УКРАЇНСЬКИЙ ЯДЕРНИЙ ФОРУМ

UKRAINIAN NUCLEAR FORUM ASSOCIATION

Ядерний водень – шлях до декарбонізації та енергетичної безпеки України

Асоціація «Український ядерний форум»
голос ядерно-промислового комплексу України

atomforum.org.ua

Вступне слово

Перед Україною в енергетичній сфері стоїть цілий ряд викликів. Це декарбонізація економіки та енергетики зокрема, забезпечення сталого розвитку та енергетичної безпеки. Відповіддю на ці виклики може бути розвиток водневої економіки та виробництво чистого водню. Ядерна галузь України може відіграти ключову роль у цьому процесі.

По-перше, ядерні технології можуть забезпечити у великій кількості електроенергію та тепло для виробництва чистого водню. По-друге, в ядерній галузі є розвинута інфраструктура для будівництва та експлуатації як атомних станцій, так і електролізних установок. Зокрема на підприємствах, які входять до Асоціації, працює більше 140 тис. високопрофесійних працівників. По-третє, в Україні є підприємства, які можуть забезпечити ланцюжок поставок необхідного обладнання та послуг.

Асоціація «УЯФ» підготувала цей аналітичний матеріал де показані можливості ядерної енергетики щодо забезпечення виробництва чистого водню, а також наші рекомендації щодо впровадження водневої економіки в Україні.

Сподіваємось, що наші рекомендації будуть враховані при підготовці водневої стратегії та інших документів.

Кухарчук Микола Петрович,
Генеральний директор Асоціації «УЯФ»

Асоціація «Український ядерний форум»
голос ядерно-промислового комплексу України

до складу якої входять 19 підприємств атомно-промислового комплексу України

Асоціація «Український ядерний форум» є асоційованим членом **FORATOM** з 2011 року.

Резюме

На сьогоднішній день основний виклик для людства – це проблема глобального потепління. Глобальне потепління пов'язується з парниковим ефектом і призводить до зміни клімату у планетарних масштабах. Передові країни світу приймають відповідні стратегії для зменшення промислових викидів та переходу на використання екологічно чистих технологій. Так в ЄС прийнята програма Європейський зелений курс (Europeanian Green Deal), яка передбачає до 2050 року досягнути нульових викидів парникових газів. Важливу роль у цьому процесі має відіграти водень. Водень – універсальний енергоносій, для його отримання можна використовувати різні джерела енергії: природний газ, нафту, вугілля, відновлювальні джерела енергії (ВДЕ) та ядерну енергію. Водень можна транспортувати трубопроводами, в рідкій формі – суднами та іншим транспортом подібно до зрідженого газу. Водень може перетворюватись в електроенергію, метан для домашніх господарств, паливо для транспорту.

Для забезпечення переходу до чистої економіки знадобиться велика кількість водню. Для вирішення цієї задачі необхідно залучити всі джерела енергії та технології особливо для виробництва чистого водню, виробництво якого не супроводжується викидами вуглецевих газів.

Ядерна енергетика як перевірена технологія, виробництво якої не супроводжується викидами вуглецевих газів, може відіграти ключову роль в виробництві водню:

- Діючі АЕС можуть виробляти чистий водень через холодний електроліз;
- Реактори нового покоління, у тому числі малі модульні реактори (ММР), більш ефективно через паровий електроліз, можуть виробляти чистий водень;
- Інноваційні ММР, які знаходяться в процесі впровадження, працюють при температурах 600-900 °C, можуть отримувати чистий водень з допомогою технології термохімічного розчеплення води.

Перспективним вбачається створення так званих гібридних енергосистем, які включають АЕС, ВДЕ та установки виробництва водню. Такі енергосистеми вирішують екологічні питання виробництва, ефективність та маневреність енергосистеми, а також забезпечують при цьому енергетичну безпеку.

В Україні на рівні Уряду та Президента обговорюються питання підготовки водневої стратегії та розвитку безвуглецевої економіки. В даному документі викладено бачення Асоціації «Український ядерний форум» щодо місця ядерної енергетики в виробництві чистого водню.

Водень сьогодні та у перспективі

Сучасний стан виробництва водню

Зараз водень використовують переважно в промислових цілях. За даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА)[1], щорічно використовується близько 70 млн тон водню в чистому вигляді. Переважно для переробки нафти та виробництва аміаку. Разом із тим ще 45 млн тон водню, який не відокремлювався від інших газів, використовуються в різних промислових цілях. Більша частина водню виробляється з викопного палива, а саме 76% із природнього газу та 22% при газифікації вугілля. І тільки 2% водню виробляється методом електролізу[2].

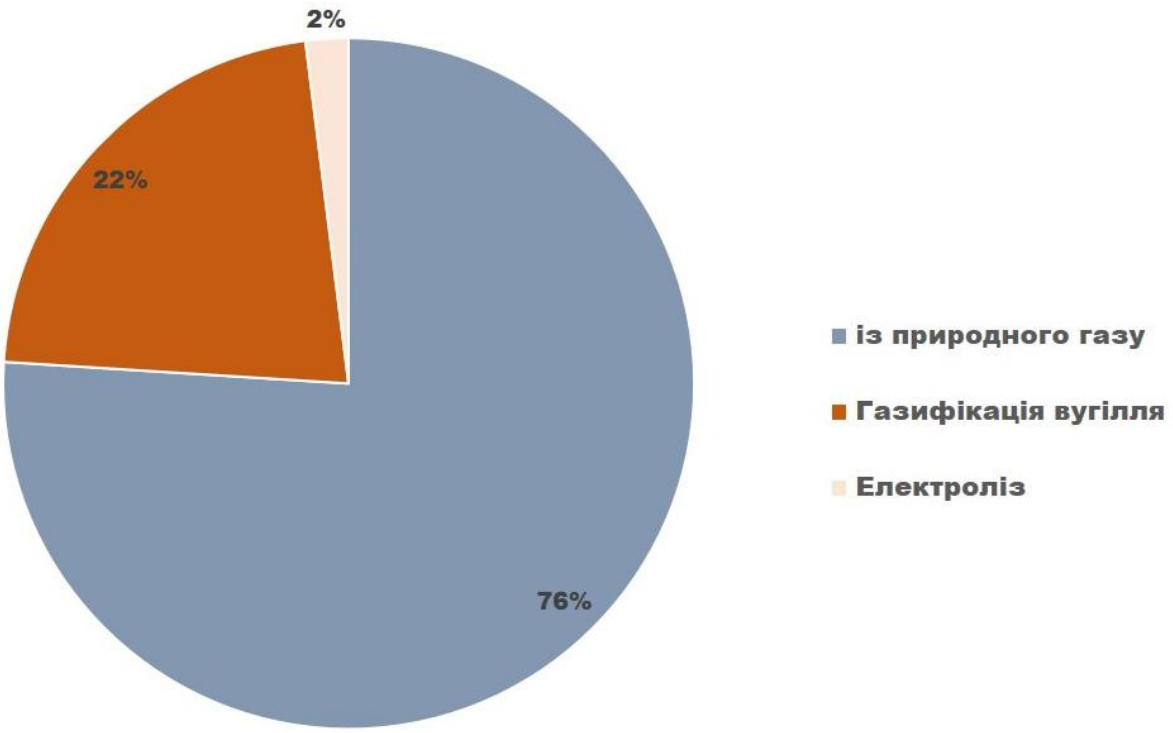

Рис. 1. Графічне зображення виробництва водню у світі

Перспективи використання водню для декарбонізації

Міжнародне Енергетичне Агентство (МЕА) у своєму досліджені «Майбутнє водню»[3] наголошує, що водень буде відігравати ключову роль у чистому, безпечному та доступному енергетичному майбутньому.

[1] The Future of Hydrogen – Analysis - IEA, 2019
[2] USDOE_FE_Hydrogen_Strategy_July2020.pdf (energy.gov)
[3] The Future of Hydrogen – Analysis - IEA, 2019

Експерти ради з водневих технологій (Hydrogen Council) в своїй доповіді стверджують, що до 2050 року на водень буде припадати 18% всіх енергетичних потреб світу. За іншими прогнозами, до цього часу світове споживання водню виросте до 370 млн тон на рік (до 2100 року - до 800 млн тон).

Водень може відігравати ключову роль у декарбонізації транспортного сектору, таких галузей промисловості як хімічна, сталеливарна та інших. Водень може зробити внесок в декарбонізацію енергетичних систем та забезпечення чистою енергією домогосподарств.

Рис. 2. Схематичне зображення використання водню

Водень сприятиме широкомасштабній декарбонізації або, принаймні, зниженню викидів у різних галузях, але ринок водню залишається в зародковому стані, де домінують промислові споживачі. Отже, подвійні виклики, з якими стикаються політики, полягають у розширенні ринку, стимулюючи як виробництво, так і споживання водню, а також збільшення частки чистого водню на ринку, без шкоди для конкурентоспроможності.

Провідні країни світу розробили стратегії та відповідні дорожні карти щодо розвитку водневої економіки. Україна теж почала процес підготовки водневої стратегії. При її підготовці важливо врахувати власний енергетичний потенціал, можливості промисловості та енергетичної галузі, а також досвід передових країн світу. Важливо врахувати водневі стратегії країн ЄС, а в першу чергу досвід країн зі значною часткою ядерної енергетики.

Воднева стратегія Європейського Союзу

У липні 2020 року Європейська Комісія оприлюднила Водневу стратегію[4] для кліматично нейтральної Європи, покликану доповнити та підтримати як Стратегію інтеграції енергетичної системи, так і Промислову Стратегію. Всі вони є важливими компонентами Європейського зеленого курсу, метою якого є досягнення кліматичної нейтральності ЄС до 2050 року. Стратегія проголошує виробництво відновлюваного водню пріоритетом для Європейського Союзу, але вона визнає, що в коротко- та середньостроковій перспективі для зменшення сукупних викидів та підтримки більш широкого споживання водню кінцевим споживачам будуть потрібні всі низьковуглецеві виробництва водню. Необхідно зазначити, що в стратегічному документі «Чиста планета для всіх» Європейська Комісія підтвердила, що ядерна енергетика разом із ВДЕ становитиме основу європейської енергетичної системи без вуглецю.

Відповідно до Дорожньої карти, виконання Стратегії ЄС поділяється на три етапи кожен із яких має свої власні показники та цілі.

На першому етапі (2020-2024) основна увага приділяється декарбонізації існуючих виробництв водню, основним джерелом яких є промисловий сектор, та збільшенню споживання водню в нових галузях кінцевого використання, в інших промислових процесах та вибраних типів транспортних засобів. Виробнику електролізерів потрібно буде збільшити масштаби - від 10 МВт сьогодні до 100 МВт.

На другому етапі (2025-2030) водень інтегрується у цілісну енергетичну систему, оскільки відновлюваний водень має стати конкурентоспроможним з іншими формами виробництва водню, більше того політика на стороні попиту вимагатиме стимулювання використання водню. До 2030 року водень почне використовуватися для балансування відновлюваної електроенергії та як довгостроковий вектор накопичення енергії. Також стане можливим транспортування водню на більші відстані, і потрібно буде спланувати та розробити водневу інфраструктурну мережу, що потенційно може перетворити частину інфраструктури природного газу. Розвиватиметься міжнародна торгівля, причому сусідні країни Східної Європи, Південного та Східного Середземномор'я будуть визначені як ймовірні партнери. До кінця цього етапу політика має забезпечити відкритий та конкурентоспроможний європейський ринок водню з міжнародною торгівлею та ефективним розподілом виробництва водню.

На третьому етапі (2031-2050) водень повинен досягти зрілості та розподілитись по усіх секторах, в яких інші шляхи декарбонізації неможливі та/або неекономічні. На цьому етапі авіація та судноплавство визначаються як потенційні кандидати на включення в загальний процес декарбонізації.

[4] A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, 2020, hydrogen_strategy.pdf (europa.eu)

Воднева стратегія ЄС передбачає установку не менше 6 ГВт електролізерів і виробництво до одного мільйона тон відновлюваного водню до 2024 року. До 2030 року потужність станцій для генерації відновлюваного водню на території країн ЄС зросте до 40 ГВт. Такий же обсяг потужностей Єврокомісія підтримає і за межами ЄС. З них 10 ГВт пропонується реалізувати Україні. Тобто, кожну четверту водневу генерацію поза ЄС може виробляти наша країна.

Швидке розширення потужності електролізерів потребуватиме значних інвестицій. В Стратегії зазначено, що до 2030 року інвестиції в електролізери становитимуть 24-42 млрд. євро, зростучи до 180-470 млрд. євро до 2050 року.

Воднева стратегія Франції

Франція опублікувала у вересні 2020 року другу національну стратегію[5] щодо водню, яка передбачає державне фінансування у розмірі 7 млрд. євро на період 2020-2030 рр. Це фінансування буде доступне через тендери на проекти по ланцюгу постачання водню, розробку паливних елементів та інші пропозиції щодо цільових досліджень. Передбачається також запровадження механізму підтримки на основі премій для стимулювання приватних інвестицій.

У стратегії основна увага приділяється декарбонізованому водню - тобто водню, що виробляється низьковуглецевим способом та включає ядерний водень, а також водень із ВДЕ. Французька стратегія орієнтована на використання національного водню.

Воднева стратегія Німеччини

Німеччина оприлюднила національну водневу стратегію[6] у червні 2020 року, вона передбачає використання як національного водню так і його імпорту з європейських чи інших країн, але виключно з відновлювальних джерел.

Завдання щодо встановленої потужності електролізерів: 5 ГВт до 2030 року та 10 ГВт до 2040 року за підтримки 7 млрд. євро державного фінансування, а також додатково 2 млрд. євро для підтримки міжнародного співробітництва. Швидке зростання потужності електролізерів потребуватиме значних інвестицій, за оцінками до 2030 року інвестиції в електролізери становитимуть 24-42 млрд. євро, зростаючи до 180-470 млрд. євро до 2050 року. Додатково необхідно ще 220-340 млрд. євро для інвестування у сонячні та вітрогенераційні потужності для підключення від 80 до 120 ГВт. Ці цифри не

[5] National strategy for the development of decarbonised and rentable hydrogen in France, https://www.bdi.fr/wp-content/uploads/2020/03/PressKitProvisionalDraft-National-strategy-for-the-development-of-decarbonised-and-renewable-hydrogen-in-France.pdf
[6] The National Hydrogen Strategy, BMWi - Federal Ministry for Economic Affairs and Energy - The National Hydrogen Strategy

включають інвестиції, необхідні для створення інфраструктури кінцевого споживання водню.

Ядерна енергетика в водневій економіці

Питаннями виробництва водню із використанням ядерних технологій почали займатись починаючи із 1960-х років минулого століття. Але вони не знайшли широкого застосування, виходячи із наявності більш доступних та економічних технологій виробництва водню. Крім того, ядерна промисловість в цей період втрачала популярність, як наслідок, зменшились інвестиції в її розвиток та відбулось згортання розвитку ядерних технологій виробництва водню.

Інтерес відновився через занепокоєння щодо зміни клімату, спричиненої, в першу чергу, викидами двоокису вуглецю. Так, наприклад, кожен кілограм водню із природного газу, який на сьогоднішній день виділяє найменше вуглецю при переробці, призводить до викидів близько 9 кг двоокису вуглецю. Технології виробництва водню на основі електроенергії та тепла взагалі не призводять до викидів двоокису вуглецю. Ядерні реактори якраз можуть забезпечувати у великих обсягах як виробництво електроенергії так і тепла.

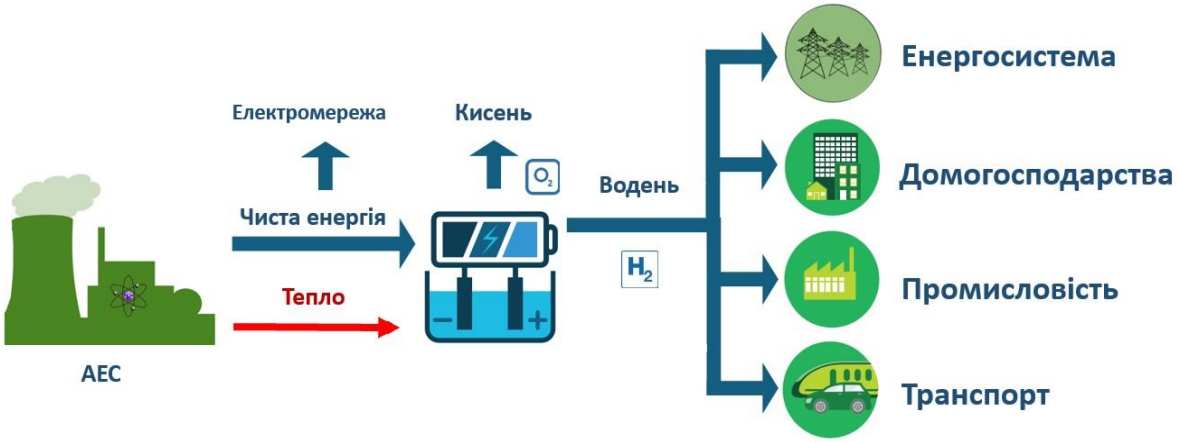

Рис. 3. Схема виробництва ядерного водню

Ядерна галузь через великі реактори вже сьогодні готова забезпечувати виробництво чистого водню. Малі модульні реактори, мікрореактори та інноваційні ядерні реактори, які в процесі впровадження, будуть більш ефективно забезпечувати виробництво чистого водню.

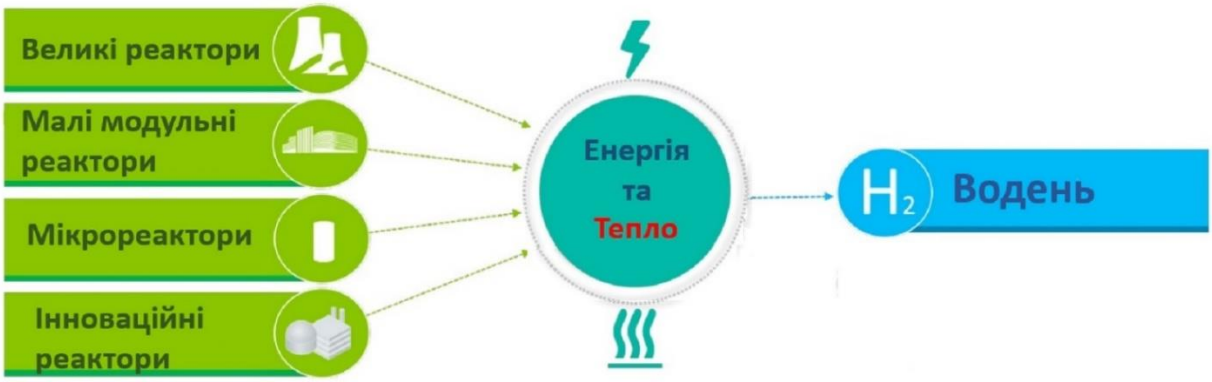

Рис. 4. Ядерні реактори для виробництва водню

На сьогоднішній день основними технологіями виробництва водню з залученням ядерної енергетики є:

(1) Виробництво водню шляхом електролізу холодної води. Вода розщеплюється в електролізних установках з виробництвом водню та кисню.

(2) Високотемпературний паровий електроліз (ВТПЕ).

Споживання електроенергії при електролізі води можна зменшити, не електролізуючи воду, а саме пару, тобто частина необхідної енергії для електролізу переходить з електричної на теплову енергію. Паровий електроліз - високотемпературний паровий електроліз відбувається приблизно між 600-1000 °C і вимагає на третину менше енергії, ніж електроліз із холодної води. Використання тепла з нижчою температурою може також збільшити ефективність електролізу. Так електроенергія та тепло вироблені існуючими атомними електростанціями при температурі близько 300 °C також можуть підвищити ефективність електролізу.

(3) Термохімічне розчеплення води при нагріванні до 600-900 °C у присутності хімічних каталізаторів. Такі температури можуть забезпечувати інноваційні малі модульні реактори, такі як високотемпературні газові реактори (ВТГР). На сьогоднішній день в світі розробляються кілька проектів цих реакторів:

- Xe-100 (розробляється в США);
- PBMR-400 (південноафриканський реактор);
- GTHTR300 (японський ВТГР);
- SC-HTGR (реактор з досить великою тепловою потужністю (625 МВт), який розробляє американська філія французької компанії Framatome);
- HTR-PM (будується в Китаї і буде введений в експлуатацію в 2021 році).

Рис. 5 . Технології виробництва водню з залученням ядерної енергетики

Економічні переваги ядерного водню

Всі методи виробництва водню, крім тих, які мають фотохімічну основу, вимагають тепла, електричної енергії або обох джерел.

Ядерний реактор забезпечує у великій кількості як тепло, так і електроенергію, з одного загального джерела – реактора. При цьому ядерні технології можуть забезпечити виробництво водню, маючи значні переваги перед іншими технологіями:

- **Якість:** Водень, вироблений з використанням ядерної енергії, може бути надзвичайно чистим і, таким чином, відповідати вимогам широкого спектру кінцевого використання, включаючи транспортні засоби на паливних елементах, які потребують низького вмісту оксиду вуглецю, сірки та кисню.
- **Ефективність**: Конкурентна ціна на електроенергію АЕС, а також тепло з високою температурою підвищують термодинамічну ефективність процесу виробництва водню.

  Забезпечення АЕС надійного виробництва електроенергії та тепла протягом року дають можливість досягти високих коефіцієнтів навантаження установок з виробництва водню, знижуючи витрати на виробництво водню.

  Використання тепла та енергії від АЕС, а також можливість переключення певної кількості енергії між виробництвом водню та задоволенням загальних потреб у електроенергії, що потенційно може зменшити витрати на систему.
- **Безпека:** Вдосконалені високотемпературні газові реактори є достатньо безпечними, щоб їх можна було розташовувати поблизу систем

виробництва водню та споруд, які згодом перетворюють водень в енергоносії, такі як аміак.

- **Масштабованість:** Атомно-енергетичні системи можуть виробляти велику кількість тепла та електроенергії на невеликих за розмірами площадках і можуть бути розгорнуті у великих масштабах разом із супутніми установками з виробництва водню.
- **Гнучкість розміщення:** Переміщення водню дороге. Ядерний водень пропонує більш дешевий варіант отримання водню близько до кінцевих споживачів.

Згідно з дослідженням компанії NuScale Power[7] установка з легководними модулями NuScale потужністю 250 МВт може виробляти 2053 кг водню за годину або майже 50 т на день.

Один модуль NuScale потужністю 60 МВт може виробляти водню для заправки близько 38 000 автомобілів на паливних елементах. Слід також зазначити, що для підвищення температури пари на виході з 300 °C до 800 °C при масових витратах, необхідних для ВТПЕ, треба тільки 1,8 МВт, або 2% від загальної вихідної потужності.

Оцінки витрат на виробництво чистого водню

Проведено багато досліджень, які вивчали потенційні витрати на виробництво чистого водню з ядерної, фотоелектричної та вітрової енергії. Відповідно до заключень цих досліджень виробництво ядерного водню може бути потенційно конкурентним з іншими методами виробництва чистого водню уже сьогодні, і особливо у майбутньому при впровадженні нових технологій.

В недавньому звіті Консультативної ради з питань ядерних інновацій та досліджень Великобританії (NIRAB)[8] зазначається, що водень із атомної енергії може вироблятися за $ 2,5/кг-H_2 порівняно з вартістю виробництва з природного газу з системою уловлювання CO_2, яка становить близько $ 2,3 / кг-H_2.

Французька Академія Технологій провела дослідження щодо впливу ціни на електроенергією та коефіцієнтів навантажень різних джерел електроенергії на ціну виробництва водню. Відповідно до цього дослідження ціна водню виробленого із електроенергії діючих АЕС є конкурентною і становить 2,25 €/кг для лужних електролізів та 2,75 €/кг для електролізних установок PEM.

[7] Clean Hydrogen Production | NuScale Power

[8] Achieving Net Zero: The role of Nuclear Energy in Decarbonisation, Nuclear Innovation and Research Advisory Board, April 2020, https://www.nirab.org.uk/cdn/uploads/attachments/NIRAB_Achieving_Net_Zero_-_The_Role_of_Nuclear_Energy_in_Decarbonisation_-_Screen_View.pdf

Таблиця 1. Порівняння впливу цін на електроенергію та коефіцієнта навантаження різних технологій на кінцеву вартість водню[9]

Джерело енергії	LCOE (€/MWh)	Коефіцієнт навантаження	CAPEX/Вартість виробництва	
			1000 €/kw	500 €/kw
Діючі АЕС (впродовж життєвого циклу)	32	90%	2.75 €/кг	2.25 €/кг
Нові АЕС	80-100	90%	5.4-6.5 €/кг	4.9-6 €/кг
Сонячні батареї	65	15%	8.5 €/кг	6 €/кг
Вітрові станції	74	23%	7 €/кг	5.6 €/кг
Вітрові станції (морські)	140 70	40%	9.6 €/кг 5.7 €/кг	8.6 €/кг 4.8 €/кг
Ринок	40-50	90%	3-4 €/кг	2.5-3.25 €/кг

Гібридні енергосистеми на основі синергії АЕС і ВДЕ

В світі активно розвиваються концепції гібридних енергосистем (NR HES) на основі скоординованого використання ядерної та відновлюваної енергії, які здатні виробляти електроенергію з можливістю диспетчерського управління та виробляти водень. Такі енергосистеми забезпечують низький обсяг викидів, скорочуючи використання викопних видів палива та забезпечуючи при цьому енергетичну безпеку.

Гібридні енергосистеми ядерної та відновлюваної енергії це комплексні установки, керовані єдиною організацією, і включають в себе ядерний реактор для вироблення тепла, тепловий цикл для перетворення теплової енергії в електричну, щонайменше одне поновлюване джерело енергії і промисловий процес, в якому використовується теплова та / або електрична енергія для виробництва водню.

Конфігурації гібридних енергосистем здатні виробляти відразу кілька продуктів з різних джерел енергії, контролюючи реалізацію продуктів, що виробляються з метою максимізації прибутку. Подібна гнучкість ставить гібридні системи ядерної та відновлюваної енергії в виграшне становище порівняно з системами на основі традиційних технологій, що виробляють лише один продукт і використовують мінімальну кількість джерел енергії.

[9] RÔLE DE L'HYDROGÈNE DANS UNE ÉCONOMIE DÉCARBONÉE (RAPPORT), Académie des technologies (academie-technologies.fr)

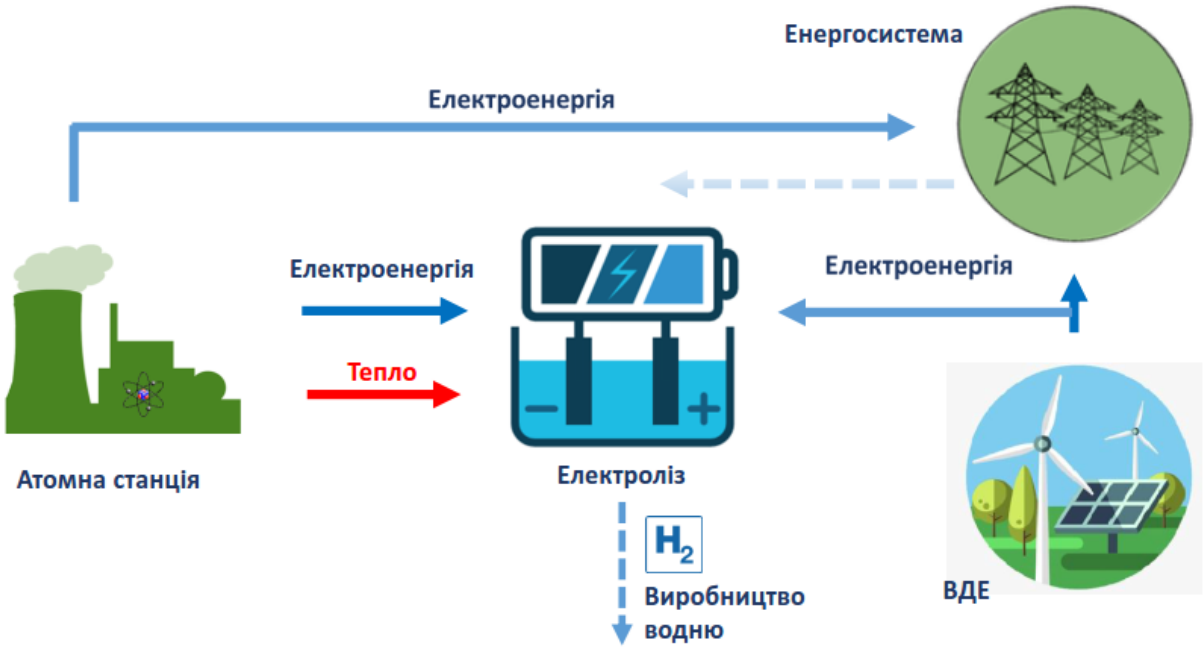

Рис. 6. Конфігурація гібридної системи АЕС і ВДЕ з ВТПЕ

Дана конфігурація передбачає, що в ядерному реакторі виробляється тепло, яке направляється на виробництво як електроенергії, так і на процес електролізу. В процесі електролізу використовується електроенергія, що виробляється АЕС, ВЕС і / або отримується з енергомережі.

Подібні гібридні енергосистеми мають такі економічні та соціальні переваги:

(1) Можливість диспетчеризації і гнучкого виробництва електроенергії для забезпечення потреб енергосистеми в енергії, потужності та додаткових послугах. Оскільки розподіл енергії між виробництвом електроенергії та промисловими процесами можна контролювати, гібридні енергосистеми на основі ядерної та відновлюваної енергії можуть збільшити виробництво електроенергії при високому попиті на неї, підтримуючи таким чином надійність енергосистеми, особливо в екстремальні періоди, коли генерація нестабільних ВДЕ дуже низька або взагалі відсутня. Коли ціни на електроенергію низькі, гібридні енергосистеми можуть збільшити використання енергії для виробництва водню.

(2) Зниження викидів оксиду сірки, оксиду азоту, двоокису вуглецю та твердих частинок в промисловому секторі шляхом виробництва технологічного тепла замість спалювання вугілля або природного газу. Водень може використовуватись як продукт для промисловості так як і паливо для високоманеврених енергетичних установок.

(3) Надання допоміжних послуг мережі, включаючи регулювання частоти і підтримання напруги. Гібридні енергосистеми на основі ядерної та відновлюваної енергії можуть надавати ці послуги, швидко нарощуючи

або знижуючи обсяги подачі електроенергії для регулювання енергосистеми.

Рекомендації для впровадження ядерної водневої економіки

Для України водень є перспективним паливом, яке за умов дотримання вимог техніки безпеки може замінити вуглеводневі джерела енергії та зменшити рівень енергетичної залежності країни. Основним завданням на цьому шляху є забезпечення високої ефективності виробництва, транспортування та зберігання водню, розробка конкурентоспроможних електролізних установок, у тому числі для добового і сезонного балансування електроенергетичної системи. Зважаючи на наявний науковий потенціал, ці завдання можуть бути вирішені в Україні вже у найближчій перспективі.

На АЕС України вже встановлені електролізні установки по виробництву водню, але, як і на багатьох АЕС світу, вони використовуються виключно для виробництва водню для власних потреб станцій.

Таблиця 2. Електролізні установки по виробництву водню на АЕС України

АЕС	Тип установки	Продуктивність	Кількість
Рівненська АЕС	СЕУ-20	20,5 м. куб. / год	2
Запорізька АЕС	СЕУ-20	20,5 м. куб. / год	2
Южно-Українська АЕС	СЕУ-20	20,5 м. куб. / год	2
Хмельницька АЕС	СЕУ-20	20,5 м. куб. / год	2

Україна країна з розвинутою інфраструктурою для впровадження ядерних технологій та експлуатації ядерних установок. На сьогоднішній день в ядерній енергетиці працює біля 140 тис. висококваліфікованих працівників.

Впровадження ядерних технологій виробництва водню створить тисячі додаткових робочих місць. Впровадження ядерного водню забезпечить енергетичну незалежність та енергетичну безпеку країни.

Для впровадження ядерного водню необхідно:

1. Класифікувати водень, який виробляється ядерними технологіями як чистий водень, виробництво якого не супроводжується шкідливими викидами, що впливають на навколишнє довкілля.
2. Вироблення Урядом чіткої Стратегії та політики щодо впровадження чистого водню. Стимулювання комерційного використання чистого водню.
3. Створити на рівні компаній чіткі довгострокові цілі щодо впровадження чистого водню.
4. Створити на рівні Уряду Комітет щодо впровадження чистого водню. В Комітет необхідно включити представників ядерної промисловості.
5. Створити та узгодити регуляторну базу щодо впровадження та використання водню.
6. Заохочувати міжнародне співробітництво для розвитку міждержавної інфраструктури та отримання передового досвіду, стандартів, тощо.
7. Передбачити інвестиційну підтримку пілотних проектів для зменшення ризиків при їх впровадженні.