Україна	Воднева стратегія (проект)	2021
	Про відповідальне використання природних ресурсів (проект)	2021
	Про енергетичну ефективність (Закон України)	2022
	Стратегія низьковуглецевого розвитку України до 2050 року	2018
	Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року	2021
Японія	Japan's National Strategy for Hydrogen and Fuel Cell Technology	2014
Китай	Hydrogen and Fuel Cell	2002
США	United States National Hydrogen Technology Strategy	2003
Великобританія	Energy Act	2008
	UK hydrogen strategy	2022
Європейський Союз	Directive 2003/87/EC dated 13.10.2003 Regarding the establishment of a scheme to reduce greenhouse gas emissions by trading within the Community	2003
	The European Climate Change	2000
	Paris Climate Agreement	2015
	The European Green Deal	2020
	Strategy for Energy System Integration	2019
	A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe	2020
	"Fit for 55"	2021
Італія	Italian hydrogen strategy	2020
	Budget Law 2007 - Energy efficiency provisions	2007
Ірландія	Low Carbon Homes Program	2008
Угорщина	National Energy Conservation Program 2008 (NEP 2008)	2008
Франція	Retailer Sustainable Commerce Agreement	2008
	The French green hydrogen plan 2020-2030	2020
Німеччина	Renewable Energies Heat Act	2009
	The National Hydrogen Strategy	2022
Польща	Polish Energy Policy until 2030	2009
	"My Electricity" Program	2019
	Energy Plus Priority Program	2019
	Polish Geothermal Energy Plus Program	2019
	Energy Law	2021
	National Recovery Plan	2022
Іспанія	Spanish Strategy on Climate Change and Clean Energy 2007-2012-2020	2020
	Recovery, transformation and resilience plan / Modernisation of public administration (IV)	2021
	Spain 2050 strategy: circular and carbon-neutral economy	2021

Картосхема потенціалу сонячної та вітрової енергії у світі з приведеною вартістю виробництва чистого (зеленого) водню представлена на рис. 1.

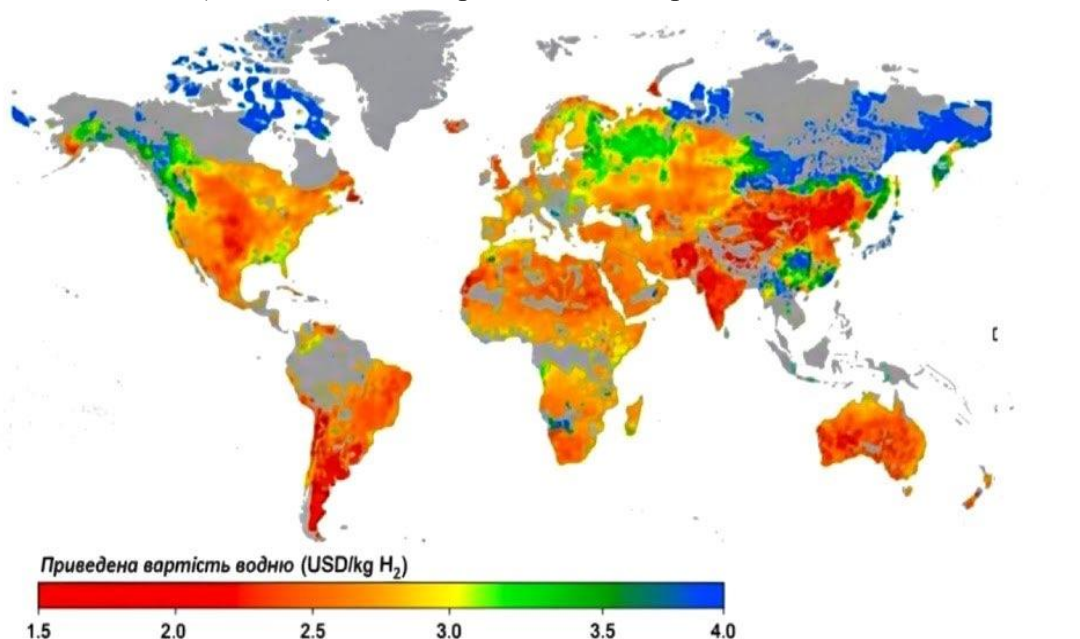


Рис. 1. Картосхема потенціалу сонячної і вітрової енергії у світі з приведеною вартістю виробництва чистого водню [16; 17; 21]

Центральне місце у цих планах займає розгортання електролізерів – установок, для вироблення водню за рахунок електролізу води, використовуючи ВДЕ [30]. Потужність вже наявних електролізерів у деяких країнах світу, за даними [31] представлена на рис. 2.

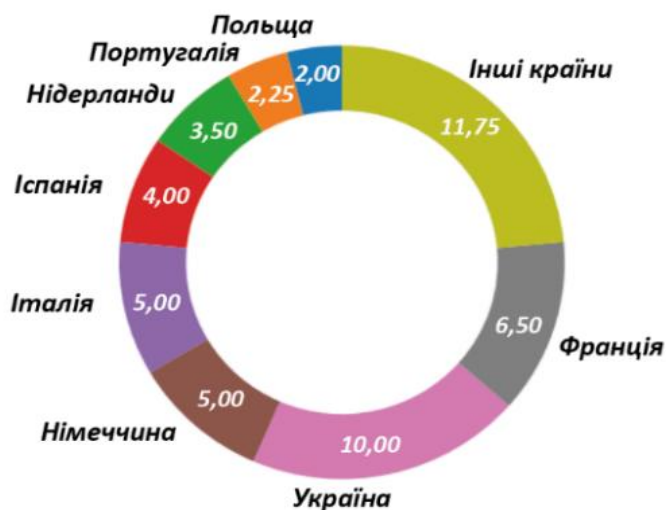


Рис. 2. Потужність наявних електролізерів у деяких країнах світу [33]

Провідні країни світу розглядають водень як стратегічний енергоносіє, здатний забезпечити декарбонізацію економіки, підвищення енергетичної безпеки та розвиток інноваційних технологій. Вони визначають водень ключовим елементом декарбонізації.

За оцінками Європейської комісії, попит ЄС на відновлюваний водень до 2050 року становитиме 20–30 млн т/рік.

Просторова локалізація ключових європейських проєктів використання низьковуглецевого або відновлюваного водню представлена на рис. 3.

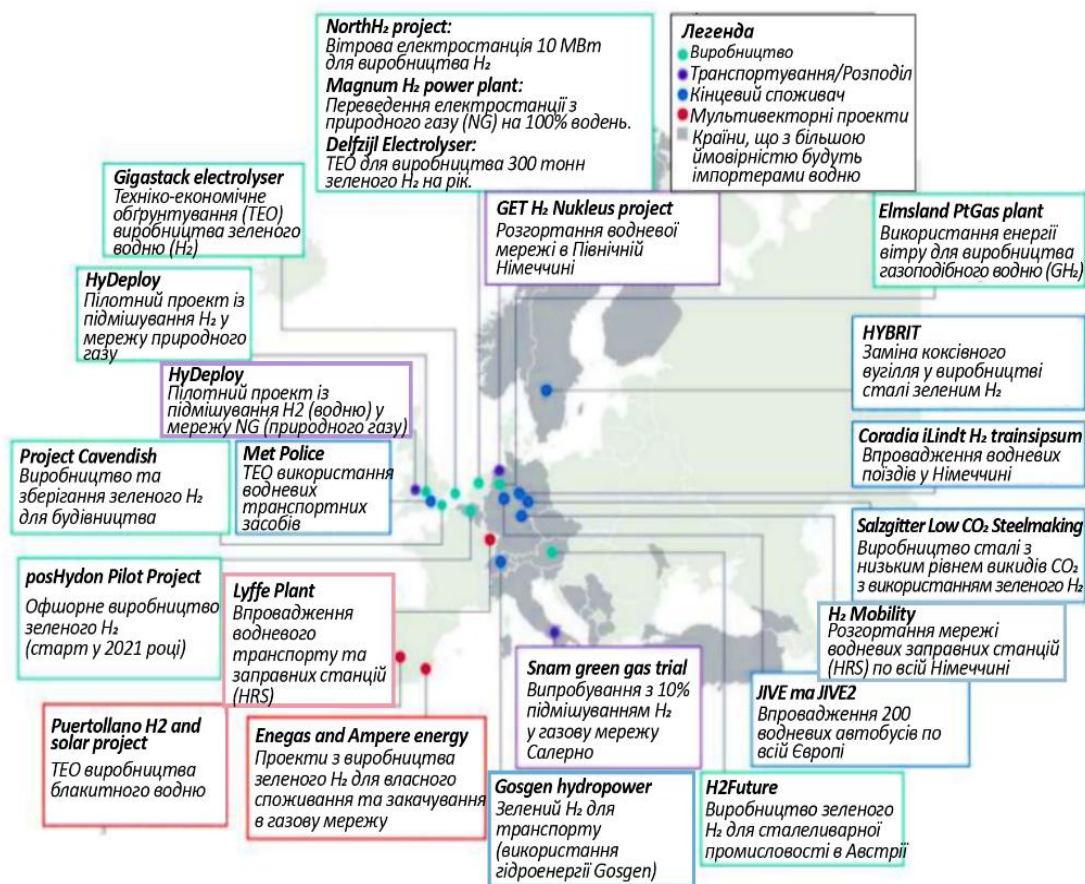


Рис. 3. Просторова локалізація ключових європейських проектів використання низьковуглецевого або відновлюваного водню

Джерело: розроблено авторами за джерелами [12; 13].

Україна має всі необхідні передумови, щоб стати пріоритетним партнером у виробництві зеленого водню: потужний ресурсний потенціал, вигідне географічне розташування, інфраструктуру та людський капітал.

За прогнозами, близько 75 % виробленого зеленого водню Україна експортуватиме до Європейського Союзу, тоді як решта обсягів використовуватиметься для задоволення внутрішніх енергетичних потреб країни [32]. Кількісна оцінка потенціалу виробництва зеленого водню базується на визначенні обсягів електричної енергії, що може бути вироблена з відновлюваних джерел, та ефективності процесу електролізу води.

Оцінка потенціалу України з виробництва зеленого водню. Україна має сприятливі умови для виробництва «зеленого» водню завдяки значному потенціалу вітрової та сонячної енергетики, розвинутій науковій базі, наявності промислових підприємств, які можуть бути модернізовані для нових потреб, а також вигідному географічному положенню на перетині енергетичних маршрутів між Сходом і Заходом. За оцінками Держенергоефективності, потенціал України з виробництва зеленого водню може досягати до 10 млн т на рік при повному використанні ВДЕ (табл. 8).

Таблиця 8 – Прогноз виробництва зеленого водню в Україні (за сценаріями)

Сценарій	Потужність ВДЕ (ГВт)	Виробництво H ₂ (млн т/рік)	Частка експорту (%)
Оптимістичний	30	8–10	70
Помірний	20	4–5	50
Обережний	10	1,5–2,5	30

Джерело: розроблено авторами.

Основними чинниками такого прогнозу виступають [25]:

- наявність понад 25 ГВт потенційної потужності ВДЕ;
- близькість до кордонів ЄС для експортних поставок;
- вже існуюча інфраструктура магістральних газопроводів.

Технічно-досяжний потенціал вироблення енергоносіїв з ВДЕ та альтернативних видів палива, становить понад 98,0 млн т у. п. на рік за даними [33] і представлений у табл. 9.

Таблиця 9 – Технічно-досяжний потенціал вироблення енергоносіїв з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива в Україні

№ з/п	Напрями освоєння ВДЕ	Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал, млн. т у. п.
1.	Вітроенергетика	28,0
2.	Сонячна енергетика, в тому числі	6,0
2.1.	– електрична	2,0
2.2.	– тепла	4,0
3.	Мала гідроенергетика	3,0
4.	Біоенергетика, в тому числі:	31,0
4.1.	– електрична	10,3
4.2.	– тепла	20,7
5.	Геотермальна тепла енергетика	12,0
6.	Енергія довкілля (теплові насоси)	18,0
Загальний обсяг заміщення традиційних ПЕР		98,0

Джерело: розроблено авторами.

Для аналізу перспектив розвитку водневої енергетики в Україні скористаємося SWOT-аналізом, який представлений на рис. 4.

Абревіатура SWOT походить від англійських слів: Strengths (сильні сторони), Weaknesses (слабкі сторони), Opportunities (можливості) та Threats (загрози)

SWOT-аналіз перспектив розвитку водневої енергетики в Україні

<p>S – Strengths (Сильні сторони) – значний потенціал відновлюваних джерел енергії (сонячної та вітрової), придатних для виробництва «зеленого» водню; – розгалужена газотранспортна система, яка потенційно може бути адаптована для транспортування водню або водневих сумішей; – вигідне географічне розташування поблизу основних ринків споживання водню в ЄС; – потужна промислова та інженерна база, наявність кваліфікованих кадрів; – інтеграція України в європейські енергетичні та кліматичні ініціативи.</p>	<p>W – Weaknesses (Слабкі сторони) – відсутність повноцінної національної водневої стратегії, завершеної нормативно-правової бази та стандартів; – високі капітальні витрати на виробництво, зберігання та транспортування водню; – обмежений внутрішній ринок споживання водню; – недостатній рівень інвестиційної привабливості через економічні та воєнні ризики; – низький рівень комерціалізації наявних наукових розробок.</p>
<p>O – Opportunities (Можливості) – зростання попиту на низьковуглецевий водень у країнах ЄС у межах Green Deal та Fit for 55; – можливість диверсифікації експорту енергоресурсів та зменшення залежності від традиційних палив; – отримання міжнародної фінансової та технічної підтримки (ЄС, ЄБРР, Світовий банк) ; – використання водню для декарбонізації промисловості, транспорту та енергетики; – створення нових високотехнологічних робочих місць і розвиток інноваційних кластерів.</p>	<p>T – Threats (Загрози) – тривала воєнна та геополітична нестабільність, ризики пошкодження інфраструктури; – конкуренція з боку інших країн-експортерів водню (Північна Африка, Близький Схід, Австралія) ; – технологічна невизначеність та швидка еволюція водневих технологій; – волатильність цін на електроенергію з ВДЕ; – можливе посилення регуляторних вимог ЄС до сертифікації водню.</p>

Рис. 4. SWOT-аналіз перспектив розвитку водневої енергетики в Україні
 Джерело: розроблено авторами.

SWOT-аналіз свідчить, що Україна володіє значними передумовами для становлення як важливого виробника та експортера «зеленого» водню, однак реалізація цього потенціалу потребує системних інституційних реформ, розвитку внутрішнього ринку та зниження інвестиційних ризиків. Максимізація можливостей можлива за умови активної інтеграції у європейський водневий ринок і цілеспрямованої державної підтримки.

Усе це свідчить про високі потенційні можливості виробництва зеленого водню в Україні.

Річний обсяг виробництва водню можна визначити за формулою:

$$M_{H_2} = \frac{E_{ВДЕ} \cdot \eta_{el}}{e_{H_2}},$$

де M_{H_2} – річний обсяг виробництва водню, т/рік;

$E_{ВДЕ}$ – річний обсяг виробництва електроенергії, з ВДЕ, кВт/рік;

η_{el} – коефіцієнт корисної дії електролізера (0,65-075);

e_{H_2} – питомі витрати електроенергії на виробництво 1 кг водню, кВт·год/кг (48-55).

Для розрахунків приймемо 50 кВт·год/кг, $\eta_{el}=0,7$.

Розрахунок технічно досяжного потенціалу ВДЕ України представлений в табл. 10.

Таблиця 10 – Технічно досяжний потенціал ВДЕ України

Вид ВДЕ	Потужність, ГВт	Середній коефіцієнт використання	Річне виробництво, ТВт·год
Сонячна енергетика	70–90	0,14–0,16	85–120
Вітрова (наземна)	60–80	0,30–0,35	160–220
Вітрова (офшорна)	20–30	0,40–0,45	70–100
Разом	150–200		315–440

Джерело: розроблено авторами.

Для оцінки перспектив виробництва водню в табл. 11 представлено три сценарії: базовий, помірний та інтенсивний.

Таблиця 11 – Сценарії виробництва зеленого водню в Україні

Показник	Базовий сценарій	Помірний сценарій	Інтенсивний сценарій
Потужність електролізерів, ГВт	30	50	80
Споживання електроенергії, ТВт·год/рік	150	250	400
Виробництво водню, млн т/рік	3,0	5,0	8,0
Частка експорту, %	70	75	75

Джерело: розроблено авторами.

Проте успіх буде залежати від комплексної державної політики та підтримки інвестицій у відповідну інфраструктуру та технологій, що відповідають європейським стандартам.

Картосхема газотранспортної системи України представлена на рис. 5.

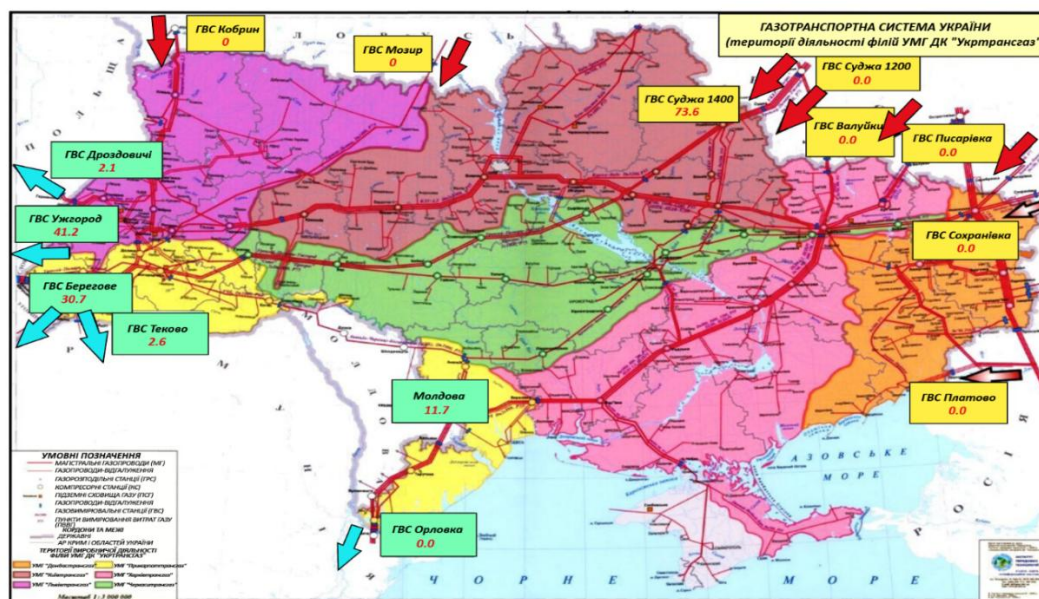


Рис. 5. Картосхема газотранспортної системи України [15]

Загальна технічна характеристика ГТС України представлена в табл. 12.

Протяжність газотранспортної системи України перевищує 38 тис. км, а активний обсяг підземних сховищ становить понад 30 млрд м³, що еквівалентно приблизно 2,7 млн т водню у разі переобладнання під його зберігання. Ці показники підтверджують статус України як стратегічного водневого хабу Європи.

Таблиця 12 – Загальна технічна характеристика ГТС України [15]

Довжина газопроводів	38,9 тис. км
Довжина магістральних трубопроводів	22,2 тис. км
Пропускна здатність на вході	288 млрд куб. м на рік
Пропускна здатність на виході	178,5 млрд куб. м на рік
Пропускна спроможність на виході до ЄС	146 млрд куб. м на рік
Кількість газотранспортних одиниць	702 шт.
Кількість компресорних станцій	72 шт.
Електрична потужність компресорних станцій	5448,0 МВт

Завдяки своїй географії та інфраструктурі, роль транзитного вузла реалізовуватиметься за напрямками, представленими на рис. 6.

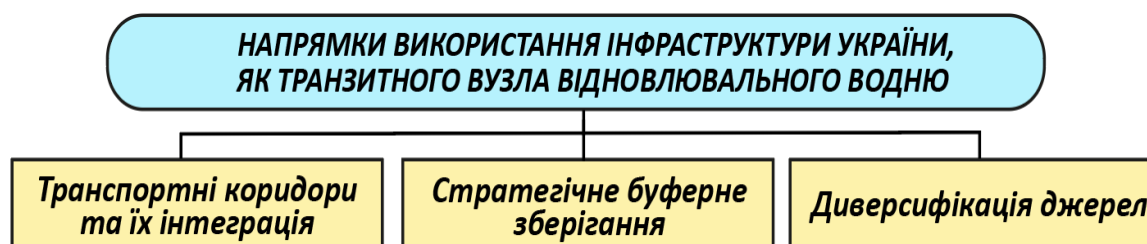


Рис. 6. Напрямки використання інфраструктури України як транзитного вузла відновлювального водню [15]

1. Транспортні коридори та їх інтеграція. Україна офіційно включена до карти European Hydrogen Backbone (ЕНВ). Це означає інтеграцію наших магістральних газопроводів до єдиної мережі, яка дозволить перекачувати водень з Південно-Східної Європи (зокрема, потенційного виробництва в Румунії та Болгарії) до Німеччини.

Крім того, технічно можливими вважаються такі варіанти:

– транспортування воднево-метанових сумішей (Blending) з концентрацією H_2 до 20 %;

– створення окремих водневих магістралей у межах міжнародних коридорів.

Як відомо, у межах європейської водневої інфраструктури ідентифіковано три основні трубопровідні коридори (північноморський, середземноморський та східний (український)), кожен з яких відіграє ключову роль у забезпеченні безперервності та надійності ланцюгів постачання водню в Європі (рис. 7).



Рис. 7. Коридори постачання водню в Європі [15]

Наявність розгалуженої мережі розподільних і магістральних трубопроводів у країнах Європи і в Україні загальною протяжністю 2,7 млн км, є важливим фактором формування єдиного європейського водневого ринку та зниження капітальних витрат на створення нової інфраструктури, за даними [18] представлена на рис. 8.

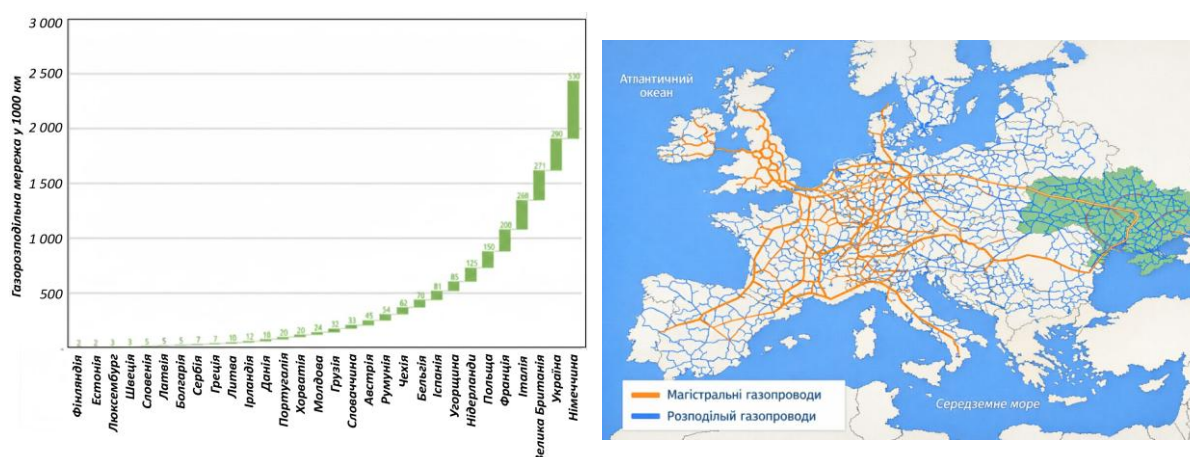


Рис. 8. Наявність розподільних і магістральних газових трубопроводів в Європі

Джерело: https://www.entsog.eu/sites/default/files/2023-01/ENTSOG_GIE_SYSDEV_2021-2022_1600x1200_FULL_240_clean.pdf.

У післявоєнний період Україна має реальні передумови відігравати не лише роль стратегічного транзитного вузла, а й бути значним виробником зеленого водню на європейському ринку. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA), технічний потенціал виробництва водню з відновлюваної енергії (сонячної та вітрової) становить

приблизно 18–38 млн тонн на рік, що відповідає величезному обсягу низьковуглецевого водню для внутрішнього використання та експорту. Цей потенціал базується на 1 300–2 300 ТВт·год/рік технічного потенціалу ВДЕ, який є більшим, ніж поточний обсяг електричної генерації до війни, і дозволяє реалізувати масштабні електролізні проекти.

За сценаріями розвитку, якими оперує ІЕА, проекти виробництва близько 2,5 млн тонн водню на рік (Мtpa) можуть приносити щорічні доходи близько 18–22 млрд дол. США за рахунок як експорту водню, так і суміжних продуктів (наприклад, зеленої сталі), залежно від структури продажу і використання частини водню для внутрішнього виробництва сталі чи інших продуктів. Частина цих доходів від самого експорту водню в ЄС може становити близько 3–5 млрд дол. щороку за очікуваних цін на рівні приблизно 3–4 дол. США за кг H₂.

Деякі оцінки подають ще більші значення: за іншими розрахунками, загальний потенціал виробництва зеленого водню в Україні може досягати майже 45 млн тонн на рік за повного використання доступних ресурсів і відповідної інфраструктури. Такі кількісні показники свідчать про те, що Україна може стати високопродуктивним виробником та потенційним експортером зеленого водню, а не лише транзитним хабом, за умови побудови достатніх електролізних потужностей та інтеграції до європейських ринків.

Ці прогнози узгоджуються із загальною тенденцією росту попиту на водень у Європі: загальний глобальний попит може досягти 430 млн тонн до 2050 року, з яких велика частина припадатиме на зелені джерела, а ЄС планує розширення електролізерних потужностей до 40 ГВт до 2030 року у рамках ініціативи 2×40 ГВт.

Крім того, в Україні є всі підстави стати енергетичним мостом, який з'єднає Каспійський регіон та країни Близького Сходу з промисловим серцем Європи.

Схема можливих маршрутів транспортування водню з України до ЄС представлені на рис. 9.



Рис. 9. Схема маршрутів транспортування водню з України до ЄС [14; 15].

Потенційні можливості транспортування водню з України за даними [18] представлені на рис. 10.

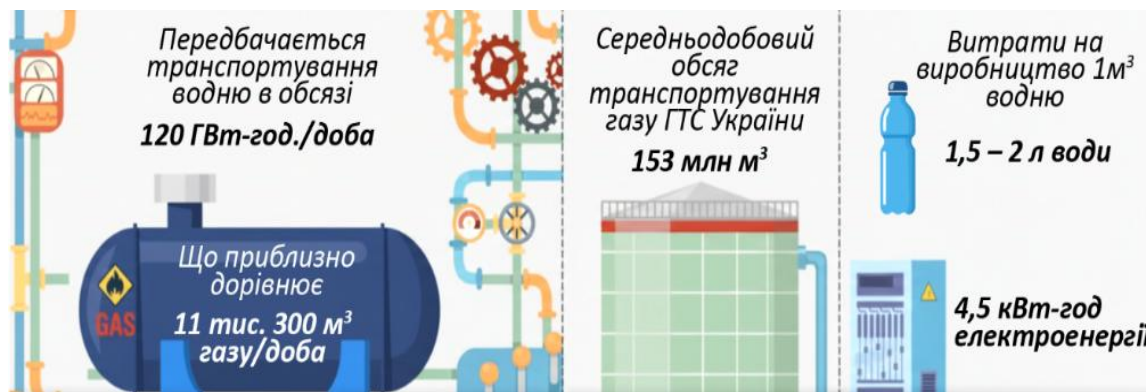


Рис. 10. Потенційні можливості транспортування водню з України [18]

Можливості виробництва водню по областях та регіонах України за даними [18] представлені на рис. 11.



Рис. 11. Потенційні можливості виробництва водню по областях та регіонах України [18]

2. Стратегічне буферне зберігання

Підземні сховища природного газу України місткістю становлять близько 30 млрд м³ є ключовими для стабілізації всього європейського водневого ринку.

Транзитний сервіс: Україна може пропонувати послугу «транзит + сезонне зберігання». Це дозволить європейським споживачам накопичувати водень влітку (коли сонячна генерація пікова) і отримувати його взимку.

Балансування мережі: Без українських сховищ європейській мережі ЕНВ буде вкрай важко підтримувати стабільний тиск при зростанні попиту.

3. Диверсифікація джерел

Україна може приймати водень, вироблений у Чорноморському регіоні (офшорна вітроенергетика), та спрямовувати його через Центральноєвропейський водневий коридор. Це може перетворити ГТС України на масштабну базу відновлюваних джерел, яка використовує лінії постійного струму надвисокої напруги (ПСНВН) для передачі чистої енергії електроенергії («Huawei»). Для реалізації цієї ролі необхідно забезпечити сертифікацію походження водню (Guarantees of Origin), щоб транзитний ресурс відповідав екологічним стандартам ЄС.

Крім того, навіть за наявності значного потенціалу та базових інфраструктурних передумов становлення водневої галузі неможливе без наявного фінансування, масштабних інвестицій, стабільного та передбачуваного бізнес-середовища, а також активного міжнародного партнерства [21].

При цьому цілі, потенціал, необхідні умови, ключові сфери застосування, поточні виклики переходу на водневу технологію в Україні представлені в табл. 13.

Таблиця 13 – Цілі, потенціал, необхідні умови, ключові сфери застосування, поточні виклики переходу на водневу технологію в Україні

Цілі	Україна має на меті стати значним гравцем на водному ринку, зменшуючи залежність від імпорту та сприяючи декарбонізації
Потенціал	Територія України може стати джерелом водню для власного споживання та експорту до ЄС, з можливим використанням газопроводів та газосховищ для транспортування.
Необхідні умови	Гармонізоване з європейськими нормами законодавство та прозорі процедури для отримання дозволів
	Стимулювання інвестицій у технології та інфраструктуру, включно з електролізерами потужністю до 10 ГВт до 2030 року
	Розвиток транспортування (наприклад, через газопровід "Прогрес") та зберігання (у підземних сховищах)
Ключові сфери застосування	Виробництво зеленого аміаку для агросектору, декарбонізація енергетики та промисловості, транспорт
Поточні виклики	Вартість виробництва залишається високою, що призводить до перегляду деяких проєктів
Стратегічні кроки	Підписання Україною угод про співпрацю (наприклад, з Європейським енергетичним співтовариством)
	Участь компаній («Нафтогаз», «Укртрансгаз») у міжнародних ініціативах, таких як «H2EU+Store»

Джерело: розроблено авторами.

Для того щоб українська ГТС стала повноцінною частиною європейського ринку, водень, що транспортується, має відповідати жорстким критеріям Директиви ЄС про відновлювані джерела енергії (RED II/III), представлених в табл. 14.

Технічні та правові критерії транспортування водню з України до країн ЄС. Розвиток водневої енергетики в Україні та її інтеграція до європейського енергетичного простору обумовлюють необхідність формування ефективної системи транспортування водню до країн Європейського Союзу. При цьому ключове значення мають технічні можливості існуючої та перспективної інфраструктури, а також відповідність правових і регуляторних механізмів вимогам законодавства ЄС.

Таблиця 14 – Критерії Директиви ЄС про відновлювані джерела енергії (RED II/III) [19]

Порогове значення викидів (Carbon Threshold)	Щоб водень вважався «зеленим» (RFNBO – відновлюване паливо небіологічного походження), він повинен забезпечувати скорочення викидів парникових газів щонайменше на 70% порівняно з викопним паливом.
	Весь життєвий цикл (виробництво + компресія для транзиту + втрати в трубах) має вкладатися в ліміт 3.38 кг CO ₂ /eq кг H ₂ .
	Важливо, щоб компресорні станції на маршруті транзиту водню працювали на електриці з ВДЕ або на самому водні, інакше "вуглецевий слід" під час транспортування перевищить норму.
Принцип «Додатковості» (Additionality)	Електроенергія для виробництва водню повинна братись з нових потужностей ВДЕ.
	Не можна використовувати старі ГЕС чи АЕС для виробництва транзитного водню, якщо передбачається його сертифікація за стандартами Європейської Комісії як RFNBO. <i>Примітка.</i> Якщо в енергосистемі частка ВДЕ перевищує 90%, вимоги до "додатковості" спрощуються.

Закінчення табл. 14

Часова та географічна кореляція	<i>Часова:</i> З 2030 року виробництво водню та споживання електрики з ВДЕ мають збігатися з точністю до однієї години. <i>Географічна:</i> Електролізер і джерело енергії мають перебувати в одній цінній зоні або в зоні з аналогічними цінами на мережу. Україна як транзитер має забезпечити технічний облік цих параметрів у режимі реального часу.
Система «Гарантій походження» (Guarantees of Origin – GO)	Оскільки водень у трубі фізично неможливо відрізнити (зелений він чи сірий), то ЄС використовує цифрові сертифікати. Україна повинна впровадити реєстр, сумісний з європейським стандартом EN 16325. При транзиті через підземні сховища газу (ПСГ) сертифікація має враховувати "змішування" ресурсів: якщо ви закачали 1000 т зеленого водню, ви можете викачати лише 1000 т із сертифікатом GO, навіть якщо в сховищі він перемішався з іншим газом.
Технічні стандарти чистоти	Європейські споживачі (особливо транспортний сектор) вимагають водень чистоти 99.9% (згідно з ISO 14687). Транзитна система України повинна гарантувати, що залишки метану чи мастила від компресорів не забруднять ресурс під час перекачування.

Транспортування водню як енергетичного ресурсу суттєво відрізняється від транспортування традиційних енергоносіїв, що зумовлює формування специфічних технічних і юридичних критеріїв.

Технічні критерії транспортування водню. Основним способом транспортування водню на великі відстані розглядається трубопровідна інфраструктура. Водночас використання існуючої газотранспортної системи України для транспортування водню обмежується низкою технічних факторів, серед яких визначальним є явище водневої крихкості металів. Водень здатний проникати у кристалічну структуру сталей, знижуючи їх механічну міцність і підвищуючи ризик утворення тріщин, особливо за умов високого тиску та тривалої експлуатації трубопроводів.

У зв'язку з цим можливість репрофілювання газопроводів для транспортування водню потребує детальної технічної оцінки, що включає аналіз марок сталей, стану зварних з'єднань, проектного тиску та віку інфраструктури. За оцінками європейських операторів, лише частина магістральних газопроводів може бути адаптована для транспортування водню у чистому вигляді, тоді як інші потребують глибокої реконструкції або заміни.

На перехідному етапі допускається сумішеве транспортування водню разом із природним газом (blending) у межах 5–20 % об'ємної частки водню. Такий підхід дозволяє поступово інтегрувати водень у газову інфраструктуру, однак він має суттєві обмеження, пов'язані зі зниженням теплотворної здатності газу, технічними характеристиками кінцевого обладнання та вимогами безпеки. Крім того, сумішеве транспортування не розглядається Європейським Союзом як повноцінний механізм експорту водню в контексті реалізації водневої стратегії ЄС.

Стратегічною метою є створення окремої водневої трубопровідної інфраструктури, інтегрованої до Європейської водневої магістралі (European Hydrogen Backbone). У цьому контексті Україна розглядається як потенційний учасник транс'європейських водневих коридорів, зокрема через напрямки Україна–Словаччина, Україна–Польща та Україна–Румунія. Реалізація таких проектів потребує значних інвестицій, розроблення нових технічних стандартів і довгострокового планування розвитку інфраструктури.

Юридичні та регуляторні критерії транспортування водню. Правове регулювання транспортування водню в Європейському Союзі формується в межах оновленого газово-водневого пакета законодавства, який передбачає створення окремого ринку водню та незалежної системи його транспортування. Важливою вимогою є принцип анбандлінгу, тобто відокремлення діяльності з транспортування водню від його виробництва та постачання. Крім того, передбачається недискримінаційний доступ третіх сторін до водневої інфраструктури та запровадження єдиних правил тарифоутворення.

Для експорту водню до ЄС визначальним є не лише факт його транспортування, а й відповідність критеріям сталості. Згідно з вимогами Директиви RED III, водень має бути класифікований як відновлюване паливо небіологічного походження (RFNBO). Це означає, що електроенергія для його виробництва повинна походити з відновлюваних джерел, має бути дотриманий принцип додатковості генерації, а також забезпечене мінімальне скорочення викидів парникових газів на рівні не менше 70 % у порівнянні з викопними видами палива.

Окремим юридичним інструментом підтвердження відповідності водню вимогам ЄС є система гарантій походження. Кожна одиниця експортованого водню повинна супроводжуватися цифровим сертифікатом, що забезпечує простежуваність походження енергії та прозорість ланцюга постачання. Для України це означає необхідність створення національної системи гарантій походження, гармонізованої з європейською системою сертифікації та визнаної інституціями ЄС.

Таким чином, транспортування водню з України до країн Європейського Союзу є комплексним процесом, що потребує одночасного виконання технічних, правових та екологічних критеріїв. Потенціал України як майбутнього експортера водню може бути реалізований лише за умови модернізації інфраструктури, гармонізації національного законодавства з правом ЄС та впровадження повноцінної системи сертифікації сталості водню. Врахування зазначених критеріїв є передумовою інтеграції України до європейського водневого ринку та підвищення її ролі у формуванні безвуглецевої енергетичної системи Європи.

Кроки, які зробила Україна на шляху до формування національної водневої стратегії представлені в табл. 15.

Війна відкинула нашу країну за різними оцінками на кілька десятиліть назад у своєму розвитку, тому Україна повинна рухатись значно швидше та будувати нову економіку відповідно до європейських стандартів [25].

Враховуючи наявність унікальної газотранспортної мережі, в Україні є всі можливості стати виробничим і транспортним хабом водню в ЄС. Модернізація наявної газової мережі має багато переваг, оскільки зменшує вплив на навколишнє середовище, прискорює процес одержання дозволів та зменшує витрати.

Крім того, Україна має значні водні ресурси, та високий сонячний та вітровий потенціал, що є необхідними умовами для виробництва зеленого водню.

Таблиця 15 – Кроки України на шляху до формування національної водневої стратегії [4]

Категорія	Опис ініціативи / проєкту
Ініціативи ЄС	Воднева стратегія для кліматично нейтральної Європи від 8 липня 2020 року, де Україна визначена як пріоритетний партнер
	Ініціатива 2×40 ГВт, згідно з якою Україна матиме 8000 МВт електролізних потужностей для зеленого водню та 1800 МВт для аміаку до 2030 року
	Звіт про інвестиції та підтримку зеленого водню, згідно з яким Україні потрібні інвестиції в розмірі 20,1 млрд євро для будівництва потужностей для електролізера потужністю 10 000 МВт
Національні ініціативи	Концепція водневої енергетики України до 2030 року — у розробці Міністерства енергетики
	H2U — Hydrogen Initiative Ukraine-Germany — міжнародна ініціатива з розбудови експортного потенціалу
Пілотні проєкти	Воднева економіка України — стратегічний документ, узгоджений із Зеленим курсом ЄС
	Repu Hydrogen (Одещина): пілотний проєкт з виробництва H ₂ із сонячної енергії
	Електролізери в Миколаївській області — у співпраці з Siemens Energy
	Проєкт із транспортування водню до ЄС через трубопроводи «Укртрансгазу»
	Прикордонний завод з виробництва водню в Західній Україні
	Центрально-європейський водневий коридор (Central European Hydrogen Corridor, CEHC) (будівництво трубопроводу)
	H2EU+Store (виробництво водню; транспортування; інтегрована інфраструктура та зберігання)
	Водневий вітровий та сонячний парк
KyivH2BUS. Впровадження водню на наземному дорожньому транспорті	

Потенціал виробництва водню представлений у табл. 16.

Таблиця 16 – Потенціал виробництва водню

Напрямок / Перевага	Детальний опис та очікувані результати
Зменшення залежності України від імпорту енергетичних ресурсів	Енергетична незалежність дозволить суттєво поліпшити стан платіжного балансу країни через зменшення імпорту.
Демоніполізація виробництва та розподілу електроенергії в країні	Виникнення конкуренції, збільшення інвестицій у розвиток і реконструкцію існуючої інфраструктури, підриєв монопольних позицій українських фінансово-промислових груп на енергетичному ринку, зменшення рівня цін на ринку.
Підвищення збалансованості в роботі енергетичної системи	Підвищення стабільності, зменшення дисбалансу: профіцит енергії влітку або вдень, коли на повну потужність працюють сонячні та вітроелектростанції. Як наслідок, виникає необхідність відключати від енергосистеми атомні станції та гідроелектростанції, що призводить до неефективного використання потужностей і до підвищення собівартості виробництва електроенергії. У такій ситуації виробництво «зеленого» водню може стати перспективним напрямом балансування потужностей в енергосистемі та способом накопичення і зберігання електроенергії в періоди її профіциту.
Можливість змінити роль газотранспортної системи України для європейського енергетичного ринку	Дослідження, які проведені за кордоном і в Україні, засвідчили, що «зелений» водень можна додавати до природного газу та транспортувати його наявними трубопроводами.
Унеможливлення корупції при обчисленні паливної складової в собівартості електроенергії	Покращення інвестиційного клімату.
Зменшення шкідливих викидів у НПС	Покращення екологічного стану НПС.
Створення нової експортної галузі за фінансової, технологічної підтримки ЄС та створення підтримуючих галузей, реконструкція енергетичної інфраструктури в Україні	Передбачається встановлення 10 ГВт потужностей вітро- та сонячних електростанцій, з яких 7,5 ГВт вироблятиме «зелений» водень для потреб ЄС.
Створення внутрішнього ринку водню за допомогою ЄС	Згідно зі стратегією «Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative» ЄС готовий надати допомогу в розвитку внутрішнього ринку виробництва, зберігання та використання водню (передбачається встановлення 2,5 ГВт потужностей вітро- та сонячних електростанцій для потреб внутрішнього ринку).
Створення нових робочих місць	Згідно з розрахунками міжнародних організацій, зокрема Global Wind Energy Council, 1 млн дол. США, які витрачені на створення відновлювальних джерел енергії, створює 7,49 постійних робочих місць, що в 3 рази більше порівняно з традиційною енергетикою — 2,66 робочих місця. Розрахунки, проведені в рамках ініціативи ЄС «Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative», також передбачають створення нових робочих місць для обслуговування електролізів, електростанцій і необхідної інфраструктури.

Джерело: розроблено авторами.

Перспективи впровадження водневих технологій в Україні представлені в табл. 17.

Таблиця 17 – Перспективи застосування водневих технологій в Україні

Декарбонізація важкої промисловості	Водень має вирішальне значення для галузей, які важко піддаються декарбонізації, таких як металургія та дальні перевезення (вантажів та пасажирів) авто- та авіаційним транспортом.
Інфраструктура	Існуючі газопроводи потенційно можуть транспортувати водень, зменшуючи витрати на нову енергетичну інфраструктуру
Технологічний процес	Зосередження уваги на підвищенні ефективності виробництва і зменшенням витрат є шляхом до реалізації повного потенціалу водню, як наріжного каменю стійкої енергетичної системи.

Джерело: розроблено авторами.

Висновки. Україна володіє значним технічним потенціалом виробництва зеленого водню, що базується на великих ресурсах сонячної та вітрової енергії, особливо у південних і східних регіонах країни. За сучасними оцінками, обсяги можливого виробництва можуть сягати 18–38 млн тонн водню на рік, що створює передумови для формування конкурентоспроможного водневого сектору.

Вигідне географічне положення України та наявність розгалуженої газотранспортної інфраструктури забезпечують можливість її трансформації з традиційного транзитного енергетичного вузла у виробничо-експортний центр зеленого водню для ринків Європейського Союзу.

Прогнозні сценарії розвитку водневої енергетики свідчать, що вже у середньо- та довгостроковій перспективі Україна може експортувати до кількох мільйонів тонн водню щорічно, забезпечуючи мільярдні валютні надходження та сприяючи інтеграції у європейський ринок низьковуглецевої енергії.

Реалізація водневого потенціалу України є можливою за умови масштабного впровадження відновлюваних джерел енергії, розвитку електролізних технологій, модернізації енергетичної інфраструктури та гармонізації національного законодавства з європейськими нормами у сфері кліматичної та енергетичної політики.

У післявоєнний період розвиток водневої енергетики може стати одним із ключових драйверів сталого відновлення економіки України, сприяючи декарбонізації промисловості, підвищенню енергетичної безпеки та формуванню нових конкурентних переваг держави на міжнародному рівні.

Список використаних джерел

1. World Health Organization. (2023). *Air pollution*. WHO. <https://www.who.int>.
2. European Environment Agency. (2023). *Air quality in Europe — 2023 report*. EEA. <https://www.eea.europa.eu>.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis report*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.
4. United Nations Environment Programme. (2023). *Emissions Gap Report 2023*. UNEP. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>.
5. International Energy Agency. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
6. Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.
7. International Energy Agency. (2019). *The future of hydrogen*. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
8. Victor, D. G., Geels, F. W., & Sharpe, S. (2019). Accelerating the low carbon transition. *Energy Policy*, 130, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.002>.

9. Коваленко, В. С., & Лисенко, О. М. (2021). Сучасні водневі технології в енергетиці. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (3), 10–18.
10. Бондаренко, О. В. (2020). Аналіз технологій отримання водню та перспективи розвитку водневої енергетики в Україні. *Вісник НТУ «ХПІ»*, (2), 15–22.
11. Шевченко, І. В., & Петренко, О. А. (2019). Перспективи використання водню в енергетичній системі України. *Наукові праці НУХТ*, 25(6), 45–52.
12. European Commission. (2019). *The European Green Deal*. <https://commission.europa.eu>.
13. European Commission. (2021). *Fit for 55: Delivering the EU's 2030 climate target*. <https://commission.europa.eu>.
14. Кабінет Міністрів України. (2021). *Стратегія екологічної безпеки та адаптації до зміни клімату на період до 2030 року*. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80>.
15. Міністерство енергетики України. (2023). *Енергетична стратегія України на період до 2050 року*. Київ.
16. Shabani, B., & Andrews, J. (2015). Hydrogen and fuel cells. In *Energy sustainability through green energy* (pp. 453–491). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2337-5_20.
17. Кудря, С. О. (2020). *Відновлювані джерела енергії*. Інститут відновлюваної енергетики НАН України.
18. Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972–974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>
19. Бойченко, С. В. (2018). *Енергетика майбутнього: водневі технології*. Наукова думка.
20. Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained* (2nd ed.). Wiley.
21. Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(3), 235–264. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00131-8](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00131-8)
22. Вернадський, В. І. (2004). *Хімічна будова біосфери Землі*. Наукова думка.
23. Кабата-Пендіас, А., & Пендіас, Х. (2010). *Геохімія слідів елементів у ґрунтах і рослинах*. Либідь.
24. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
25. Mason, B., & Moore, C. B. (1982). *Principles of geochemistry* (4th ed.). Wiley.
26. Kharel, S., & Shabani, B. (2018). Hydrogen is a long-term large-scale energy storage solution to support renewables. *Energies*, 11(10), 2825. <https://doi.org/10.3390/en11102825>.
27. International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen: A guide to policy making*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>.
28. Tröndle, T., Usher, W., Thurner, T., Staffell, I., & Gruber, G. (2020). *Spatially explicit analysis of the global technical potential of green hydrogen*. *Nature Energy*, 5, 764–775. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00780-7>.
29. Jacobson, M. Z., et al. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight energy. *Energy & Environmental Science*, 10, 1775–1800. <https://doi.org/10.1039/C6EE01283J>.
30. European Commission. (2020). *EU hydrogen strategy under the European Green Deal*. <https://ipcei.observatory.clean-hydrogen.europa.eu>.
31. Світовий банк. (2023). *Водень як шлях до декарбонізації: роль країн з перехідною економікою*. Washington, DC.
32. Slovo i Dilo. (2021, October 5). *Виробництво та експорт водню: які області України мають найбільший потенціал*. <https://www.slovoidilo.ua>.
33. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. (n.d.). *Потенціал відновлюваної енергетики*. <https://old.sae.gov.ua>.
34. NASA. (n.d.). *Global warming*. <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/global-warming/>.

References

1. World Health Organization. (2023). *Air pollution*. WHO. <https://www.who.int>.
2. European Environment Agency. (2023). *Air quality in Europe — 2023 report*. EEA. <https://www.eea.europa.eu>.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis report*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>.

4. United Nations Environment Programm. (2023). *Emissions Gap Report 2023*. UNEP. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>.
5. International Energy Agency. (2021). *Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector*. IEA. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
6. Dawood, F., Anda, M., & Shafiullah, G. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.
7. International Energy Agency. (2019). *The future of hydrogen*. IEA. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.
8. Victor, D. G., Geels, F. W., & Sharpe, S. (2019). Accelerating the low carbon transition. *Energy Policy*, 130, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.01.002>.
9. Kovalenko, V. S., & Lysenko, O. M. (2021). Suchasni vodnevi tekhnolohii v enerhetytsi. [Modern hydrogen technologies in the energy sector]. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia – Energy: economics, technology, the environment* (3), 10–18.
10. Bondarenko, O. V. (2020). Analiz tekhnolohii otrymannia vodniu ta perspektyvy rozvytku vodnevoi enerhetyky v Ukraini. [An analysis of hydrogen production technologies and the prospects for the development of the hydrogen energy sector in Ukraine]. *Journal of the National Technivcal University “Charkiv Polytechnics”*, (2), 15–22.
11. Shevchenko, I. V., & Petrenko, O. A. (2019). Perspektyvy vykorystannia vodniu v enerhetychnii systemi Ukrainy [The prospects for the use of hydrogen in Ukraine’s energy system]. *Scientific papers of the NUHT*, 25(6), 45–52.
12. European Commission. (2019). *The European Green Deal*. <https://commission.europa.eu>.
13. European Commission. (2021). *Fit for 55: Delivering the EU’s 2030 climate target*. <https://commission.europa.eu>.
14. Cabinet of the Ministers of Ukraine. (2021). Stratehiia ekolohichnoi bezpeky ta adaptatsii do zminy klimatu na period do 2030 roku [Strategy for Environmental Safety and Adaptation to Climate Change for the period up to 2030]. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1363-2021-%D1%80>.
15. Ministry of Energy of Ukraine. (2023). Enerhetychna stratehiia Ukrainy na period do 2050 roku [Ukraine’s Energy Strategy for the period up to 2050].
16. Shabani, B., & Andrews, J. (2015). Hydrogen and fuel cells. In *Energy sustainability through green energy* (pp. 453–491). Springer. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2337-5_20.
17. Kudria C. O. (2020). Vidnovliuvani dzherela enerhii. [Renewable energy sources.] *Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NAN Ukrainy. - Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine*.
18. Turner, J. A. (2004). Sustainable hydrogen production. *Science*, 305(5686), 972–974. <https://doi.org/10.1126/science.1103197>.
19. Boichenko, S. V. (2018). Enerhetyka maibutnoho: vodnevi tekhnolohii. [The energy of the future: hydrogen technologies]. *Naukova dumka – Scientific thought*.
20. Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel cell systems explained* (2nd ed.). Wiley.
21. Dunn, S. (2002). Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27(3), 235–264. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(01\)00131-8](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(01)00131-8).
22. Vernadskyi, V. I. (2004). Khimichna budova biosfery Zemli. - The chemical composition of Earth’s biosphere. *Naukova dumka – Scientific thought*.
23. Kabata - Pendias, A., & Pendias, H. (2010). *Heokhimiia slidiv elementiv u gruntakh i roslinakh [The geochemistry of trace elements in soils and plants]*. Lybid.
24. Greenwood, N. N., & Earnshaw, A. (1997). *Chemistry of the elements* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.
25. Mason, B., & Moore, C. B. (1982). *Principles of geochemistry* (4th ed.). Wiley.
26. Kharel, S., & Shabani, B. (2018). Hydrogen is a long-term large-scale energy storage solution to support renewables. *Energies*, 11(10), 2825. <https://doi.org/10.3390/en11102825>.
27. International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen: A guide to policy making*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Green-hydrogen>.
28. Tröndle, T., Usher, W., Thurner, T., Staffell, I., & Gruber, G. (2020). *Spatially explicit analysis of the global technical potential of green hydrogen*. *Nature Energy*, 5, 764–775. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00780-7>.

29. Jacobson, M. Z., et al. (2017). 100% clean and renewable wind, water, and sunlight energy. *Energy & Environmental Science*, 10, 1775–1800. <https://doi.org/10.1039/C6EE01283J>
30. European Commission. (2020). *EU hydrogen strategy under the European Green Deal*. <https://ipcei.observatory.clean-hydrogen.europa.eu>.
31. Svitovyi bank [World Bank]. (2023). *Voden yak shliakh do dekarbonizatsii: rol krain z perekhidnoiu ekonomikoiu [Hydrogen as a Path to Decarbonization: The Role of Transition Economies]*. Washington, DC.
32. Slovo i Dilo. (2021, October 5). *Vyrobnytstvo ta eksport vodniu:yaki oblasti Ukrainy maiut naibilshyi potentsial [Hydrogen Production and Export: Which Regions of Ukraine Have the Greatest Potential]*. <https://www.slovoidilo.ua>.
33. Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy [State Agency for Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine]. (n.d.). *Potentsial vidnovliuvanoi enerhetyky – The potential of renewable energy*. <https://old.sae.gov.ua>.
34. NASA. (n.d.). *Global warming*. <https://science.nasa.gov/earth/climate-change/global-warming/>

Дата першого надходження статті до видання: 12.12.2025
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 09.01.2026

UDC 620.92

Vitaliy Zatserkovny¹, Oleksandr Vasyliiev²

¹ Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vitalii.zatserkovnyi@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0003-5187-6125>. **ScopusID:** 57200165109

² graduate student 2-nd year of study, specialty 193 – Geodesy and Land Management of the Department of Geoinformatics
Taras Shevchenko National University (Kyiv, Ukraine)

E-mail: vasilyeva455@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0009-0009-2177-7859>

ASSESSING THE PROSPECTS FOR HYDROGEN ENERGY DEVELOPMENT IN UKRAINE

The development of the global energy sector based on fossil fuels leads to a significant increase in the concentration of carbon dioxide (CO₂) and other harmful substances in the atmosphere, causing negative impacts on natural ecosystems as well as human and animal health. The second major energy-related problem is associated with the influence of fossil fuels on global climate change, which manifests itself in rising average temperatures, an increasing frequency of extreme weather events, and the degradation of natural resources. The third problem is linked to the escalation of geopolitical conflicts driven by price volatility in global energy markets and the growing vulnerability of many countries due to their dependence on imported fuels. Therefore, the transformation of the energy sector towards the use of renewable energy sources (RES) and hydrogen energy is considered a key instrument for reducing negative environmental impacts, protecting public health, mitigating climate risks, and ensuring energy security for many countries worldwide.

Renewable energy sources (solar, wind, hydropower, and bioenergy) enable electricity generation with minimal or zero greenhouse gas emissions. Their large-scale deployment contributes to reducing dependence on fossil fuels and enhances the energy security and stability of national energy systems. However, renewable energy alone cannot ensure a continuous supply of the required amount of energy on a daily, seasonal, or annual basis.

Hydrogen energy, in turn, is regarded as a key element for integrating renewable energy sources into the energy system due to its ability to accumulate and store surplus “green” electricity during periods of excess generation and to utilize it during shortages. The synergy between renewable energy sources and hydrogen energy forms the foundation for building a climate-neutral energy system of the future, serving as one of the core instruments for decarbonizing the entire economy and a necessary condition for achieving carbon neutrality.

Hydrogen, due to its high energy conversion efficiency, is a promising energy carrier. The high efficiency of hydrogen technologies determines their significant potential in modern energy systems.

For Ukraine, hydrogen opens new opportunities, including the development of modern energy infrastructure, attraction of investments, job creation, strengthening of export potential, and integration into the European energy space. Moreover, the use of green hydrogen produced through electrolysis powered by renewable energy sources enables the decarbonization of economic sectors where direct electrification is technically or economically challenging.

Keywords: fossil fuels; renewable energy sources; hydrogen energy; hydrogen; carbon neutrality; energy efficiency.

Fig.: 17. **Table:** 17. **References:** 34.