

Актуальні питання нафтогазової галузі

УДК 622.691

DOI: 10.31471/1993-9973-2022-1(82)-7-33

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ СТАНОВЛЕННЯ І РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ В УКРАЇНІ

¹Я. В. Дорошенко, ¹М. О. Карнаш, ²С. М. Стецюк, ³Р. М. Бабельський, ⁴В. Б. Воловецький

¹ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: yaroslav.doroshenko@nung.edu.ua

²УкрНДІгаз; 61125, м. Харків, Гімназійна набережна, 20, тел. (057) 7304585,
e-mail: stetsyuk.sergey@ndigas.com.ua

³ТОВ «Оператор ГТС України»; 03065, м. Київ, проспект Любомира Гузара, 44,
тел. (044) 2397843, e-mail: babelskiy-rm@tsoua.com

⁴Науково-дослідний інститут транспорту газу; 61004, м. Харків, вул. Конєва, 16,
тел. (057) 3414906, e-mail: volovetckiy-vb@utg.ua

Сформовано бачення ролі водню в декарбонізації економіки України, забезпеченні стабільності та підвищенні гнучкості усієї енергетичної системи, розвитку відновлюваної енергетики. Обґрунтована доцільність трансформації газової галузі в напрямку водневої енергетики, доцільність її лідерства у процесі побудови водневої економіки. Визначено чинники, які будуть сприяти здійсненню такої трансформації. Розглянуто одні з найважливіших у світі пілотних проектів, які закладуть основи і дадуть старт світовій водневій енергетиці. Наведено дані провідних світових аналітиків щодо поточного стану водневої економіки та прогнози щодо її зростання. Розглянуто можливості України щодо становлення та розвитку водневої енергетики та визначено чинники, які створюють гостру необхідність дій в цьому напрямку. Описано проблемні питання старту водневої енергетики та дано рекомендації, як їх вирішити. Рекомендовано заходи, які треба здійснити, щоб скористатись вікном можливостей з експорту водню та зберігання вуглекислого газу, який буде отриманий під час виробництва низьковуглецевого водню як в Україні, так в Європейському Союзі. Наведено рекомендації щодо ключових напрямків виконання науково-дослідної роботи, розвитку освіти, щоб трансформувати газову галузь України в напрямку водневої енергетики. Розглянуто існуючі технології виробництва водню, їх позитивні, негативні сторони, можливості щодо ефективного розгортання. Порівняно різні технології виробництва водню, зроблено прогноз щодо їх перспектив. Розглянуто види транспорту водню серед яких акцент зроблено на трубопровідний транспорт. Зазначено яким критеріям повинна відповідати трубопровідна система, щоб транспортування водню було максимально ефективним. Обґрунтовано доцільність для транспортування газоводневих сумішей, чистого водню застосовувати газову інфраструктуру. Розглянуто вплив додавання водню в природний газ на якість газової суміші, режимні параметри транспортування, герметичність трубопроводів, компримування, редукування газової суміші, її підземне зберігання, безпеку та довговічність трубопроводів.

Ключові слова: декарбонізація, вуглецева нейтральність, енергетика, водень, природний газ, трансформація, інфраструктура, виробництво, транспортування, зберігання, використання.

Сформировано видение роли водорода в декарбонизации экономики Украины, обеспечении стабильности и повышении гибкости всей энергетической системы, развитии возобновляемой энергетики. Обоснована целесообразность трансформации газовой отрасли в направлении водородной энергетики, целесообразность ее лидерства в процессе построения водородной экономики. Определены факторы, которые будут способствовать такой трансформации. Рассмотрены одни из важнейших в мире пилотных проектов, которые заложат основы и старт мировой водородной энергетики. Приведены данные ведущих мировых аналитиков относительно текущего состояния водородной экономики и прогнозы ее роста. Рассмотрены возможности Украины по становлению и развитию водородной энергетики и определены факторы, создающие острую необходимость действий в этом направлении. Описаны проблемные вопросы старта водородной энергетики и даны рекомендации, как их решить. Рекомендуются меры, которые необходимо осуществлять, чтобы воспользоваться окном возможностей по экспорту водорода и хранению углекислого газа, полученного при производстве низкоуглеродистого водорода как в Украине, так и в Европейском Союзе. Приведены рекомендации по ключевым направлениям выполнения научно-исследовательской работы, развитию образования, чтобы трансформировать газовую отрасль Украины в направлении водородной энергетики. Рассмотрены существующие технологии производства водорода, их положительные, отрицательные стороны, возможности эффективного развертывания. Выполнено сравнение разных технологий производства водорода, сделан прогноз по их перспективам. Рассмотрены виды транспорта водорода, среди которых акцент сделан на трубопроводный транспорт. Указано каким критериям должна отвечать трубопроводная система, чтобы производство, транспортировка водорода была максимально эффективной. Обоснована целесообразность транспортировки газоводородных смесей, чистого водорода газовой инфраструктурой. Рассмотрено влияние добавления водорода в природный газ на качество газовой смеси, режимные параметры транспортировки, герметичность трубопроводов, компримирование, редуцирование газовой смеси, ее подземное хранение, безопасность и долговечность трубопроводов.

Ключевые слова: декарбонизация, углеродная нейтральность, энергетика, водород, природный газ, трансформация, инфраструктура, производство, транспортировка, хранение, использование.

The role of hydrogen in the decarbonization of Ukraine's economy, ensuring stability and increasing the flexibility of the entire energy system and the development of renewable energy has been established. The expediency of gas industry transformation in the direction of hydrogen energy and the expediency of its leadership in the process of building a hydrogen economy have been substantiated. Factors that will contribute to such a transformation have been identified. Some of the most important pilot projects in the world have been considered. They will lay the foundations and launch the world's hydrogen energy. The data on the current state of the hydrogen economy and forecasts of its growth provided by leading world analysts have been given. Ukraine's capabilities in the formation and development of hydrogen energy have been considered and the factors that create an urgent need for action in this direction have been identified. Problematic issues of hydrogen energy launch are described and recommendations for their solution are given. It is recommended to bring in measures to take advantage of the window of opportunities for hydrogen export and carbon dioxide storage, which will be obtained during the production of low-carbon hydrogen in both Ukraine and the European Union. Recommendations on key areas of research and development of education for the transformation of Ukraine's gas industry in the direction of hydrogen energy have been provided. The existing technologies of hydrogen production, their positive and negative sides and opportunities for effective deployment have been considered. Different technologies of hydrogen production have been compared and a forecast on their prospects has been made. Types of hydrogen transport have been considered, among which the emphasis is put on pipeline transport. It is indicated which criteria the pipeline system must meet in order for the production and transportation of hydrogen to be as efficient as possible. The expediency of using gas infrastructure for transportation of gas-hydrogen mixtures and pure hydrogen has been substantiated. The influence of adding hydrogen to natural gas on the quality of the gas mixture, transport parameters, tightness of pipelines, compression, reduction of the gas mixture, its underground storage, safety and durability of pipelines have been considered.

Keywords: decarbonization, carbon neutrality, energy, hydrogen, natural gas, transformation, infrastructure, production, transportation, storage, use.

Вступ

Водень є перспективним енергоносієм без шкідливих викидів в атмосферу, доступний для виробництва в необмеженій кількості у всьому світі з різних матеріалів, його можна транспортувати та зберігати, перетворити на тепло або електроенергію, використовувати в усіх видах транспорту, різних виробництвах. Також є перспективи з видобування водню. Тому все більше міжнародних організацій, урядів держав, провідних світових компаній прикладають зна-

чних зусиль щоб перейти від видобування, використання викопних джерел енергії (вугілля, нафти, газу тощо) до водню, що є одним з шляхів досягнення кліматичної нейтральності, декарбонізації світової економіки. Водень має значний потенціал стати товаром, який буде торгуватись в усьому світі з великим імпортом та експортом. Ці чинники призведуть до все більшої ролі водню в геополітиці, переформування енергетичних ринків. Сформується нові сильні гравці на енергетичних ринках та

стануть слабшими або й взагалі зникнуть сильні гравці сьогодення.

Щоб утримати зростання середньої світової температури на рівні нижче +2 °С від доіндустріального рівня та виконати свої зобов'язання в рамках Паризької угоди, усі розвинені держави визначили цілі щодо обсягу (відсотку) скорочення викидів парникових газів у короткостроковій перспективі до 2030 року та прагнуть досягти нульових викидів у довгостроковій перспективі до 2050 року. Так, для прикладу, до 2030 року Європейський Союз прагне скоротити викиди парникових газів мінімум на 50 % і до 55 %, Канада – на 30 %, Японія – на 26 %. Досягти таких цілей надзвичайно складно, оскільки гальмувати цей процес будуть економічний розвиток та приріст населення. Щоб все ж таки досягти таких зменшень викидів парникових газів у своїх Національних водневих стратегіях розвинені країни встановили водень одним із головних інструментів. Планується, що у довгостроковій перспективі економіка більшості розвинених країн буде живитись, в основному, електроенергією і виробленими із відновлюваних джерел енергії воднем.

Що ж до України, то у липні 2021 року уряд затвердив оновлений Національний внесок України до Паризької угоди, згідно з яким кліматичною метою нашої держави є скоротити до 2030 року викиди парникових газів до рівня 35 % порівняно з 1990 роком, що є свідченням того, що в нашій країні декарбонізація економіки є важливим орієнтиром в економічному розвитку на наступне десятиліття. На кліматичній конференції країн-учасниць Паризького договору та майже усіх учасників G20 у Глазго у листопаді 2021 року Україна приєдналася до глобальної ініціативи зі скорочення викидів метану "Global Methane Pledge". Така ініціатива започаткована ЄС і США і спрямована на досягнення скорочення викидів метану і посилення міжнародної співпраці у цьому напрямку. [1] Також у Глазго 140 країн поставили ціль досягнення вуглецевої нейтральності. Розвинуті країни до 2050 року, країни, що розвиваються, зокрема Україна, а також Китай (до 2060 року), Індія (до 2070 року). Передбачається якщо ці обов'язки будуть виконані то середня температура на Землі до кінця століття підніметься до +1,8 °С – +2,4 °С (на сьогодні вона складає +1,1 °С). Також у Глазго прийнято рішення щодо обмеження використання вугілля, на яке припадає наближено 40 % викидів CO₂, та припинення субсидування видобування викопного палива. Європейський Союз підтвердив, що буде слідувати зеленому курсу та введе у най-

ближчому майбутньому СВАМ (механізми прикордонного вуглецевого коригування), США та Велика Британія розглядають можливість впровадження такого ж типу обмежень. СВАМ – це своєрідний еквівалент платежу за парникові викиди, яку виробники певних товарів будуть платити у межах Європейської торгівлі викидами (ЄСТВ). Ставка СВАМ буде варіюватися та прив'язуватись до нинішньої вартості квоти на викиди в ЄСТВ, яка сьогодні уже перевищила 60 євро за тону. На початковому етапі СВАМ буде накладено на такі товари як сталь, чавун, цемент, мінеральні добрива, електроенергію, алюміній. У випадку введення СВАМ за підрахунками UBTA (Ukrainian Business & Trade Association) при чинній ставці ЄСТВ додаткові витрати українських експортерів будуть:

- у металургії – не менше ніж 500 млн євро на рік;
- цементна галузь – 30-50 млн євро на рік;
- виробництво добрив – до 20 млн євро на рік.

Також треба враховувати негативний ефект втрати частки на європейському ринку для наших виробників, які зіткнуться у процесі експорту із складними бюрократичними бар'єрами у розрахунках, верифікації та декларуванні викидів на своїх підприємствах. [2]

Для того, щоб декарбонізувати економіку України, водень повинен бути доступним і безпечним та повинен бути попит на нього. Потрібні дешеві і продуктивні технології виробництва водню, розвинена воднева інфраструктура, ринок водню або інтегрування водню в газовий ринок, ефективні і безпечні технології використання водню в усіх можливих сферах (побутове споживання, усі види транспорту, різноманітні виробничі процеси (металургія, цементна галузь, виробництво добрив, хімія тощо), генерування електроенергії), можливості експорту водню. При цьому доцільно водневу інфраструктуру максимально інтегрувати з електричною системою України. Така синергія дасть змогу забезпечити більшу стабільність, гнучкість енергетичної системи загалом, зберігати надлишки електроенергії протягом тривалого терміну, забезпечити можливість розвитку нестабільних відновлюваних джерел енергії.

Ці, а також цілий ряд інших причин, обумовлюють особливу актуальність накопичення знань щодо виробництва, транспортування, зберігання та використання водню, шляхів його синергії з електричними системами, що дасть змогу отримати розуміння та визначити, як діяти, щоб розгорнути пілотні демонстраційні

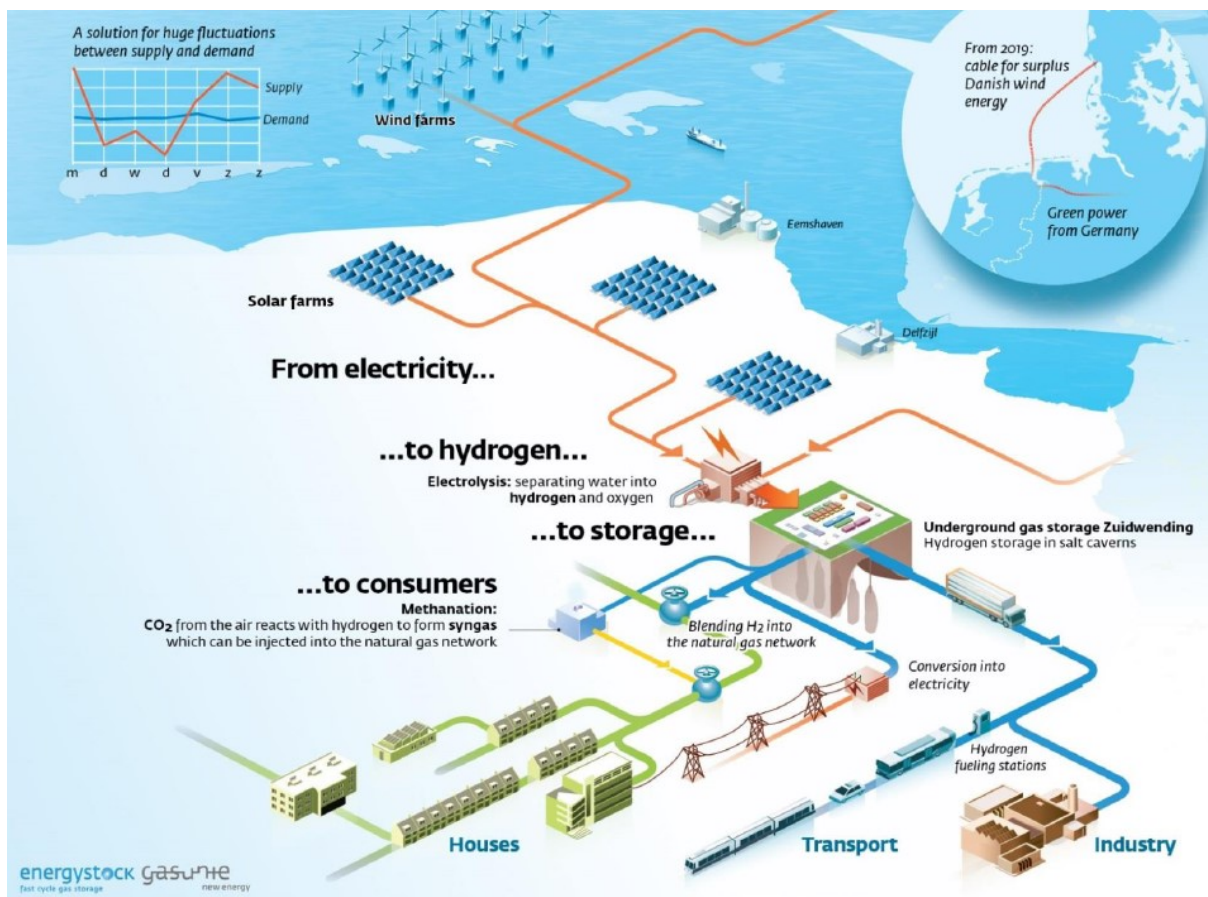


Рисунок 1 – Водневий хаб на півночі Нідерландів [11, 12]

проекти, які дадуть можливість отримати уміння, навички поводження з воднем, залучити іноземні інвестиції. Тоді треба масштабувати успішні проекти.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій

Для того, щоб мати розуміння, як буде відбуватись початок становлення і розвитку світової водневої енергетики, треба проаналізувати розроблені урядами багатьох провідних держав Національні водневі стратегії [3-9], плани великої кількості провідних світових компаній щодо водню. Так, для прикладу, консорціум нідерландських компаній Gasunie, Groningen Seaports і Shell Nederland, до якого в грудні 2020 року приєдналися норвезька Equinor і німецька RWE, спільними зусиллями мають намір створити в Північному морі вітропарк North₂ для живлення великої електролізної установки, яка буде побудована в нідерландському порту Емшавен для виробництва зеленого водню (рис. 1). Електростанція запрацює в 2027 році, після чого буде поступово розширюватися. Її початкова потужність складе 1 ГВт, в 2030-му вона повинна досягти 4 ГВт, а до 2040-го – 10 ГВт. У результаті North₂ вийде на виробництво 1 млн

тон зеленого водню на рік. Для транспортування і зберігання виробленого водню планується використовувати існуючу інфраструктуру газопроводу Gasunie. Споживачами будуть промислові кластери в Нідерландах і Німеччині, транспорт, газові турбіни, які будуть генерувати електроенергію, та житловий сектор (рис. 1). [10]

Нафтогазова компанія British Petroleum планує великий проект з виробництва зеленого водню в Тіссіді на північному сході Англії, який буде розроблятися в кілька етапів, починаючи з близько 60 МВт потужностей з виробництва водню 2025 року і досягне 500 МВт до 2030 року. Очікується прийняття остаточного інвестиційного рішення щодо проекту, який отримав назву HyGreen Teesside, у 2023 році. [13] Також British Petroleum у Тіссіді планує побудувати завод з виробництва синього водню потужністю 1 ГВт (проект H2Teesside). Інвестиційне рішення буде прийнято у 2024 році, а виробництво розпочнеться в 2027 році. ВР заявила, що водень, вироблений на об'єкті H2Teesside, може, серед іншого, забезпечувати енергією житловий сектор і промисловість та використовуватися як паливо для транспорту. Остаточне інвестиційне рішення щодо цього

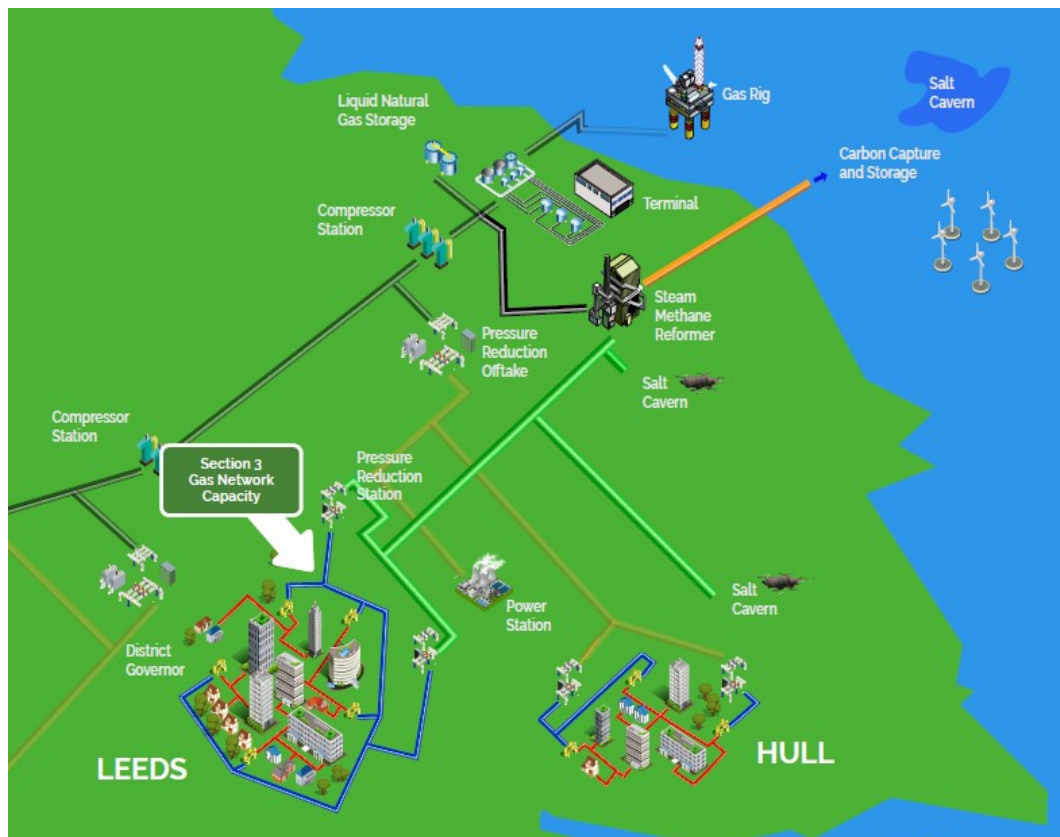


Рисунок 2 – Схема постачання міста Лідс воднем [17]

проекту буде прийнято у 2024 році [14]. Уряд Великобританії хоче до 2030 року мати 5 ГВт потужностей з виробництва низьковуглецевого водню [6].

В Іспанії американська енергетична компанія Cummins у співпраці з іспанським виробником та постачальником електроенергії Iberdrola побудує великий електролізний завод для виробництва водню потужністю 500 МВт із можливим розширенням до більш ніж 1 ГВт та вартістю 50 млн євро [15].

Норвезький нафтогазовий концерн Equinor та британська енергетична компанія SSE Thermal планують спільну побудову двох перших електростанцій на водню у британському регіоні Хамбер. Одна буде працювати на низьковуглецевому водню, виробленому з природного газу, а друга буде першою в світі великою електростанцією, яка буде працювати на зеленому водні [16].

Газову мережу Лідса, одного з найбільших міст Великобританії, заплановано перевести на 100 % низьковуглецевого водню до 2028 року (проект H21 Leeds City Gate). Водень буде вироблятися паровим риформінгом з природного газу і зберігатись у соляних покладах. Вуглекислий газ також буде зберігатись у соляних покладах тільки на дні моря (рис. 2) [17]. У Франції планується додавати до 20 % водню вироб-

леного з відновлюваної електроенергії в природний газ газової мережі міста Дюнкерк (проект GRHYD) [18, 19]. Такий ж обсяг водню в проекті HyDeploy передбачено додавати в природний газ газорозподільної мережі Кільського університету, який має найбільше університетське містечко у Великобританії [20, 21].

Плани виробництва водню з електроенергії ядерних міні-реакторів має компанія NuScale Power (США) [22]. Шведський консорціум H₂ Green Steel оголосив про плани відкрити завод із виробництва сталі в 2024 р., де буде використовуватися зелений водень. Це буде перше велике сталеплавильне підприємство, що не використовує викопне паливо [23]. Німецький концерн Siemens має намір інтегрувати технології вітряної турбіни і електролізера, щоб отримати турбіну, яка буде виробляти водень одразу ж біля турбіни [24]. Французький авіабудівний концерн Airbus в вересні 2020 року оголосив про проект ZEROe. До 2035 року планується створити сімейство пасажирських літаків з двигунами, що працюють на водні [25]. В Японії компанія Kawasaki співпрацює з компанією Shell над розробкою та запуском першого в світі транспортно судна для транспортування зрідженого водню [26]. Норвезька TECO Maritime Group в лютому 2021 р. оголосила про будівництво першої гігафабрики для забезпе-

чення судноплавної промисловості стабільними поставками зеленого водню і планує забезпечити більшу частину попиту європейського судноплавства [27]. В Австрії, Німеччині, Франції відбулися тестування французьких поїздів Alstom на водневих паливних елементах [28], а в Англії – HydroFLEX [29]. Японська корпорація Toyota вивела на ринок друге покоління автомобілів Toyota Mirai на водневих паливних елементах [30] та оголосила про початок випробувань двигуна внутрішнього згоряння (звичайного поршневого двигуна), що працює на водні [31].

Що ж до України, то компанія ДТЕК підписала угоду з Siemens Energy про пілотний проект з виготовлення зеленого водню. На Маріупольському металургійному комбінаті буде встановлено електролізер потужністю 8,5 МВт, вартість якого становить 25 млн євро. Зелений водень буде використовуватись для виробництва сталі з низьким викидом CO₂ [32]. Тести воднем пройшли п'ять моделей шафових газорегулюючих пунктів, виготовлених на заводах RGC Production у Львові та Дніпрі. Запуск такого обладнання в серію в перспективі дозволить експлуатувати газові мережі з доданням до природного газу 20 % водню. Також RGC Production планує почати випуск вузлів обліку газу та газорегуляторних пунктів блочного типу, які зможуть працювати з воднем [33].

За даним Hydrogen Council на сьогодні понад 30 країн мають водневі дорожні карти та заплановано і починають реалізуватись 228 великомасштабних водневих проєктів, оголошених по всьому ланцюжку створення вартості, з яких 85 % в Європі, Азії та Австралії. Якщо всі проєкти будуть реалізовані, загальні інвестиції досягнуть понад 300 мільярдів доларів до 2030 року, включно з 80 мільярдами доларів, які можна вважати такими, що мають остаточне інвестиційне рішення, або знаходяться в стадії будівництва, введені в експлуатацію або експлуатуються. Уряди усього світу виділили на згадані вище потреби понад 70 мільярдів доларів [34].

Прогнозується, що найближчим часом частка водню, виробленого з відновлюваних джерел електроенергії швидко зростатиме, що призведе до суттєвого зростання відновлюваної енергетики. Для прикладу у Європейському Союзі виробництво водню буде в основному базуватися на сонячній фотоелектричній базі в Іспанії та Італії та на основі офшорного вітру на Північному та Балтійському морях. Виробництво водню з відновлюваних джерел енергії та інтеграція його з існуючою газовою, елект-

ричною інфраструктурою, буде шляхом до розвитку водневої енергетики [35].

Формулювання цілей статті

Формування обізнаності для набування розуміння, як діяти, щоб трансформувати газову галузь України в напрямку водневої енергетики, формувати навички безпечного та ефективного виробництва, транспортування, зберігання та використання водню, забезпечити соціальне сприйняття водню. Розгляд технічних проблем, які можуть виникати під час переведення газової інфраструктури на транспортування газозводневих сумішей, чистого водню.

Виклад основного матеріалу

1. Виробництво водню

Водень у основному є зв'язаний з іншими елементами і міститься, для прикладу, у воді, метані тощо. Тому його треба вилучати з різних речовин, інших газів. Водень можна виробляти електродолізом із використанням електроенергії, отриманої від відновлюваних джерел. Це вітер (як на суші, так і в морі), сонце тощо та гідро чи атомних електростанцій. Також його можна виробляти з різних первинних ресурсів через термохімічну переробку природного газу, газифікацію вугілля, з вуглецем або без нього, біомаси (лісове господарство (залишки), солома тощо), з муніципальних відходів, у тому числі і пластмас. Ще водень отримують як побічний продукт різних промислових процесів. Виробництво водню може бути великомасштабне (централізоване виробництво) або розподілене на невеликих об'єктах поблизу або в місці його використання.

Залежно від технології виробництва водень умовно поділяють на кольори.

Зелений водень виробляється електродолізом води, якщо електроенергія для електродолізу застосовується виключно з відновлюваних джерел, що не містять викидів CO₂ (а в деяких випадках через інші шляхи, засновані на біоенергетиці, такі як біометан, риформінг або газифікація твердої біомаси). Вода розщеплюється на кисень і молекули водню електричним струмом. Для виробництва однієї тони водню потрібно наближено 55 МВт-год електроенергії. Потрібно наближено 9 л води для отримання 1 кг водню. Побічними продуктами є тепло і 8 кг кисню, який може збиратися та використовуватись в медичних цілях або в різних галузях промисловості [8]. Додатковою перевагою цієї технології є можливість отримання дуже високої чистоти водню (щонайменше 99,999 %, так званий водень 5,0) і він може бути використа-

ний будь-де без додаткового очищення [5]. На сьогодні в Європейському Союзі є понад 300 електролізерів, за допомогою яких виробляється менше 4 % від загального виробництва водню [3]. Одними з причин, чому на сьогодні виробляється така мала кількість зеленого водню, є висока вартість електролізерів, мала їх продуктивність та попит на електроенергію з відновлюваних джерел. Так, електролізер потужністю 1 МВт виробляє близько 200 м³ водню за годину, що становить тільки 480000 м³ за безперервну 100-денну роботу. На сьогодні така технологія є найефективнішою в регіонах, де є надлишок електроенергії з відновлюваних джерел і тоді виробництво водню дає змогу довгострокового зберігання енергії. Що стосується України, то уже сьогодні, коли частка енергії з відновлюваних джерел перевищила 10 %, енергетична система України не готова прийняти увесь обсяг енергії з відновлювальних джерел у пікові години генерування [36]. Електролізери на сьогодні є масштабовані, і багато виробників розробили їх контейнерними, що забезпечує легкість встановлення. З часом зелений водень буде ставати все більш економічно життєздатним через постійне зниження витрат на відновлювані джерела енергії та електролізери. Продаж кисню та використання відпрацьованого тепла може допомогти зменшити витрати виробництва.

Жовтий (або фіолетовий) водень виробляється електролізом води, якщо електроенергія для електролізу подається від ядерних реакторів. Великі реактори атомних електростанцій доцільні для великомасштабного централізованого виробництва водню в непіковий період навантаження на електричну систему. Малі модульні реактори є ще однією екологічно чистою перспективою для виробництва водню і більше будуть доцільні для розподіленого його виробництва. З 1 ГВт атомної потужності можна виробити приблизно 41000 тон водню протягом року. При цьому 70 % часу атомна станція працює на виробництво електроенергії, 26 % часу – на виробництво водню і 4 % часу відбувається простій на технічне обслуговування [37].

Синій водень виробляється з викопного палива (переважно природного газу, вугілля, сирого бітуму) паровим риформінгом (SMR) без викидів CO₂ в атмосферу. CO₂ відокремлюється і захоплюється та зберігається (технологія CCS) або захоплюється та використовується (технологія CCU). Такий водень відносять до низьковуглецевого викопного палива. При паровому риформінгу природний газ, який складається переважно з метану, реагує з парою під

високим тиском і при високій температурі. Природний газ використовується і як сировина, і як паливо для отримання пари. У цій реакції метан з'єднується з парою (з утворенням синтетичного газу, що складається з CO₂, CO і H₂). Синтетичний газ розділяють на складові, у тому числі водень. Хоча паровий риформінг найчастіше виконується з природним газом, він також може бути здійснений з більш важкими видами палива, такими як нафта та нафтовий бітум. Паровий риформінг метану в даний час вважається практичнішим, ніж газифікація вугілля. Порівняно з електролізом води обсяг виробництва паровим риформінгом значно більший. Великий завод парового риформінгу може виробляти приблизно 120-240 тон водню за добу. Для порівняння, електролізер фірми Nel ASA може виробляти до 8 тон водню на добу [8]. На ціну водню, який виробляється з викопного палива, впливає ціна на природний газ та ціна на довгострокове зберігання CO₂. Проте CO₂ можна зберігати в пористих осадових породах, у тому числі виснажених газових, нафтових родовищах, глибоких соляних пластах, соляних печерах і виробках, у вугільних пластах. На сьогодні в багатьох державах розглядається континентальний шельф моря як потенційно можливе сховище CO₂. Синій водень є найкращим варіантом у коротко- та середньостроковій перспективі, і дає змогу прокласти шлях до зеленого водню у довгостроковій перспективі. Причинами цього є те, що на сьогодні поширений та ефективний розвиток зеленого водню вимагає великої кількості відновлюваної електроенергії, що є проблемою в коротко- та середньостроковій перспективі, так як відновлювані джерела також потрібні для декарбонізації існуючого попиту на електроенергію. CO₂ від місць виробництва синього водню до місць довгострокового зберігання треба транспортувати у великих кількостях. Для цього може застосовуватись автомобільний, морський транспорт або трубопроводи. Найдешевшим транспортом CO₂ у великих кількостях є трубопровідний.

Сірий (або коричневий/чорний) водень виробляється паровим риформінгом із викопного палива (переважно природного газу та газифікованого вугілля) із викиданням CO₂ у процесі виробництва в атмосферу. Для отримання однієї тони водню з метану в атмосферу викидається дев'ять тон CO₂. Ціна сірого водню на сьогодні є найнижчою, але з часом буде збільшуватись через зростання цін на дозволи на викиди CO₂.

Бірюзовий водень виробляється шляхом термічного розщеплення метану (піроліз метану), де побічним продуктом є твердий вуглець, а не CO_2 . Піроліз метану є новітньою технологією і на сьогодні ще мало відпрацьованою. Для вуглецевої нейтральності процесу тепло для реактора високої температури повинно вироблятися з відновлюваних джерел або нейтральних до викидів вуглецю енергетичних джерел [4].

Також існує золотий водень або його ще називають "святим граалем чистої енергії" [38]. Це водень, який утворюється природним чином у глибинах земної кори. Родовища газоподібного водню можуть утворюватися в результаті ряду внутрішніх процесів у земних надрах і руху газу до дрібніших осадових порід, таких як вапняк і пісковик, до місць з наявними пустотами. Якщо ці резервуари вдасться відстежити, а золотий водень видобувати чистим і безпечним способом, то це буде надзвичайно стійка та прийнятна форма зеленої енергії [39]. Так, в Іспанії менше ніж за 100 км від Сарагоси було виявлено величезну кількість водню на декількох тисячах метрів під поверхнею землі. Таке родовище може зробити Іспанію першим справжнім виробником золотого водню в глобальному та комерційному масштабі [40].

Також водень можна виробляти з біомаси шляхом її газифікації, що є відновлюваним і вуглецево-нейтральним та життєздатним шляхом виробництва. Для газифікації біомаси застосовують високотемпературну пару і кисень з повітря, що дає змогу розщепити без згоряння біомасу на водень та інші продукти. Для цього сировиною можуть бути будь-які відновлювані органічні ресурси – сільськогосподарські або лісові відходи тощо. Рослини споживають CO_2 , а тому виділення CO_2 під час такого виробництва вважається вуглецево-нейтральним. За допомогою паровому риформінгу водень також можна отримати з біогазу.

При паровому риформінгу, використовуються газ, а для електролізу – електрика. Різні тенденції цін на газ і електроенергію можуть призвести до різних тенденцій витрат на виробництво водню в майбутньому. Інші чинники, які впливають, це тенденції вартості зберігання CO_2 та вартості електролізерів, доступ до інфраструктури природного газу. У деяких випадках на вартість може впливати велика віддаль між виробниками та споживачами, що може призвести до збільшення транспортних витрат. Також може бути необхідно зберігати водень. Будь-яке великомасштабне виробництво водню електролізом потребує доступу до великих об-

сягів відновлюваної енергії. Для менших обсягів водню, розподіленого між кількома кінцевими споживачами, наприклад, для транспортних засобів або суден, електроліз може бути дешевшим, з точки зору ланцюга створення вартості. Електролізні установки також мають ту перевагу, що вони є модульними, що дає змогу їх відносно легко масштабувати та налаштовувати відповідно до попиту. Тобто який метод виробництва має найменші загальні витрати, буде залежати від географічного розташування, наявної інфраструктури, передбачуваного попиту і ціни на електроенергію та газ. За оцінками, вартість виробництва зеленого водню може впасти на 30 відсотків до 2030 року в результаті падіння витрат на відновлювані джерела енергії та розширення виробничих потужностей.

На сьогодні щорічно у всьому світі використовується близько 70 мільйонів тон водню, в основному в хімічній промисловості та нафтопереробці. Основна маса водню у всьому світі виробляється з природного газу (76 %), 23 % – з вугілля. Усе це супроводжується значними викидами вуглекислого газу в атмосферу. У глобальному масштабі це наближено 830 мільйонів тон CO_2 на рік, що наближено еквівалентне загальній кількості парникових газів, які викидає, для прикладу, Німеччина за рік, яка має одну з найпотужніших економік у світі. Тільки 1 % водню в світі виробляється електролізом води. У Європі на сьогодні наближено 90 % водню виробляється з природного газу в основному без зберігання CO_2 [8].

2. Транспортування водню

Транспортувати водень від місць виробництва до місць споживання можна трубопроводами, а також у вигляді газу в цистернах високого тиску, як зріджений газ у термоізольованих цистернах, як водень перероблений в метанол або аміак у рідкій формі або хімічно розчинений у середовищі-носії з використанням так званого "рідкого органічного водню". Аміак може містити понад 17 % водню. Газоподібний водень перетворюється в рідку форму у разі його охолодження до -253°C .

Якщо в регіоні є постійний попит на водень, найдешевшим видом його транспортування є трубопровідний транспорт. Якщо попит не постійний, дешевше використовувати вантажівки, залізничні цистерни. Для транспортування на дуже великі віддалі (понад кілька тисяч кілометрів), міжконтинентального транспортування зручнішим є морський транспорт, а водень доцільно зріджувати.

2.1. Трубопровідний транспорт водню

Найкращою та найекономічнішою основою для початку розвитку водневої інфраструктури є розгалужена газотранспортна система, на зразок української, яка інтегрована з міжнародними енергетичними ринками та поєднана з розгалуженими газовими мережами, сховищами газу, які в довгостроковій перспективі можна буде перетворити на сховища водню, газовими родовищами (у тому числі виснаженими). Така газова інфраструктура може бути ефективно використана для транспортування водню як внутрішнім споживачам, так і на експорт та накопичення великої кількості енергії трансформованої в водень. Також в короткостроковій і середньостроковій перспективі для транспортування і зберігання CO₂, отриманого в результаті виробництва синього водню як внутрішніми виробниками, так і зарубіжними.

У разі транспортування водню трубопроводом можна досягти передавання дуже великої кількості енергії. Лінії електропередачі є важливими для транспортування відновлюваної енергії між країнами, але магістральний трубопровід може передавати до десяти разів більше енергії, ніж подвійна лінія електропередач на 380 кіловольт потужністю 1,5 ГВт [8].

Газова інфраструктура спроектована та побудована для транспортування природного газу і не може бути використана для транспортування чистого водню без модифікації, заміни окремих компонентів, змін в її експлуатації та технічному обслуговуванні. Причинами цього є густина водню, його теплотворна здатність, енергія займання, межі вибуховості в повітрі, швидкість горіння та висота полум'я. Навіть додавання незначного відсотка водню до природного газу матиме вплив на горіння, дифузію в стінку труби і, як наслідок, на механічні властивості сталі.

Поточні оцінки експертів свідчать, що капітальні витрати на перебудову існуючих газопроводів становлять 10-25 % від вартості будівництва нових трубопроводів для транспортування водню. Крім того, для будівництва нової інфраструктури для водню треба багато часу, що значно уповільнить темпи декарбонізації економіки, зменшить конкурентні можливості України щодо експорту водню оскільки за час будівництва нової інфраструктури для водню Європейські ринки можуть бути зайняті іншими країнами. Тому найдешевше і найдоцільніше діяти в напрямку переведення існуючої газової інфраструктури спочатку на транспортування газоводневих сумішей, а згодом чистого водню. Щоб перейти до 100 % водню, більша

частина системи транспортування та частина системи розподілу природного газу потребуватиме значного оновлення, більшість приладів споживання треба замінити. Також додавання водню до природного газу, транспортування газопроводами чистого водню матиме вплив на ефективність чинних стандартів та норм. тож їх треба оновлювати, розробляти нові. Очевидно, що для транспортування і зберігання водню потрібне розроблення нової нормативної бази.

В Україні розвинена інфраструктура для транспортування природного газу та його розподілу (розгалужені газові мережі), яка може бути надзвичайно важливою у постачанні водню споживачам. Такі мережі є доступними, соціально прийнятими та можуть бути поступово переведені на роботу з воднем у разі вкладання невеликих інвестицій. Європейський водневий альянс презентував перше дослідження готовності розподільних мереж до транспортування водню в 16 країнах ЄС. Дослідження показує, що 96 % від загальної протяжності мереж країн Європи готові до транспортування водню, окрім обладнання. До уваги не бралися газорозподільні мережі України та Польщі, де ще тривають дослідження [41].

Доцільно у коротко- і середньостроковій перспективі природний газ у мережах перевести на суміш природного газу, водню та біометану, що буде підготовкою до транспортування чистого водню в довгостроковій перспективі. Зелений водень, вироблений з надлишків відновлюваної електроенергії і доданий в мережу природного газу, називають доданою потужністю до газу (P2G).

Хоча змішування водню з природним газом, як очікується, буде перехідним рішенням, воно має численні переваги, які мають значення в контексті водневої стратегії:

- у коротко- та середньостроковій перспективі дасть змогу досягти скорочення викидів парникових газів за незначні витрати;
- дасть змогу нарощувати потужності з виробництва водню, що сприятиме позитивному розвитку водневого бізнесу;
- підвищить загальносистемну стійкість енергетики шляхом інтеграції надлишку відновлюваної електроенергії, що зменшує перевантаження електромереж та дасть змогу розвиватись зеленій енергетиці;
- надасть швидкий та економічно ефективний доступ до ринку для децентралізованих виробників водню, які будуть розміщувати свої підприємства у районах розташування потужних відновлюваних джерел енергії, але віддалених від центрів споживання.

Максимальний відсоток водню, який можна додавати до природного газу для забезпечення ефективних показників його використання, залежить від типу та стану технічних засобів для споживання та технічного стану газової мережі. Доцільним є розроблення для операторів методології, яка дасть змогу оцінювати ризики, які будуть виникати через додавання водню до газових мереж та визначати відсоток водню, який можна додати до природного газу газової мережі без негативних впливів на безпеку та ефективність споживання, герметичність і довговічність трубопроводів. На сьогодні у різних країнах у нормативних документах встановлено різний мінімальний і максимальний вміст водню у природному газі. В США встановлено обмеження вмісту водню в природному газі від 5 % до 15 %. Кілька європейських країн встановили обмеження вмісту водню в трубопровідних системах природного газу від 0,1 % до 12 % [42]. У стандартах Німеччини встановлено обмеження вмісту водню в природному газі до 5 %, з потенціалом збільшення до 20 % [43].

За результатами нещодавніх досліджень, виконаних РГК України, встановлено, що якщо вміст водню в природному газі становить до 20 %, то вплив на процеси транспортування, обліку та спалювання такої суміші практично відсутній. Причому усі газові прилади, які тестували, можуть працювати із сумішшю, у якій до 30 % водню. Деякі з них з певними обмеженнями можуть працювати, коли вміст водню становить до 50 %. Єдиним обладнанням, яке не витримало тестування на роботу з воднем, були конвектори. У такому обладнанні виникла проблема з утворенням великої кількості вологи в камері згоряння [33].

Частка водню в природному газі 20 % дає змогу зменшити викиди вуглекислого газу під час спалювання суміші на 7-8 % [44].

Змішування природного газу з воднем має сенс, коли обсяги виробництва водню невеликі. Коли обсяги водню збільшаться, тоді як обсяги транспортування газу зменшаться, необхідний буде трубопровідний транспорт водню, який спочатку з'єднає промислові кластери, а пізніше з'явиться регіональна, а далі національна воднева інфраструктура.

Додавання водню до природного газу впливає на фізичні та хімічні властивості суміші, та може вплинути на:

- якість газової суміші;
- режимні параметри транспортування;
- герметичність трубопроводів;
- компримування;
- редукування;

- підземне зберігання;
- безпеку транспортування, розподілу, споживання;
- довговічність трубопроводів.

2.1.1. Якість газоводневої суміші

Водень є чудовим паливом за своїми енергетичними характеристиками і екологічно нешкідливим. Під час згоряння водень виділяє тільки водяну пару.

Додавання водню до природного газу суттєво погіршує енергетичні характеристики і теплотворну здатність природного газу, тому газоводневі суміші можуть бути ефективними тільки коли водень отримується в результаті перетворення надлишкової електроенергії, виробленої відновлюваними джерелами. Тоді збитки будуть меншими за ті, які були б у результаті втрати надлишкової електроенергії. Якщо ж воднем буде замінено природний газ, то обсяг водню, який буде надходити до кінцевого споживача, повинен задовольняти необхідним йому енергетичним потребам.

Для визначення чи здатний водень переносити в трубопроводі енергію, еквівалентну природному газу, потрібне пояснення двох термінів:

- *вища теплотворна здатність* (ННВ) (відомо як загальна теплотворна здатність або валова енергія) визначається як кількість теплоти, що виділяється певною кількістю палива після згоряння і повернення продуктів згоряння до температури 25 °С;

- *нижче значення нагрівання палива* (CV або LHV) (також відоме як чиста теплотворна здатність), визначається як кількість теплоти, що виділяється певною кількістю палива після згоряння і повернення продуктів згоряння до температури 150 °С.

Ефективність спалювання газоводневих сумішей залежить від якості місцевого природного газу (діапазон і поточне значення індексу Воббе) та від того, наскільки якісно відрегульована побутова техніка.

Індекс Воббе є основним показником горіння газу

$$W = \frac{H_s}{\sqrt{d}}, \quad (1)$$

де W – індекс Воббе, МДж/м³;
 H_s – вища теплотворна здатність, МДж/м³;
 d – відносна густина газу за повітрям [45].

Для сумішей водень-природний газ індекс Воббе рівний

$$W = \frac{H_{s,C}}{\sqrt{d_C}} = \frac{H_{s,ПГ} + H_{s,В}}{\sqrt{d_{ПГ} + d_B}}, \quad (2)$$

де $H_{s,c}$ – вища теплотворна здатність суміші;
 $H_{s,пг}$ – вища теплотворна здатність природного газу (таблиця 1.1);
 $H_{s,в}$ – вища теплотворна здатність водню (таблиця 1.1);
 d_c – відносна густина суміші за повітрям;
 $d_{пг}$ – відносна густина природного газу за повітрям (таблиця 1);
 d_v – відносна густина водню за повітрям (таблиця 1).

Таблиця 1 – Порівняння фізичних властивостей водню і природного газу

Газ	H_s , МДж/м ³	Густина, кг/м ³	Відносна густина за повітрям
Водень	13	0,084	0,07
Природний газ	40	0,65	0,55

Індекс Воббе є мірою взаємозамінності газів і вказує на вплив зміни складу газу на споживання тепла побутовою технікою у разі постійного подавання газу під тиском. Чим більший індекс Воббе, тим більша теплова цінність газу, який буде протікати через отвір заданого діаметру за певний проміжок часу. Теплотворна здатність суміші та індекс Воббе є функцією вмісту водню в природному газі.

Індекс Воббе особливо корисний для порівняння газоподібних паливних сумішей і його застосовують для побутової техніки у разі взаємозаміни природних газів, а також у разі змішування водню і природного газу.

Розглянувши рівняння (1) та (2), наведені в таблиці 1 значення вищих теплотворних здатностей, можна зробити висновок, що для задоволення тієї ж самої потреби в енергії обсяг транспортованого водню повинен втричі перевищувати обсяг природного газу. Вища теплотворна здатність природного газу складає 40 МДж/м³, що наближено втричі більше за теплотворну здатність водню, яка складає 13 МДж/м³, тому у разі однакового тиску потрібен трикратний об'єм водню щоб кількість енергії була однаковою. Однак, густина природного газу наближено в дев'ять разів більша, ніж водню, а отже, якщо витрата водню буде втричі більша, ніж природного газу падіння тиску природного газу та водню в трубопроводі буде наближено однаковим.

Якщо вміст водню в природному газі більший 20 %, вища теплотворна здатність є меншою 35 МДж/м³. Таким чином, природний газ втрачає свою теплотворну здатність (нижче значень, встановлених нормами та стандарта-

ми), хоча індекс Воббе залишається в межах норми. Отже, додавання водню до природного газу стане причиною значної зміни якості газу, який будуть споживати споживачі [46].

Ще однією проблемою є те, що все більше великих газових мереж різної конфігурації під'єднуються до кількох точок входу. Наслідком цього є те, що в розподільних мережах можуть виникати різні газові суміші, які мають різну якість. Тому потрібне створення пунктів визначення якості газу. У такому випадку на вході в газову мережу пункти визначення якості газу є не раціональним. Доцільним є створення пунктів визначення якості газу на місцевому рівні розподілу. Також важливим є вибір місця закачування водню в газову мережу, якою транспортується природний газ. Вибір місця закачування водню матиме значний вплив на те, як гази різної якості змішуються і розподіляються всередині мережі. Оператори газових мереж повинні визначити найкраще обґрунтоване технічне та економічне рішення для закачування.

Коли водень закачувати в мережу природного газу, буде погіршуватись якість газової суміші. Тому об'єм водню, який потрібно закачати, обмежується витратою природного газу. Чим більша витрата природного газу, тим більша витрата водню можлива. У будь-який момент часу треба переконатися, що коли водень закачується в природний газ, теплотворна здатність та інші параметри якості газоводневої суміші повинні бути в межах специфікації якості газу мережі [47].

Різні якості газів не тільки впливають на теплотворну здатність, а і на коефіцієнт стиску суміші, який потрібний для перетворення обсягів вимірювання витрати газової суміші в умовах експлуатації до нормальних умов. Також треба враховувати, що вплив якості газу на коефіцієнт стисливості зростає, зі збільшенням тиску.

Споживання газоводневої суміші треба тарифікувати, як споживання енергії. На відміну від електроенергії, споживання енергії газу не вимірюється безпосередньо. Енергія визначається з урахуванням об'єму газу та його енергетичного вмісту

$$E = V \cdot H_{s,c}, \quad (3)$$

де V – об'єм газової суміші, який вимірюється за умов експлуатації. Цей об'єм треба привести до нормальних умов.

Також треба привести до нормальних умов вищу теплотворну здатність суміші $H_{s,c}$. Вимірювання теплотворної здатності у будь-якій точці неможливе з технічної та економічної

причин. Таким чином, найдоцільнішим є визначення репрезентативної теплотворної здатності для певної кількості споживачів. Репрезентативну теплотворну здатність треба визначати за теплотворними здатностями, визначеними у відповідних місцях газової мережі, наприклад точках входу.

На репрезентативну теплотворну здатність впливає один або кілька з наведених нижче чинників:

- змінність якості газової суміші у кожній точці вимірювання, яка буде залежати від обсягів газів (природного газу та водню) у кожній точці закачування, а також змінність у структурі мережі та обсягів споживання різних споживачів;

- метрологічна точність. Для репрезентативного визначення теплотворної здатності потрібна точність метрології, наприклад, витратоміри;

- інтервал часу між вимірюваннями. Обладнання, яке використовується для визначення якості газової суміші (зазвичай це газові хроматографи), бере зразки та виконує аналіз кожні кілька хвилин;

- час транзиту. Час проходження газової суміші від місця відбору проб до лічильника споживача;

- розрахункові періоди. Розрахункові періоди можуть бути щоденними, щомісячними або щорічними. Для кожного періоду має бути визначено репрезентативну теплотворну здатність.

У разі будь-якого нового під'єднання водню до газової мережі треба оцінювати його вплив на усю мережу. Операторам мереж треба активно збирати інформацію про проекти закачування водню, які будуть розроблені, щоб передбачити його вплив на газову мережу. Для оцінювання запиту на під'єднання потрібен обмін інформацією між виробником водню та оператором мережі, наприклад, витрата, тиск, параметри якості газу, забруднення, чи буде виробництво безперервне чи ні. Треба мати багато інформації, а саме:

- знання про конфігурацію та роботу мережі;
- аналіз газової суміші, знання її характеристик та впливу на побутову техніку споживача;

- визначення величини спожитої енергії та функціонування системи виставлення рахунків, із урахуванням теплотворної здатності газової суміші;

- навички управління проектами для проведення економічної оцінки та вибору найкращого рішення, яке буде прийнято в кожному випадку.

Отримання детальних відомостей про поведінку мережі (витрату, тиск і споживання) вимагає часу, технічних знань та фінансових можливостей. Оператор мережі повинен розвивати ці знання заздалегідь, оскільки потрібно буде оцінити кожен запит. Оцінювання майже всіх описаних випадків використання вимагає програмного забезпечення для моделювання роботи мережі та обчислювальних моделей для конкретної мережі. Слід своєчасно приділяти увагу інформаційним системам, де містяться вхідні дані:

- ГІС із сучасною топологією мережі (розташування точок нагнітання, діаметри труб, місця розташування кранів) та стан (наприклад, забруднення труби, що дуже поширено у старих мережах та впливає на пропускну здатність труби), налаштування клапанів та регуляторів;

- система управління даними про спожиту енергію та система розрахунків;

- треба встановити інтерфейси між різними системами програмного забезпечення [47].

Також потрібні стандарти, які будуть ставити вимоги до якості водню, газоводневих сумішей. Якщо в газову мережу буде додаватись біогаз, то до якості цього газу і мультигазової суміші.

2.1.2. Режимні параметри транспортування

На сьогодні питання транспортування суміші водню з природним газом, чистого водню є не достатньо вивченим. Водень має свої особливі фізико-хімічні властивості, що потребує відповідних математичних моделей, робить трубопровідне транспортування цього газу суттєво відмінним, набагато складнішим за транспортування природного газу. На сьогодні не існує перевірених алгоритмів розрахунку параметрів транспортування суміші природного газу і водню трубопроводами.

Оскільки, енергетичні характеристики водню наближено втричі гірші, ніж природного газу, у разі якщо у трубопроводах однакового діаметра однаковий перепад тиску, то для задоволення енергетичних потреб споживача потрібна набагато більша витрата водню. Густина водню наближено в дев'ять разів менша за густину природного газу. Тоді при однаковому діаметрі трубопроводу і перепаді тиску швидкість потоку і об'ємна витрата водню будуть утричі більшими за швидкість і об'ємну витрату природного газу. Тому той самий трубопровід може транспортувати утричі більше водню за однакового тиску. У такому випадку кількість транспортованої енергії буде на небагато

менша, ніж у разі транспортування природного газу [8].

Коефіцієнт стиску водню збільшується із збільшенням тиску в трубопроводі, на відміну від природного газу, для якого він із збільшенням тиску спочатку зменшується, після чого починає зростати. Із збільшенням вмісту водню у природному газі коефіцієнт стиску суміші збільшується, а відносна густина зменшується, оскільки водень – дуже легкий газ, то він впливає на густину всієї суміші, і, як наслідок, на параметри транспортування.

В'язкість водню значно менша, ніж інших компонентів природного газу, тому вона суттєво впливає на величину падіння тиску вздовж трубопроводу. При цьому треба враховувати турбулентний характер потоку в трубопроводі. Додавання водню до природного газу призводить до зменшення втрат тиску вздовж трубопроводу, що дає змогу транспортувати суміш на більші віддалі. Так, додавання 5 % водню до природного газу дає змогу збільшити тиск на 12 % на вході компресорних станцій при відстані 100 км між ними [46]. Зменшення втрат тиску під час транспортування газозводневої суміші трубопроводом має важливе значення, оскільки вартість компримування впливає на ефективність транспортування цієї суміші. Також збільшення віддалі, на яку можна транспортувати суміш природного газу з воднем, чистий водень порівняно з віддаллю, на яку можна транспортувати природний газ, вирішує проблему газових мереж, в яких тиск на вході у споживачів менший проектного (таке відбувається тому, що мережі з часом розвиваються, додаються нові споживачі, оскільки будуються нові будинки, і тиск на вході споживачів може не відповідати проектному).

Збільшення швидкості потоку водню у трубопроводах порівняно з швидкістю природного газу призведе до зростання опору потоку. Таке зростання опору потоку частково компенсується різницею в'язкості між воднем та природним газом.

Також позитивним є те, що чим більша частка водню в природному газі, тим менший діаметр труби може бути при однаковій об'ємній витраті суміші. Наближено 80 % газових мереж є зношені і треба виконувати часткову заміну труб газових мереж. Одними з найкращих технологій ремонту трубопроводів газових мереж, особливо в містах, є безтраншейні технології, коли в стару металеву трубу протягується нова поліетиленова. У результаті діаметр нової труби буде меншим діаметра старої.

2.1.3. Герметичність трубопроводів

Водень є одним з найскладніших газів щодо запобігання витоків, оскільки є елементом з найменшим розміром молекул, а отже, є більша імовірність витоків порівняно із природним газом.

Є три основні причини втрати водню під час його трубопровідного транспортування:

- проникнення водню крізь стінку труби;
- негерметичності роз'ємних з'єднань;
- негерметичність перекривальної арматури.

Дифузія водню в стінку труби в чотири рази швидша, ніж природного газу. Тому у разі транспортування газозводневих сумішей, чистого водню операторам доцільно оцінювати фоновий рівень витоків з трубопроводів (через незначні дефекти в трубопроводах або через проникнення водню крізь матеріал труби), що повинно бути частиною керування герметичністю.

За результатами експериментальних досліджень фонового рівня витоків із трубопроводів було встановлено, що втрати водню в 3-3,5 разів більші від обсягу втрат природного газу. Оскільки теплота згоряння водню наближено в 3 рази менша, ніж природного газу, то енергетичні втрати є наближено однакові. Розрахунковий об'ємний обсяг втрат водню через дифузію в стінку труби є менший 0,001 % від загального річного обсягу транспортування трубопроводом. Такий малий загальний обсяг втрат водню не є загрозою, з точки зору безпеки. Також було встановлено, що додавання водню до природного газу призводить до незначного зниження рівня викидів в атмосферу метану, що зменшує негативний вплив таких викидів на довкілля [48].

Проблематика негерметичності роз'ємних з'єднань трубопроводів теж обумовлена тим, що розмір молекули водню менший ніж природного газу (метану і домішок). Тому у разі переведення газової інфраструктури на транспортування газозводневих сумішей, чистого водню одним з основних моментів буде рішення про перехід на мінімальну кількість роз'ємних з'єднань. Доцільним є видалення фланцевих та різьбових з'єднань. Якщо цього не вдається виконати, роз'ємні з'єднання треба встановити таким чином, щоб забезпечити доступ для огляду та технічного обслуговування (наприклад у колодязях у місцях підземного прокладання трубопроводів).

Фланцеві з'єднання допустимі тільки там, де зварні з'єднання не є доцільними. Прокладки таких з'єднань повинні відповідати розрахунковим тискам і температурам, бути сумісними з

воднем, стійкі до витоків і вогню через можливість загоряння водню у разі його витікання. При вищих тисках є кращими заповнені спіралеподібні сталеві прокладки, при менших тисках – композитні на основі графіту.

Різьові з'єднання допустимі тільки там, де зварні та фланцеві не є доцільними. Герметик таких з'єднань повинен бути сумісним з воднем і бути стійким до температури, щоб зменшити ризик витоків під час пожежі.

Що стосується поліетиленових труб, то дифузія водню в стінку такої труби в п'ять разів більша дифузії природного газу, проте це не є багато з огляду на невеликий енергетичний вміст водню. За результатами експериментальних досліджень фоновому рівню витоків було встановлено, що щорічні втрати водню крізь стінку труб становлять 0,001–0,005 % від загального обсягу транспортування. Це стосується поліетилену та полівінілхлориду [48].

Полімерні матеріали газопровідних труб мають велику пористість, а тому непридатні для трубопроводів, призначених для транспортування водню під високим тиском.

Пластмаси по-різному поведуться в присутності водню. Більшість еластомерів сумісні з воднем.

Оскільки водень більше схильний до витоків, ніж інші гази, особливо важливо періодично обстежувати трубопроводи, якими він транспортується (від 1 до 4 разів на рік, залежно від густоти населення в районі проходження газопроводу). Особливо слід звертати увагу на з'єднання, перекривальну арматуру, клапани, технологічне обладнання тощо.

2.1.4. Компримування

Густина водню досить мала, тому треба стискати його до високого тиску, щоб збільшити об'ємну витрату. Якщо об'ємну витрату не збільшувати, подавання енергії неефективне, оскільки енергетичні характеристики водню гірші, ніж природного газу. Щоб збільшити тиск, потрібно витратити більші зусилля на компримування водню. Погляди на те, як ці більші зусилля, необхідні для компримування, впливають на придатність існуючих типів компресорів для транспортування водню, різняться між операторами газопроводів та виробниками компресорів. Тоді, як оператори бачать потенційні можливості модернізації існуючих компресорних станцій, за результатами інших досліджень встановлено, що існуючі компресорні станції можуть бути непридатними для транспортування не тільки водню, а й навіть значних обсягів водню у природному газі.

Режим роботи відцентрових компресорів залежить від об'ємної витрати газу. Необхідна велика об'ємна витрата водню є проблемою, для вирішення якої треба або збільшувати швидкість обертання робочого колеса компресорів у кілька разів, що призведе до проблем з міцністю матеріалу компресорів, герметичністю, довговічністю трубопроводів, або робити більшу кількість компресорних станцій вздовж трубопроводу. Збільшення швидкості обертання робочого колеса компресорів обмежено, тому компресори існуючої газотранспортної системи непридатні для транспортування водню в тому ж енергетичному обсязі, що транспортується природний газ [49].

На роботу поршневих компресорів тип газу не впливає.

Для прикладу висновком недавніх досліджень у Нідерландах є те, що газопроводи цієї країни придатні для транспортування водню, але треба замінити компресори та прокладки у фланцях.

Щоб забезпечити оптимальне використання трубопроводів із високою густиною транспортної енергії для компримування водню, потрібні компресори більшої потужності, ніж для природного газу. У коротко- та середньостроковій перспективі при невеликих потребах водню достатньо поршневих компресорів. У поршневому компресорі газ стискається з високим ККД в циліндрах. Економічно вигідної транспортної потужності можна досягнути збільшенням кількості циліндрів і потужності привода, а також паралельним підключенням компресорів.

У довгостроковій перспективі, для загальнонаціонального переходу на водень з транспортними вимогами біля гігавату, потрібні будуть турбокомпресори, але їх треба оптимізувати для водню. Такі турбокомпресори будуть доступні через кілька років. Для прикладу, у газотранспортній системі Німеччини переважають турбокомпресори з одним або двома робочими колесами. Ці компресори працюють із газовими турбінами або двигунами з потужністю привода до 30 МВт. До наближено 10 % водню в природному газі такі компресори можуть працювати без значних змін. Корпус компресора може витримувати до 40 % водню в природному газі, однак робочі колеса та передачі повинні бути відрегульовані. Якщо обсяг водню більше 40 %, компресори повинні бути замінені [50].

У нафтохімічному секторі турбокомпресори для багатих воднем синтез-газів застосовують багато десятиліть. Технологія доступна,

але її ефективність у даний час нижча за ефективність поршневих компресорів. Потрібно багато робочих коліс для досягнення прийняттого ступеня стиснення. Тому для майбутніх великих масштабів застосування водню турбокомпресори треба оптимізувати. За результатами досліджень встановлено, що треба збільшити периферійну швидкість робочих коліс до понад 700 м/с через низьку молярну масу водню, щоб досягти ступеня стиснення наближено 1,3 на одне робоче колесо. Щоб це здійснити, треба втричі підвищити швидкість обертання робочих коліс. Для цього потрібні нові матеріали робочого колеса, які витримують великі відцентрові сили.

Компресори, які працюють на газових турбінах (отримують енергію приводу від спалювання газу, який транспортується безпосередньо трубопроводом), повинні бути адаптовані до обсягу доданого водню в природному газі чи чистого водню. Найпоширеніші газові турбіни Siemens Energy для трубопроводів уже сьогодні можуть спалювати значну кількість водню у паливі. Якщо компресори працюють на електроприводі, серйозні зміни в двигунах не потрібні. Щонайбільше, швидкість обертання робочих коліс повинна бути відрегульована та перевірена безпека у разі роботи з воднем [51].

На сьогодні розглядаються різні підходи до проектування водневих трубопровідних систем:

- відносно невеликі компресорні станції, розміщені з інтервалом 100 км;
- більші компресорні станції, розміщені з інтервалом 600 км.

Попередні розрахунки свідчать, що обидва підходи ведуть до того ж порядку величини витрат на 100 км транспортування, хоча детально аналіз складних компромісів між капіталовкладеннями та операційними витратами для різних параметрів трубопроводів і місць їх розташування ще не виконано [52].

Для компресорів на природний газ – потреба в енергії для транспортування продукту на кожні 150 км довжини трубопроводу становить наближено 0,3 % від вмісту енергії у транспортованому природному газі. Однак, для чистого водню енергія компримування становить майже 1,3 % від вмісту енергії у транспортованому водні для такої ж довжини трубопроводу.

2.1.5. Редукування

Природний газ охолоджується при розширенні (ефект Джоуля-Томсона), а для водню спостерігається протилежний ефект. Існує певна невизначеність чи потрібне буде його охо-

лодження після зниження тиску. Зростання температури, ймовірно, буде незначним, однак, так як потрібна значна об'ємна витрата водню, оскільки, він має менший об'ємний енергетичний вміст, ніж природний газ, то збільшення температури може бути суттєвим. Через цю ж причину витратоміри газорозподільних станцій можуть бути не придатними для вимірювання витрати водню. Також потрібне розроблення і виробництво лічильників водню для споживачів.

2.1.6. Зберігання

Потреба в зберіганні певного обсягу водню може виникнути перед транспортуванням, під час транспортування або в місці використання.

Серед усіх палив водень має найбільшу енергію на одиницю маси, але його густина найменша тьму він має незначну енергію на одиницю об'єму. Тому, щоб зберігання водню було економічно вигідним, його треба зберігати під високим тиском.

Найдоцільніший тип сховища буде залежати від ряду чинників, таких як обсяг водню, сфера використання, географічні та геологічні можливості. Наприклад, для турбіни потужністю 500 МВт, яка працює на водні, потрібно наближено 500–600 тонн водню на добу, ще понад 1000 тонн потрібно мати про запас на два дні її роботи.

У незначних обсягах газоподібний водень можна зберігати в герметичних резервуарах, які можуть бути металеві або міцні та легкі композитні ємності під тиском. Прикладом такого зберігання можуть бути автомобілі на водні, резервуари газоподібного водню на заправних станціях, а також у різних хімічних та стаціонарних енергетичних установках. Зниження температури до холодної або криогенної може значно збільшити густину водню. Наприклад, при 15°C і тиску 70 МПа водень має густину 40 кг/м³, при -150°C і 70 МПа його густина 67 кг/м³ і при -253°C і 0,1 МПа (коли водень є рідиною) його густина 71 кг/м³. У рідкому вигляді водень можна зберігати при надзвичайно низькій криогенній температурі в резервуарах із подвійними стінками. Такі резервуари є комерційно доступними і сьогодні застосовуються для промислового зберігання та транспортування водню [53].

Довготривало великі обсяги водню можна зберігати у великих геологічних сховищах – виснажених родовищах природного газу або нафти, соляних пластах, печерах, шахтах та в резервуарах з твердих порід.

Підземні сховища газу призначені для зберігання природного газу тому, щоб підтвердити можливість і доцільність закачування і зберігання газоводневих сумішей, чистого водню у всіх типах таких сховищ потрібні дослідження. Що стосується зберігання в пористих породах, таких як водоносні горизонти або колишні газові чи нафтові родовища, то в них мають місце явища розчинення водню у воді, що потребує додаткових досліджень. Газоподібний водень буде розчинятися до досягнення рівноваги між водною (нафтою) та газовою фазами. Тому розчинення стане важливішим на початку експлуатаційного періоду. Також проблемою є можлива хімічна/біологічна реакція в пористих пластах, яка вже спостерігалася в деяких колишніх сховищах газу. Потенційні ризики пов'язані зі споживанням водню мікроорганізмами, що призводить до утворення H_2S , розвиток біоплівки поблизу свердловин і закупорення пор (у гіршому випадку).

Також, щоб закачувати водень в існуючі підземні сховища газу, треба виконати наступне:

- обстежити усі встановлені матеріали, ущільнення та компоненти;
- визначити максимально допустиму концентрацію водню для газових турбін;
- оцінити наслідки процесу зневоднення;
- перевірити герметичність;
- визначити необхідність модернізації, добудови свердловин;
- оцінити експлуатаційні характеристики та енергоємність накопичувача (об'єм робочого газу, профіль вилучення/швидкість закачування).

Останнім часом з'явилися проекти та концепції з будівництва сховищ для зберігання водню в соляних пластах, соляних печерах (для прикладу проект постачання воднем міста Лідс (рис. 2)). На основі огляду дослідницьких програм та результатів експериментів можна зробити висновок, що соляні печери від природи більш сумісні з зберіганням водню, ніж підземні сховища газу. Лабораторні вимірювання підтверджують цілісність шару солі до водню. Жодних проблем з експлуатацією не було зареєстровано під час експлуатації сховищ чистого водню або сховищ природного газу в соляних печерах. Більше того, гелій, структура атомів якого дуже схожа до структури водню, зберігається у соляних печерах уже давно. Утримання його в шарі солі не вважається проблематичним. [54] Доцільним є визначення потенціалу України щодо зберігання водню в соляних пластах, печерах, шахтах.

Також великі обсяги водню можна зберігати в трубах магістральних газопроводів, коли

не буде транзиту газу з Росії або обсяги транзиту сильно зменшаться. Уже навіть сьогодні можна вивести значну кількість магістральних газопроводів великого діаметру з експлуатації [55].

2.1.7. Безпека

Навіть невеликі витоки в атмосферу водню, газоводневих сумішей є значним ризиком для безпеки, оскільки властивості водню відрізняються від властивостей природного газу. Водень є газом, який характеризується великою вибухонебезпечністю. Його нижня межа вибуховості в повітрі складає 4 %, а верхня 75 %. Такі межі набагато ширші, ніж у метану. Суміші водню з повітрям надзвичайно легко спалахують. Для цього потрібна енергія запалювання (для прикладу від іскри) всього 0,017 мДж в порівнянні з 0,25 мДж для вуглеводнів. Мінімальна температура займання воднево-повітряних сумішей складає 500 °С. Максимальна швидкість поширення полум'я в повітрі – до 3 м/с. Питома вага водню значно нижча за повітря, тому чистий водень піднімається з швидкістю до 20 м/с, що наближено в 6 разів швидше за метан. Тому розведення водню у повітрі відбувається швидше в 3,8 рази, ніж метану, а вибухонебезпечна зона буде меншого радіусу. Водень не має запаху, у природному та газоподібному стані невидимий, не має смаку та нетоксичний, тому його важко виявити. Водень горить на повітрі блідо-блакитним, майже невидимим полум'ям, що збільшує ризик отримання травм під час його запалювання. Суміші водню та природного газу мають інші властивості, ніж два окремих гази [56]. Усе це вимагає перегляду стандартів безпеки, які чинні в сфері транспортування і споживання природного газу.

Коли витікає водень, він у більшості випадків запалюється. Невеликі витоки призводять до появи невидимого мікро полум'я. Невелике непомітне горіння протягом тривалого часу є можливим джерелом займання. Мікро полум'я можна виявити тепловізійною камерою або за горінням запалених інших матеріалів. Тому виникає питання щодо безпеки, як у закритому просторі, так і поза ним.

У разі додавання водню в обсязі 20 % до природного газу частота вибухів може збільшитись вдвічі. Однак ризик вибуху в газу дуже низький, і навіть у разі такого збільшення ризик залишається в межах загальноприйнятої межі. Додавання від 20 % до 30 % водню до природного газу може загрожувати безпеці транспортування та споживання такої суміші.

Із міркувань безпеки додавання чистого водню до природного газу можливе тільки, якщо якість суміші (максимальний відсоток водню) буде контролюваною, а подавання суміші може бути перерваним (принаймні тимчасово). Також основними вимогами безпеки щодо споживання водню є переобладнати опалювальні та кухонні прилади (для швидшої реалізації цього нові опалювальні та кухонні прилади в продажі повинні бути уже призначені для споживання водню), наявність датчиків загазованості в кожному приміщенні, де буде встановлена побутова техніка. Такі датчики повинні бути з виводом на централізований пункт контролю, щоб ті передавали інформацію службам з технічного обслуговування не чекаючи, телефонного дзвінка. Це можуть бути датчики з виходом через GSM-мережі. Також повинні бути віддалені клапани-відсікачі постачання водню в конкретне приміщення.

Вітчизняна побутова техніка та газові турбіни з низьким рівнем готовності особливо чутливі до нестабільного згоряння та в них можуть відбуватись вибухи. Полум'я, яке потрапляє в пальник, має тенденцію до спричинення перегріву. У газових турбінах, газових двигунах може відбуватися мимовільне (небажане) займання, що може завдати серйозної шкоди. Тому потрібний ретельний розгляд цих явищ та розуміння, наскільки уся існуюча побутова техніка та газові турбіни, які призначені для природних газів, можуть працювати з домішками водню.

2.1.8. Довговічність трубопроводів

Коли водень перебуває під тиском у трубопроводі, частина його адсорбується на стінці труби і згодом дифундує в сталь, що призводить до насичення стінки воднем і зменшення пластичності та в'язкості сталі. Залежно від марки сталі та умов експлуатації трубопроводу зменшення в'язкості сталі може призводити до зародження та збільшення тріщиноподібних дефектів (таке явище називається водневою крихкістю). У таких випадках довговічність трубопроводу зменшується. Тому фізична готовність газотранспортної системи до транспортування водню залежить від його впливу на використовувані матеріали, особливо сталь, а у стандартах для проєктування нових трубопроводів для водню треба передбачити більші коефіцієнти запасу міцності, ніж ті, що є для газопроводів.

Механізм водневої крихкості залежить від міцності матеріалу, термічної обробки/мікροструктури, прикладених навантажень та темпе-

ратури. Для багатьох сталей існує порогове напруження, нижче якого водневе розтріскування не відбувається. Цей поріг є функцією міцності сталі та обсягу водню в конкретному середовищі. Як правило, порогове напруження зменшується в міру збільшення границі плинності та міцності сталі. Найчастіше воднева крихкість спостерігається у разі дії тривалих навантажень нижче границі плинності матеріалу. Ризик виникнення водневого розтріскування трубопроводів підвищується при більш високих тисках. Згідно з законом Сіверта розчинність водню в сталі пропорційна до квадратного кореня тиску водню. Найінтенсивніше явище водневої крихкості відбувається за кімнатної температури для звичайних металевих матеріалів, таких як феритні сталі і стає менш інтенсивним у разі підвищення температури.

Наявність водню в трубопроводі зменшує пороговий коефіцієнт інтенсивності циклічного напруження, а також тривалість втоми.

Вуглецеві/низьколеговані сталі демонструють деяке погіршення міцності на розрив, пластичності та міцності залежно від рівня міцності сплаву, термічної обробки та тиску водню.

Особливо інтенсивно водень проникає в будь-яку поверхню крізь дефекти стінки, будівельні дефекти або корозійні дефекти, що призводить до втрати пластичності, збільшення темпів зростання існуючих тріщин і ініціації нових тріщин. Це врешті-решт призведе до руйнування трубопроводу.

Важливими чинниками, які впливають на водневу крихкість трубопроводів, є:

- дефекти труби, які схожі на тріщини (особливо небезпечними є такі дефекти на внутрішній стінці);

- наявність водню в атомній формі;

- сильні динамічні зміни тиску в трубопроводі (інтенсивність і частота). [51]

Зазвичай ці чинники не накладаються один на інший, що зменшує інтенсивність водневої крихкості трубопроводів:

- тріщиноподібні дефекти є рідкістю;

- під час роботи трубопроводів не відбувається значних змін тиску;

- під час транспортування атомарний водень не утворюється, а транспортується тільки молекулярний водень [8].

Чинниками, які сприяють водневій крихкості, на додаток до попередньо розглянутих, можуть бути тверді місця в сталі, незагартований мартенсит у місцях зварного шва. Також ефект водневої крихкості залежить від кількості доданого до природного газу водню. Додавання

більшого обсягу водню призводить до виникнення більшого його парціального тиску і з часом збільшує концентрацію розчиненого водню у трубопровідній сталі, що сприяє посиленню водневої крихкості.

Водень можна транспортувати під високим тиском трубопроводами з більш м'яких сталей, що зменшує інтенсивність водневої крихкості. Магістральні газопроводи високого тиску з твердих сталей мало придатні для транспорту водню, оскільки високоміцна сталь піддається крихкому руйнуванню.

У твердих трубопровідних сталях магістральних газопроводів водневі пошкодження проявляється у вигляді:

- зниження пластичності та міцності у результаті впливу розтягу та концентрацій напружень;

- прискорення темпів зростання втомних тріщин у місцях дефектів.

Зварні шви більш чутливі, ніж метал труб, до проникнення водню.

Тому для транспортування водню на великій віддалі одним з варіантів є побудова нових магістральних трубопроводів з м'якішої сталі. Також існують рішення для боротьби з водневою крихкістю трубопроводів:

- нанесення покриття на внутрішню стінку для її захисту;

- регулярне обстеження трубопроводу з метою виявлення тріщин;

- підтримування стабільного тиску для запобігання початковому утворенню тріщин.

Що стосується газових мереж, то різні ділянки газових мереж побудовані з труб, виготовлених із різних матеріалів та, як правило, експлуатуються під різним робочим тиском. До того ж, вік та технічний стан труб різних ділянок є різний. У свою чергу, придатність труб для транспортування водню залежить від усіх цих чинників. Також існує невизначеність щодо допустимого тиску, нижче якого трубопроводами можна безпечно транспортувати водень. Він залежить від характеристик сталі труб, її мікроструктури, стану стінки труби, історії напружень, застосовуваного зварювання.

Значна зношеність газових мереж в Україні та воднева крихкість стінки труби вимагає перед переведенням на транспортування газом водневих сумішей виконати модернізацію, реконструкцію газових мереж. У свою чергу, насичення воднем стінки труби ускладнює вибір матеріалу нових труб для реконструкції старих, будівництва нових ділянок трубопроводів.

Такі труби повинні бути виготовлені з сталей із максимальною твердістю наближено

22 HRC (твердість за Роквеллом С) або 250 HB (твердість за Брінеллем). Зона зварювання часто твердіша і сприйнятливіша до крихкості, ніж основний метал. Тому зварні шви також повинні мати таку ж максимальну твердість [56].

Для транспортування чистого водню можуть застосовуватися труби з низьковуглецевої сталі. При цьому на внутрішній поверхні труб не повинно бути дефектів, таких як подряпини, щербини, нагар і корозія.

Вартість нових водневих трубопроводів надзвичайно висока, причому витрати на матеріали складають близько 70 % від вартості будівництва. Тому актуальним на сьогодні є створення нових металевих, неметалевих і композитних матеріалів для реконструкції зношених ділянок газопроводів та розроблення технологій нанесення тонкого захисного покриття на внутрішню стінку трубопроводів.

Початкові проекти з побудови водневої інфраструктури в Німеччині та Нідерландах показали, що діючі газопроводи в цих регіонах не потребують нанесення покриття на внутрішню стінку. У Франції початкові проекти свідчать, що нанесення покриття на внутрішню стінку є оптимальним рішенням і дає можливість експлуатувати водневі трубопроводи під тиском, близьким до тиску, під яким експлуатуються газопроводи. Такі результати показують що універсальних рішень не існує.

Що стосується поліетиленових, полівінілхлоридних та еластомерних труб газових мереж то водень на їх довговічність не впливає. Такі труби придатні для транспортування водню при низьких тисках, хоча існує невизначеність щодо з'єднань труб [57]. Тому зношені ділянки сталевих трубопроводів газових мереж доцільно замінити або безтраншейно реконструювати поліетиленовими трубами.

Дослідження дифузії водню в багатошарові гнучкі композитні труби, показали, що армовані скло- або вуглецевими волокнами труби є перспективною альтернативою сталевим трубам за технічними характеристиками і вартістю. У багатошарову конструкцію можуть бути включені сенсори з дистанційним керуванням для моніторингу технічного стану гнучких композитних трубопроводів у реальному часі.

3. Використання водню

В енергію водень може бути перетворений згорянням або за допомогою паливних елементів. Також існують гібридні енергетичні системи, наприклад, газові турбіни поєднані з високо- або низькотемпературними стаціонарними паливними елементами.

Паливні елементи легко масштабувати, оскільки окремі елементи можна об'єднати разом, щоб забезпечити широкий діапазон потужності. Їх потужність може варіюватися від менше ніж 1 Вт для портативних пристроїв до багатьох мегават для великомасштабного стаціонарного виробництва електроенергії [58].

На сьогодні в світі є широкий спектр можливостей до використання водню в транспортному, енергетичному, промислового, комунальному та комерційному секторах. Такі можливості постійно зростають та мають значний потенціал для подальшого зростання.

Водень можна використовувати в усіх видах транспорту – легкові і вантажні автомобілі, автобуси і поїзди, судноплавство і авіація. Для використання водню в транспорті можуть застосовуватись як паливні елементи, так і двигуни внутрішнього згоряння. Перевагами паливних елементів перед двигунами внутрішнього згоряння є те, що вони не мають рухомих частин, тихі, не потребують заміни мастила та вимагають мінімального обслуговування [58]. Завдяки високому тиску в баках водень має густину енергії, яка в декілька раз перевищує сьогоденні акумулятори. Тому перевагами водневих транспортних засобів над електричними є більший запас ходу і швидка заправка. Це зумовлює особливу актуальність водню для великогазових вантажівок, які здійснюють перевезення важких вантажів на великі віддалі. Також водень є доцільний у холодному кліматі, його добре застосовувати для великих платформ пасажирських транспортних засобів. Водень дає змогу транспортним засобам працювати без викидів у закритих приміщеннях. Для заправки водневих транспортних засобів треба влаштувати мережу заправок станцій. Серед легкових автомобілів на водневих паливних елементах працюють наступні моделі: Toyota Mirai, Hyundai Nexo, Honda Clarity, Mercedes-Benz GLC F-Cell, BMW Hydrogen Next.

Щодо поїздів, то водень особливо актуальний там, де побудова електрифікованої залізниці або неможлива або занадто дорога. У судноплавстві водень може застосовуватись для живлення силових систем на водневих паливних елементах та допоміжних систем живлення для кораблів. Крім використання водню на різних судах, його можна використовувати і в портах для заправки вантажівок, виробництва електроенергії, берегового живлення суден у гавані. В авіаційному секторі водень може відігравати важливу роль, оскільки велика щільність енергії водню забезпечує значні переваги в якості авіаційного палива. Паливні

елементи можуть забезпечити енергією бортові системи, знижуючи загальне споживання пального. Також паливні елементи можуть застосовуватись для живлення безпілотних літальних апаратів або дронів [7].

Водень може також бути використаний для виробництва електроенергії (великомасштабного генерування електроенергії, розподіленої електроенергії поза мережею та резервного або аварійного електропостачання). Для цього можна застосовувати газові турбіни або паливні елементи. Особливо доцільні такі генератори при надлишку електричної енергії, що дозволяє керувати навантаженням і зберігати енергію. Це дозволяє розвивати нестабільну відновлювану енергетику. Тоді може бути вироблений водень і зберігатись, а у разі потреби використовуватись для виробництва електроенергії. Особливо таке поєднання доцільне з відновлюваними джерелами електроенергії для живлення віддалених об'єктів, невеликих населених пунктів.

Перевагами виробництва електроенергії з спалюванням водню є:

- можливість спалювати водень і газодневі суміші;
- неперевніть подачі палива так як є можливість поєднання зі сховищем водню;
- здатність задовольняти великі потреби в електроенергії;
- можливість змінювати обсяги генерації.

Для великомасштабної генерації доцільні водневі турбіни. Газові турбіни внутрішнього згоряння, які можуть спалювати суміші водню та природного газу, зараз є доступними. Вони можуть працювати з обсягом водню в природному газі до 15 % і виробляти електроенергію, а також забезпечувати тепло для житлового, комерційного та промислового споживання. Щоб спалювати більший обсяг водню потрібні значні модифікації. Турбіни, здатні працювати на 100 % водню на сьогодні розробляються і очікуються до 2030 року.

Водень є перспективним для використання в металургії, оскільки для виробництва сталі використовують вугілля в доменних печах щоб перетворити залізну руду в залізо. Від 7 % до 9 % глобальних світових викидів парникових газів припадає на виробництво сталі. Також енерговитратним виробництвом, де може використовуватись водень, є виробництво цементу. 8 % викидів діоксиду вуглецю в світі припадає на виробництво цементу. Виробництво водню електролізом безпосередньо на великих промислових об'єктах має перевагу додаткової вартості. Наприклад, деякі з виробників можуть ви-

користувати кисень та/або тепло, які отримуються в процесі електролізу. Кисень може поліпшити згоряння в цементних печах [7]. Металургію і цементне виробництво доцільно декарбонізувати в найпершу чергу, оскільки в найближчому майбутньому на їх експортну продукцію буде накладено СВАМ.

Водень, газодневі суміші можна використовувати комунальними підприємствами для виробництва тепла, як котельне паливо, щоб здійснювати централізоване теплопостачання промисловості і населення. Це дасть змогу зменшити викиди опалювальних установок у забудованому середовищі. У побуті водень можна використовувати, як і природний газ, для опалення будинків, а також для приготування їжі.

Також водень використовують в якості хімічної сировини. З водню виробляють аміак, з якого, в свою чергу, виробляють добрива. На сьогодні у всьому світі більше половини виробленого водню витрачається на виробництво аміаку (зазвичай це сірий водень).

Обговорення і рекомендації

В Україні є достатньо перспективні можливості, щоб розвивати водневу енергетику і забезпечувати цим екологічно чистим енергоносієм не тільки внутрішній ринок, а і зробити водень своїм експортним товаром. Є всі природні ресурси, необхідні для отримання водню – це запаси викопного палива, можливості з постійного розвитку вітрової і сонячної енергетики, великі обсяги відновлюваної біомаси, прісна вода. Україна є сильний гравець в атомній енергетиці та має значні гідрогенеруючі потужності.

Різноманітні можливості з використання водню, його екологічна нейтральність підкреслюють надзвичайний потенціал водню. Цей потенціал розуміють в усьому світі, а тому інвестують у технології його виробництва, транспортування, зберігання та використання і такі технології весь час будуть розвиватись і ставати дешевшими. Гострою необхідністю таких інвестицій, швидких дій в напрямку розвитку водневої енергетики є негативні зміни клімату. Такі зміни надзвичайно важко прогнозувати, оскільки це є система, яка більше нагадує хаос, а математичні моделі, які описують такі системи, тільки зароджуються. Крім того, в міру погіршення клімату будуть додаватись багато непередбачуваних чинників. За словами одного з найбільших генії сучасності Ілона Маска, якщо є навіть 1 % імовірності того, що забруднення атмосфери призведе до досягнення кліматом точки біфуркації (точки неповернен-

ня), за якою може зникнути така надзвичайно крихка річ, як свідомість, то для чого ризикувати і продовжувати забруднювати довкілля. Аналізуючи зміни погоди останніх років і їх наслідки, можна прийти до висновків, що така імовірність набагато більша. Також чинником, який зумовлює гостру необхідність діяти в напрямку розвитку водневої енергетики, є взяті багатьма країнами зобов'язання в рамках Паризької угоди скорочення викидів парникових газів у короткостроковій перспективі до 2030 року та досягнення нульових викидів у довгостроковій перспективі до 2050 року розвинені країни, країни, що розвиваються, зокрема Україна, а також Китай до 2060 року, Індія до 2070 року. Імовірно, що залежно від динаміки погіршення клімату та тенденцій розвитку зелених технологій ці роки будуть скориговані в сторону зменшення. Також гострою необхідністю, яка буде спонукати до дій буде платіж за парникові викиди СВАМ, який незабаром буде введений на сталь, чавун, цемент, мінеральні добрива, електроенергію, алюміній. Очевидно, що з часом нинішня вартість квоти на викиди в ЄСТВ, яка сьогодні уже перевищила 60 євро за тону, буде тільки збільшуватись, а перелік товарів буде розширюватись. Ще одним чинником є сучасна вартість природного газу, яка періодично перевищує 2000 доларів за 1000 м³. Такі гострі необхідності є надзвичайно великим стимулом до інновацій, дій і розвитку водневої енергетики.

Проблемою старту водневої енергетики є те, що масове виробництво водню неможливо розпочинати у разі відсутності споживачів водню і водневої інфраструктури. Споживачі водню не з'являться, якщо немає виробників водню, водневої інфраструктури. Це так звана проблема “яйця і курки”. Тому потрібні демонстраційні пілотні водневі проекти з повним ланцюжком, які б дали можливість відпрацювати навички роботи з воднем, продемонстрували потенційним інвесторам, що Україна розпочинає рухатися в напрямку кліматичної нейтральності, забезпечує можливості для розвитку відновлюваних джерел енергії. Такі пілотні проекти будуть одним з аргументів щодо інвестицій.

Демонстраційні пілотні проекти доцільно розпочинати в місцях, де зосереджена промисловість, яка в великих обсягах забруднює довкілля і буде сплачувати платіж за парникові викиди СВАМ. Такий бізнес буде найбільше зацікавлений в доступі до водню. Також потрібно враховувати наявність в цих місцях зелених джерел електроенергії (якщо буде виробля-

тись зелений водень) або наявність інфраструктури для підведення необхідної кількості природного газу (якщо буде виробляться синій водень) і наявність трубопроводів, які можна було б перевести у трубопроводи для відведення CO₂. Важливим чинником є наявність місць для зберігання як водню, так і CO₂ (у разі виробництва синього водню). Одними з найдоцільніших місць для зберігання водню є глибокі соляні пласти, соляні печери, шахти (щодо підземних сховищ газу то тут ще потрібні дослідження). Місцями для зберігання вуглекислого газу можуть бути соляні пласти, соляні печери, шахти, а також потрібні дослідження щодо зберігання вуглекислого газу у відпрацьованих газових і нафтових родовищ. Також потрібно звертати увагу на наявність газопроводів, які згодом можна було б перевести на транспортування водню і з'єднати ними декілька пілотних проєктів між собою. Це дасть змогу започаткувати регіональну водневу інфраструктуру, яка з часом переросте в національну. Для вибору таких місць треба залучати регіональні місцеві органи виконавчої влади, яким доцільно визначити потенційні можливості кожного регіону щодо розвитку водневої енергетики, оцінити перспективи розвитку вітрових, сонячних джерел енергії тоді у співпраці з газовою галуззю, науково-дослідними інститутами знайти оптимальні рішення з урахуванням наведених вище чинників. Необхідне формування бачення кожного регіону щодо своїх можливостей з урахуванням географії, газової інфраструктури, наявних виробництв зі значним викидом вуглекислого газу, потреб і можливостей зберігання як водню, так і вуглекислого газу (у разі виробництва синього водню). Потрібна розробка регіональних планів розвитку водневої енергетики, де треба визначити конкретні можливості виробництва та використання водню.

Потрібно рухатись в напрямку розвитку водневого транспорту, що дало б можливість зменшити загазованість, особливо у великих містах. Тут також виникає проблема “яйця і курки”. Закупівлі автомобілів на водню не буде, оскільки нема мережі заправних станцій. Заправні станції нема змісту будувати, оскільки немає автомобілів, що працюють на водні. Тому також потрібні демонстраційні пілотні проєкти з будівництва заправних станцій на водню, що буде поштовхом для закупівлі автомобілів. Водень для заправної станції можна виробляти на місці мініелектролізною установкою, яка живиться від відновлюваних джерел енергії, або доставляти в автоцистернах з місць централізованого виробництва зеленого чи синього

водню. Доцільно місцевим органам виконавчої влади розглянути питання про закупівлю муніципального транспорту на водні, що б забезпечило роботою перші заправні станції. Сприяти декарбонізації транспорту будуть плани уряду заборонити імпорт і реєстрацію уживаних дизельних авто з 2027 року, а нових і уживаних бензинових і нових дизельних – з 2030 року [59].

Для напрацювання навиків з інтегрування водню в комунальне господарство, теплоенергетику, побут доцільно створювати демонстраційні пілотні проєкти, які б містили повний ланцюжок тільки споживачем був б населений пункт чи місто.

Для розвитку науки, освіти, набування знань, розуміння, яким чином працювати з воднем, доцільні малі демонстраційні пілотні проєкти на базі університетських кампусів, полігонах науково-дослідних інститутів.

Доцільні пілотні проєкти в напрямку переведення власного споживання енергії газовою галуззю на газоводневі суміші, чистий водень.

Напрацювавши навиків поведінки з воднем на пілотних демонстраційних проєктах потрібно їх масштабувати, щоб якомога швидше декарбонізувати українську економіку, побутове споживання енергоносіїв і до 2060 року виконати взяті зобов'язання по Паризькій угоді та стати кліматично нейтральною країною.

Потрібно швидко діяти, поки відкрито вікно можливостей з експорту водню в Європейський Союз. У водневій стратегії Європейського Союзу Україну визначено одним із потенційних партнерів з виробництва та постачання водню. Планується, що Україна повинна зіграти центральну роль у проєкті Green Deal і в середньостроковій перспективі поставити 7,5 ГВт зеленого водню в Європейський Союз [60]. Поряд із цим багато країн розробили експортно орієнтовані Національні водневі стратегії і будуть конкурентами України на Європейському ринку водню. Для прикладу Іспанія вже давно діє і інтенсивно залучає інвесторів до виробництва водню, що дало змогу запланувати і почати реалізовувати перші водневі проєкти.

Коли в Україні буде достатньо для експорту водню виробників цього газу, потрібний буде магістральний трубопровід. Будівництво нового магістрального трубопроводу для транспортування водню є надзвичайно високовартісним, то ж для цього потрібні значні інвестиції. За підрахунками експертів капітальні витрати на перебудову існуючого газопроводу становлять 10-25 % від вартості будівництва нового трубопроводу для транспортування водню.

Крім того, для будівництва нової інфраструктури для водню треба багато часу, що значно уповільнить темпи декарбонізації економіки, зменшить конкурентні можливості щодо експорту водню оскільки за цей час Європейські ринки можуть бути зайняті іншими країнами.

Визначитись із магістральним газопроводом для експорту водню і виконувати підготовку його треба якомога швидше, оскільки під час вибору місць для розгортання великих виробництв водню потрібно враховувати те, якими газопроводами буде транспортуватись вироблений водень до цього магістрального газопроводу. Якщо великомасштабне централізоване виробництво водню буде організовуватись біля атомних електростанцій, потрібно передбачати, яким чином водень транспортувати до вибраного магістрального газопроводу.

Потрібні дослідження впливу молекулярного водню на тверді сталі, з яких виготовлений кожний магістральний газопровід, зварні шви. Якщо буде встановлено, що воднева крихкість є небезпечною і може суттєво вплинути на довговічність, то доцільні розробки щодо матеріалів і ефективних та продуктивних технологій нанесення внутрішньотрубного бар'єрного покриття на стінку трубопроводу. Це можуть бути установки безповітряного розпилення, які здатні розпилювати полімерне покриття на внутрішню стінку газопроводів. Такі технології уже розроблені.

Також існує проблема, що від кожного магістрального газопроводу є відводи на населені пункти, виробничі підприємства і здійснюється їх газопостачання. У разі переведення магістрального газопроводу на водень неможливо буде виконувати таке газопостачання. Щоб вирішити цю проблему, можливі два варіанти. Перевести споживачів цього магістрального газопроводу на споживання водню, що надзвичайно проблематично і в коротко-, середньостроковій перспективі виконати складно. Іншим варіантом може бути вибирання такого маршруту для магістрального транспортування водню, де в одному технологічному коридорі декілька магістральних газопроводів, Тоді відвідні газопроводи до споживачів від магістрального газопроводу, який буде переводитись на водень, можна буде приєднати до газопроводу, яким і надалі буде транспортуватись природний газ.

У коротко- та середньостроковій перспективі при невеликих обсягах транзиту водню доцільно буде виділений газопровід обладнати існуючими в Україні поршневыми компресорами. У довгостроковій перспективі потрібно буде поршневі компресори замінити на оптимізо-

вані для водню турбокомпресори. Прогнозується, що такі турбокомпресори будуть доступні уже через кілька років.

Що ж до зберігання водню, то, щоб визначити, чи підземні сховища газу призначені для зберігання водню, на сьогодні ще потрібні дослідження. Загальновідомо, що найкращим варіантом зберігання водню є глибокі соляні пласти, де вимиванням солі водою влаштовують сховища, і соляні печери та шахти. У соляних покладах також зберігають і природний газ, тому ця технологія відпрацьована. В Україні природний газ зберігають в підземних сховищах, які влаштовані в місцях колишніх газових родовищ, тому соляні поклади не розглядалися для зберігання природного газу. Потенціал соляних пластів, соляних печер та шахт в Україні щодо зберігання водню доцільно оцінити.

У коротко- і середньостроковій перспективі найкращим варіантом є виробництво синього водню, оскільки технології виробництва зеленого водню на сьогодні дорогі і малопродуктивні. Із часом вони стануть дешевшими і продуктивнішими, що дасть змогу перейти на виробництво тільки зеленого водню у довгостроковій перспективі. Також розвиток зеленого водню вимагає великої кількості відновлюваної електроенергії, що є проблемою в коротко- та середньостроковій перспективі, так як відновлювані джерела також потрібні для декарбонізації існуючого попиту на електроенергію. Виробництво синього водню дасть змогу максимально швидко відпрацювати навик роботи з воднем і видобути максимальну кількість природного газу до закривання вікна з використання природного газу загалом, коли енергетика повністю перейде на дешеві зелені джерела енергії і зелений водень, який будуть виробляти доступні дешеві та продуктивні електролізні установки. Очевидно, що вікно з використання природного газу почне інтенсивно закриватись в 30-ті роки, коли зелений водень почне набирати великих масштабів. Зелений водень у коротко- та середньостроковій перспективі буде ефективний тільки там, де є надлишки зеленої енергії, або зелені джерела енергії неможливо під'єднати до загальної електричної мережі.

Потрібно оцінити потенціал України щодо довгострокового зберігання CO₂, який в коротко- і середньостроковій перспективі буде побічним продуктом під час виробництва синього водню. Це можуть бути сховища в соляних пластах, соляні печери, шахти, виснажені, відпрацьовані газові і нафтові родовища. Для визначення можливості масштабного зберігання вуглекислого газу у виснажених, відпрацьова-

них газових і нафтових родовищах ще потрібні дослідження, однак такий тренд сьогодні в світі зароджується особливо щодо морських відпрацьованих родовищ. У разі великих можливостей із зберігання вуглекислого газу і суттєвого зменшення або відсутності транзиту російського газу доцільно буде використати вікно можливостей з зберігання вуглекислого газу, який буде одержуватись в результаті виробництва синього водню в Європейському Союзі. Таке вікно можливостей зараз починає відкриватись і закритись коли енергетика Європи повністю перейде на зелений водень. Такий бізнес сьогодні зароджується в Європейському Союзі і в міру зростання виробництва синього водню буде масштабуватись. Для прикладу, у Національній водневій стратегії Норвегії зазначено, що синій водень більш раціонально виробляти поблизу місць його споживання, а тому Норвегія буде продовжувати експорт природного газу в Європейський Союз і розглядати можливість для транспортування вуглекислого газу з Європейського Союзу. Для такого транспортування CO₂ треба виділити працюючий газопровід, що зменшить експортні можливості Норвегії. Тому щоб не відбулось цього та для участі України в Європейському ринку з зберігання вуглекислого газу у разі малих обсягів транзиту природного газу доцільно розглядати можливість переведення одного з магістральних газопроводів на транспортування вуглекислого газу з Європейського Союзу в Україну і довгострокового його зберігання. Потрібна робота в напрямку розроблення безпечних технологій закачування CO₂ у відпрацьовані, виснажені газові, нафтові родовища, сховища в соляних пластах, соляні печери, шахти до максимально можливого тиску. Складається ситуація, що потрібно так оптимізувати роботу газовидобувного комплексу, щоб до закриття вікна можливостей по природному і вуглекислому газу (повного переходу енергетики на зелені джерела енергії і зелений водень) треба якомога більше видобути і використати природного газу (у тому числі на виробництво синього водню для потреб внутрішнього споживача і на експорт) та закачати у газові родовища вуглекислого газу (в тому числі вуглекислого газу з Європейського Союзу).

Потрібна робота з промисловістю, особливо з експортно орієнтованими виробниками, які будуть сплачувати СВМ в напрямку переорієнтації їхнього виробництва на споживання водню. Для цього треба вивчати світовий досвід використання водню в цих сферах, організувати міжнародну співпрацю, залучати інвестиції.

У газопостачанні розпочато роботу з розроблення, випробування різноманітного обладнання газових мереж для роботи з газоводневими сумішами і отримано позитивні результати. Також було встановлено, що якщо вміст водню в природному газі становить до 20 %, то вплив на процеси транспортування, обліку та спалювання такої суміші практично відсутній. Трубопроводи газових мереж побудовані з труб із м'якої сталі, яка є стійкою до водневої крихкості. Очевидно, що проблемою є значна зношеність газових мереж. Тому перед переведенням їх на транспортування газоводневих сумішей, чистого водню необхідно буде виконати масштабне обстеження стінки труби і значний обсяг ремонтних робіт. Найефективнішими на сьогодні технологіями обстеження стінки труби є внутрішньотрубні технології, а ремонту, реновації трубопроводів газових мереж – безтраншейні технології. Особливо актуальні такі технології в міста, де багато газопроводів покладені під автодорогами, вимощеними тротуарами, історичними місцями та в інших важкодоступних місцях. Безтраншейними технологіями поліетиленові труби або поліетиленові рукави, які не зазнають негативного впливу водню, протягують або проштовхують у зношені сталеві трубопроводи. Такі технології дали б змогу ефективно вирішити не тільки проблему переведення зношених газових мереж на водень, а й проблему недовантаження газових мереж, оскільки діаметр нової поліетиленової труби є менший старої сталеві. Однак проблема полягає в тому, що в Україні практично не розвинуті такі технології. Це обумовлено тим, що кожна компанія чи газова, чи водоканал або компанія з тепlopостачання самі обстежують і ремонтують свої трубопроводи наявними в них технологіями. Натомість у багатьох країнах Європейського Союзу, США тощо уже давно сформувались вузькоспеціалізовані приватні компанії, які займаються тільки внутрішньотрубною діагностикою або безтраншейним ремонтом чи реновацією трубопроводів, а оператор тієї чи іншої трубопровідної мережі (газ, вода, тепло, каналізація тощо) у разі потреби викликає спеціалістів цієї компанії і здійснює контроль якості виконаних робіт. Натомість в Україні кожна компанія сама виконує роботи і сама контролює свої трубопроводи, що є причиною не тільки відсутності розвитку ефективних технологій, а й впливає на якість робіт.

Для забезпечення безпеки споживання водню необхідно відпрацьовувати можливості з установлення давачів загазованості, які повинні бути встановлені в кожному приміщенні, кла-

панів-відсікачів постачання водню в конкретне приміщення.

Необхідна спільна робота газової галузі і електроенергетичної в напрямку синергії між газовими та електричними мережами, побудови так званих смарт газових мереж, щоб забезпечити більш гнучкі резервні та збалансовані потужності, розвивати відновлювану енергетику. Таку синергію можна реалізувати шляхом виробництва водню з надлишків електроенергії за допомогою електролітичних установок та генерації електроенергії шляхом спалювання водню в газових турбінах або застосуванням водневих паливних елементів.

Доцільною є робота щодо розвідки золотого водню в Україні.

У науці доцільно зосередити дослідження на питаннях впливу змішування водню з природним газом на режимні параметри транспортування суміші, впливу водню на стінку труб і зварні шви, особливо магістральних газопроводів, інші матеріали. Необхідні дослідження щоб визначити можливість зберігання водню в підземних сховищах газу. Потрібні розробки, які б дали змогу зберігати вуглекислий газ у відпрацьованих газових і нафтових родовищах, водень, вуглекислий газ у соляних покладах, соляних печерах, шахтах. Доцільні дослідження впливу додавання водню в природний газ на роботу газових турбін, технологічного обладнання газопроводів, приладів споживання. Необхідні дослідження пов'язані з безпекою, герметичністю трубопроводів. Потрібні розробки дешевих, ефективних і довговічних технологій використання водню в різних галузях промисловості, особливо металургії, цементній галузі, хімічній промисловості тощо.

Необхідний постійний пошук потенціалу щодо виробництва та використання водню в Україні.

У міру розвитку водневої енергетики дослідники, інвестори і виробники будуть показувати нові технічні досягнення, які ще більше будуть прискорювати розвиток водневої енергетики.

Результати наукових досліджень дадуть змогу розвинути нормативну базу, модернізувати існуючі та розробити нові стандарти, які будуть встановлювати вимоги до виробництва, транспортування, зберігання та використання водню, його якості. Якщо в газову мережу буде ще додаватись біогаз то до якості цього газу і мультигазової суміші. Технічно обґрунтовані норми і стандарти будуть основою для безпечного впровадження і комерціалізації водню і пов'язаних з ними технологій.

В освіті необхідне формування інтелектуального середовища, щоб формувати потужну базу знань в сфері водневої енергетики. Потрібно розробити компетентності та кваліфікації, створити водневу освітньо-професійну програму, курси підвищення кваліфікації фахівців газової галузі. Щоб надавати якісну освіту, потрібно розробити навчальні матеріали, в тому числі навчальні матеріали щодо безпечних методів роботи з воднем. Точна та чітка інформація повинна бути доступна кожному, хто цікавиться навчанням, пов'язаним з водневою енергетикою, підвищенням кваліфікації. Потрібне поширення обізнаності про такі можливості. Також потрібне поширення обізнаності про водень серед широкої громадськості, щоб започаткувати розвиток довіри громади до водню, соціальне сприйняття водню, формування розуміння вигоди, необхідності переходити на водневі технології чи то в транспорті чи бізнесі або побуті, знати питання безпеки. Тут не потрібно виключати і студентів, викладачів, працівників галузі тощо. Потрібно підвищити глобальну обізнаність, популяризувати знання і технології щодо побудови водневої енергетики. Тут доцільним є створення пілотних демонстраційних проектів з повного ланцюжка виробництва і використання водню на базі університетського кампусу. Це дало б змогу наглядно демонструвати переваги водню, безпечність водневих технологій, їх доцільність і кліматичну нейтральність, що б підвищило соціальне сприйняття водню.

Треба формувати розуміння у різних галузях промисловості необхідності переходу на кліматично нейтральні джерела енергії, необхідності пошуку шляхів цього здійснення.

Для старту такої освітньої діяльності, старту університетських водневих наукових досліджень та організації пілотних демонстраційних проектів потрібна цільова підтримка.

У довгостроковій перспективі доцільно розглядати можливість створення водневих центрів.

Питання побудови водневої енергетики є надзвичайно складне, глобальне і багаторівневе, а тому для його вирішення потрібна надзвичайно тісна співпраця між урядом, газотранспортними, газовидобувними, газорозподільними компаніями, підприємствами, які будуть використовувати водень у великих кількостях, регіональними органами виконавчої влади, науково-дослідними інститутами, освітніми закладами. Також потрібна міжнародна співпраця. Очевидно, що вказівником має бути Національна воднева стратегія, яку вже мають багато

країн. Тоді доцільно буде визначити, які країни мають подібні стратегії (експортно чи імпоротно орієнтовані, або орієнтовані на власний ринок), будуть рухатись в подібному напрямку і максимально налагоджувати співпрацювати з ними. Потрібен обмін набутими знаннями між освітніми закладами, науково-дослідними інститутами та газовими компаніями, споживачами водню, міжнародна співпраця.

Висновки

Найважливішу роль у побудові водневої енергетики повинна відіграти газова галузь України, вона повинна стати лідером цього процесу. Для цього її треба трансформувати в напрямку водневої енергетики. Вона повинна максимально залучатись або й організувати перші демонстраційні проекти, масштабувати успішні проекти таким чином, щоб створити регіональну, а згодом і національну водневу інфраструктуру, залучатись до виробництва водню, особливо в коротко- і середньостроковій перспективі синього водню для чого в неї є усі ресурси (газ, можливість з зберігання вуглекислого газу), зобов'язана поєднати виробників і споживачів водню, зокрема надати доступ до водню найперше виробникам, які будуть експортувати товари і сплачувати платіж за парникові викиди СВАН, тоді іншому бізнесу, транспортному сектору, комунальним і побутовим споживачам щоб Україна виконала свої зобов'язання в рамках Паризької угоди. Повинна забезпечити транзитні можливості для експорту водню, а також за необхідності і можливості щодо транзиту вуглекислого газу з Європейського Союзу в місті його зберігання в Україні, забезпечити можливості з довгострокового зберігання великих обсягів водню, вуглекислого газу. Чим раніше розпочнеться розгортання процесів з трансформації газової галузі, тим швидше буде досягнуто розуміння технічних проблем, знайдено шляхи їх подолання, розпочато масштабування успішних водневих проектів.

Для швидкої і успішної трансформації газової галузі в напрямку водневої енергетики сприятливими чинниками є наявність в Україні газотранспортних, газовидобувних, газорозподільних компаній, науково-дослідних інститутів, освітніх закладів, розгалуженої газотранспортної системи, яка інтегрована з міжнародними енергетичними ринками та поєднана з розгалуженими газовими мережами, сховищами газу. На сьогодні газотранспортна система має багато резервних можливостей, а тому треба шукати шляхи їх використання. В умовах

сучасності сформувалась нова генерація кваліфікованих фахівців та є достатньо кваліфіковані працівники з значним технічним досвідом в енергетичному секторі, які можуть швидко освоювати навички безпечної роботи з воднем.

Така трансформація буде сприяти швидкому розвитку відновлюваних джерел енергії, забезпечувати максимальну стабільність, гнучкість енергосистеми загалом.

Водень є сучасним світовим енергетичним, екологічним трендом який надзвичайно швидко набуває силу, потужність і масштаби якого сьогодні тільки наближено оцінюють провідні аналітики. Не слідування за цим потужним трендом викине українську енергетичну систему і певною мірою енергетично залежну економіку на периферію цивілізованості, значно ускладнить або унеможливить виконання затвердженого урядом Національного внеску України до Паризької угоди щодо скорочення викидів парникових газів до рівня 35 % порівняно з 1990 роком до 2030 року і дані Україною в Глазго зобов'язання щодо вуглецевої нейтральності до 2060 року.

Література / References

1. <https://www.epravda.com.ua/news/2021/10/29/679216/>
2. <https://www.eurointegration.com.ua/experts/2021/12/13/7131421/>
3. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe: Brussels, 2020. 24 p.
4. The National Hydrogen Strategy / Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of Germany, 2020. 32 p.
5. Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r, 2020. 50 p.
6. UK Hydrogen Strategy: Crown copyright, 2021. 121 p.
7. Hydrogen strategy for Canada, 2021. 141 p.
8. The Norwegian Government's hydrogen strategy / Norwegian Ministry of Petroleum and Energy and Norwegian Ministry of Climate and Environment. 55 p.
9. Australia's national hydrogen strategy: Commonwealth of Australia, 2019. 136 p.
10. <https://www.dsnews.ua/future/reakciya-zameshcheniya-kak-izmenitsya-nash-mir-posle-pobedy-vodoroda-nad-karbonom-09032021-418131>
11. Program Manager Hydrogen Gasunie in a transitioning energy market / R. Schutte: Brussel, 2018. 7 p.
12. Veijer J. Synergy Action TSO: Salzburg, 2018. 7 p.

13. <https://renewablesnow.com/news/bp-preps-big-green-hydrogen-project-in-uk-with-60-mw-initial-phase-763167/>
14. <https://www.h2bulletin.com/bp-to-develop-h2teesside-1-gw-blue-hydrogen-production-project/>
15. <https://economics.segoday.ua/economics/enews/ssha-nachali-zahvat-evropeyskogo-rynka-budut-proizvodit-v-ispanii-zelenyyu-vodorod-1527728.html>
16. <https://renen.ru/equinor-planiruet-pervuyu-v-mire-krupnyu-elektrostantsiyu-na-100-vodorode/>
17. Leeds City Gate H21 : Report. Interactive-executive summary, 2016. 375 p.
18. The GRHYD project Grid Management by Hydrogen Injection for Reducing Carbonaceous Energies Isabelle ALLIAT, ENGIE Lab CRIGEN. Berlin: OFAT, 2017. 25 p.
19. <https://www.engie.com/en/businesses/gas/hydrogen/power-to-gas/the-grhyd-demonstration-project>
20. HyDeploy Project Gas Network Innovation Competition: Cadent Second Project Progress Report (PPR), 2018. 28 p.
21. Isaac T. HyDeploy: The UK's First Hydrogen Blending Deployment Project. *Clean Energy Journal*. 2019. 3:2. P. 114–125.
22. <https://www.ans.org/news/article-2459/nuscale-modules-hydrogen-production-numbers-updated/>
23. <https://www.h2greensteel.com/>
24. <https://www.siemensgamesa.com/products-and-services/hybrid-and-storage/green-hydrogen>
25. <https://www.airbus.com/en/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe>
26. https://global.kawasaki.com/en/corp/newsroom/news/detail/?f=20191211_3487
27. <https://teco2030.no/>
28. <https://www.epravda.com.ua/news/2021/04/12/672883/>
29. <https://www.railway-technology.com/features/video-uk-launches-first-hydrogen-powered-train-hydroflex/>
30. <https://www.toyota-europe.com/world-of-toyota/articles-news-events/2020/mirai-2020>
31. https://news.infocar.ua/poslushayte_kak_zvuchit_toyota_corolla_s_dvigatelem_na_vodorode_142876.html
32. <https://mind.ua/news/20223567-nimechchina-j-ukrayina-uzgodili-pershij-proekt-z-virobnictva-vodnevo-go-paliva>
33. <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2021/11/3/679329/>
34. <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>
35. Crisostomi E., Raugi M., Franco A., Giunta G. The smart gas grid: State of the art and perspectives. *4th IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, 2013, 6-9 October, Copenhagen, 5 p.
36. <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2021/07/23/676200/>
37. U.S. Department of Energy. February 2020. Hydrogen and Fuel Cells Program Record 19009. “Hydrogen Production Cost From PEM Electrolysis -2019”, 2020. 15 p.
38. <https://www.thetimes.co.uk/article/british-scientists-lead-the-way-in-hydrogen-gold-rush-frj2v8hts>
39. <https://www.earth.ox.ac.uk/2021/09/gold-hydrogen-oxford-earth-sciences-in-the-times>
40. <https://ryzehydrogen.com/2020/12/16/hydrogen-fund-backs-exploration-of-gold-hydrogen-in-spain>
41. <https://www.epravda.com.ua/projects/greendeal/2021/12/29/681028/>
42. Odgen J., Myers Ja., Scheitrum D., McDonald Z., Miller M. Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel. Insights from the literature. *Energy Policy*. 2018. 115. P. 317–329.
43. Winkler-Goldstein R., Rastetter A. Power to gas: the final breakthrough for the hydrogen economy. *Green*. 2013. 3(1). P. 69–78.
44. <https://www.industrie-techno.com/article/grhyd-atteint-les-20-d-hydrogene-dans-le-reseau-de-gaz.56465>
45. Impact of hydrogen admixture on combustion processes – Part I: Theory. Testing Hydrogen admixture for Gas Applications Deliverable: D2.2 Status: Final, Dissemination level, 2020. 30 p.
46. Kuczyński S., Łaciak M., Olijnyk A., Szurlej A., Włodek T. Thermodynamic and Technical Issues of Hydrogen and Methane-Hydrogen Mixtures Pipeline Transmission energies. *Energies*. 2019. 12. P. 569–590.
47. TF_CM3TK-121 Guidance Note on Energy Determination when Non-Conventional Gases are injected into the Gas Network. Marcogaz. Technical association of the European natural gas industry, 2020. 26 p.
48. Paul E., Dodds A. Ste'phanie Demoullin-Conversion of the UK gas system to transport hydrogen. *International journal of hydrogen energy*. 2013. 38. P. 89–100.
49. Technical memorandum NO. 1785 Concepts NREC Project No. 10195 Prepared for: The Department of Energy (DOE) Project Director: Colin Osborne Project Manager: Francis A. Di Bella. Development of a centrifugal hydrogen pipeline gas compressor final report, 2015. 181 p.

50. <https://www.turbomachinerymag.com/view/readying-pipeline-compressor-stations-for-100-hydrogen>
51. Hydrogen infrastructure –the pillar of energy transition. The practical conversion of long-distance gas networks to hydrogen operation. Siemens-energy, 2021. 26 p.
52. European Hydrogen Backbone How a dedicated hydrogen infrastructure can be created july, 2020. 29 p.
53. Department of Energy Hydrogen Program Plan, 2020. 56 p.
54. WG-STO-16-08 (D085) Guidance Injection of Hydrogen/natural gas admixtures in Underground Gas Storage (UGS) MARCOGAZ8th May, 2017. 13 p.
55. https://rus.lb.ua/economics/2019/10/28/440848_vitrenko_sluchae_prekrashcheniya.html
56. WG_HLS-268 Detection and measuring of pure hydrogen and blends of natural gas with hydrogen April 2021 Marcogaz, 2021. 5 p.
57. Carbon monoxide and syngas pipeline systems IGC Doc 120/04/E Globally harmonised document. European industrial gases association. EIGA, 2004. 81 p.
58. Japan`s Hydrogen Society Ambition: 2020 Status and perspectives. Ifri, 2020. 24 p.
59. <https://finbalance.com.ua/news/u-kabmini-proponuyut-zaboroniti-import-i-restratsiyu-dizelnikh-ta-benzinovikh-avto>
60. <https://mind.ua/news/20223565-nimechchina-proponue-zbilshiti-dopomogu-ukrayini-v-obmin-na-znyattya-sankcij-ssha-proti-pivnichnogo-potoku>