

## ПРОЄКТ NUCLEAR POWERED HYDROGEN COGENERATION (NPHYCO) – ВОДНЕВІ ТЕХНОЛОГІЇ НА ДЮЧИХ АЕС

### ОЛЕКСАНДР МАЗУРОК

Ph.D., Генеральний директор

ТОВ "Енергобезпека Груп"

(Energy Safety Group)

### СПІВАВТОРИ:



Фахівці ТОВ "Енергобезпека Груп"



**Використання водню як енергоносія - одне із сучасних рішень для досягнення кліматичної нейтральності та декарбонізації економіки**

У XXI столітті світ активно протидіє проявам кліматичних змін. Через збільшення використання викопних видів палива з середини минулого століття обсяги викидів парникових газів стрімко зростають, що призводить до збільшення їх концентрації в атмосфері та парникового ефекту. Для сповільнення та припинення цієї негативної тенденції світ рухається до енергетичного переходу, а саме використання енергоносіїв з низькою ємністю вуглецю, посилення заходів з енергоефективності в усіх секторах економіки в економічно ефективний спосіб з дотриманням безпеки постачання енергоносіїв. Використання водню та його похідних вважається одним із рішень, яке сприятиме досягненню кліматичної нейтральності завдяки його численним можливим застосуванням як енергоносія або сировини у всіх секторах, особливо у тих, які важко декарбонізувати.

Технології виробництва водню, які супроводжуються мінімальною інтенсивністю викидів парникових газів, це:

- видобуток з підземних покладів (так званий "білий" водень);
- електроліз з використанням електричної енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії (так званий "зелений" водень);
- електроліз з використанням електричної енергії, виробленої з ядерної енергії (так званий "рожевий" водень).

Протягом останніх років понад 50 країн світу затвердили свої національні водневі стратегії, зелені книги, дорожні карти та інші стратегічні документи, які визначають пріоритетні напрями та державні політики з розвитку водневої енергетики як на національному, так і на міжнародному рівні.

Європейський Союз у 2020 році презентував Водневу стратегію для кліматично-нейтральної Європи до 2050 року, в якій основний акцент на наступні десятиліття зроблено на виробництві водню.

Україна не стоїть осторонь і також пропонує водневу стратегію на період до 2050 року. Ця стратегія, розглядає різні напрями виробництва низьковуглецевого водню. У тому числі передбачає, що використання електричної енергії, виробленої на АЕС, для виробництва низьковуглецевого водню є одним із перспективних напрямів для розвитку галузі водневої енергетики в Україні.

**Використання електричної енергії, виробленої на АЕС, для виробництва низьковуглецевого водню є одним із перспективних напрямів для розвитку галузі водневої енергетики в Україні**





## Приклади реалізованих проектів водневих станцій у світі

У січні 2021 року в Беннакурі, Канада, був запущений електролізер з протон-обмінною мембраною загальною потужністю 20 МВт, розроблений компанією Cummins, що є найбільшим у своєму роді діючим електролізером у світі. Ця воднева установка, призначена для виробництва водню в промислових масштабах, складається з чотирьох електролізерів NuLYZER1000 (рис. 1), кожен з яких має потужність 5 МВт і які розташовані всередині будівлі. Щорічно установка виробляє 3 000 тон водню.

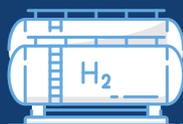
Німецька компанія RWE встановила лужний електролізер на газовій електростанції Емсланд у Лінгені, що робить його одним з найбільших діючих електролізерів у Німеччині. Загальна потужність установки 14 МВт, працює на відновлювальній енергії та може виробляти до 200 кілограмів зеленого водню на годину.

Найбільший у світі проект з виробництва "зеленого" водню розташований у Китаї на основі Ningxia Baofeng Energy Group, виробника хімікатів. Це лужний електролізер потужністю 150 МВт, який живиться сонячною батареєю потужністю 200 МВт. За розрахунками, електролізер такої потужності вироблятиме 23 700 тон водню на рік працюючи цілодобово.



Рис. 1. Електролізер NuLYZER1000 з протон-обмінною мембраною

Найбільший діючий електролізер у світі NuLYZER1000 виробляє 3 000 тон водню щороку



## Проект Nuclear Powered Hydrogen Cogeneration (NPHyCo)

Восени 2022 року розпочато міжнародний дослідницький проект ЄС, присвячений виробництву водню з атомної енергії. Назва проекту - Nuclear Powered Hydrogen Cogeneration, скорочено - NPHyCo. В проекті беруть участь дванадцять науково-дослідних та інжинірингових організацій з дев'яти країн, в тому числі ТОВ "Енергобезпека Груп" (Energy Safety Group) з України.

З групою проекту активно співпрацює Компанія "Енергоатом", що створила робочу групу з супроводу та координації співпраці в межах дослідження можливостей комерційного виробництва водню. Для дослідження можливого впровадження обрано Хмельницьку (ХАЕС) та Рівненську АЕС (РАЕС).

Проект NPHyCo декларує такі головні цілі:

- оцінити доцільність виробництва водню на або поблизу існуючих АЕС;
- оцінити додану вартість виробництва водню на або поблизу існуючих АЕС;
- визначити відповідні місця для пілотного проекту.

Першу та третю цілі можна вважати досягнутими. Після дослідження промислового потенціалу майданчиків РАЕС (рис. 2) та ХАЕС (рис.3) виробництво водню на них визнано цілком можливим та доцільним. Обидва майданчики розглядаються як пілотні. Так чим корисні один одному такі об'єкти, як АЕС та воднева станція? Спробуємо розібратися в цьому.



Рис. 2. Рівненська АЕС



Рис. 3. Хмельницька АЕС

## У чому користь АЕС для водневої станції

Оскільки виробництво водню передбачається здійснювати методом електролізу води, зрозуміло, що в першу чергу потрібно мати електроенергію і воду. При цьому, ця вода має бути демінералізованою (хімічно знесоленою чи дистильованою). Електроенергію АЕС виробляє, демінералізована вода також є необхідним середовищем у технології АЕС, тому вони можуть бути використані для роботи водневої станції.

Електролізна установка час від часу потребує продувань азотом для запобігання прямого контакту водню з повітрям. Продування азотом потрібне під час першого запуску, після тривалої зупинки (понад 48 годин) або після технічного обслуговування, пов'язаного з відімкненням водневої станції. В технологічному циклі АЕС також використовується азот, зокрема для аналогічних цілей, і також може застосовуватись для потреб водневої станції. Сучасні електролізні установки використовують для управління потоками середовищ пневматичні клапани, що забезпечує потрібну швидкість та водневу безпеку. Для забезпечення роботи клапанів потрібне стиснене повітря. На АЕС існує декілька систем, що постачають стиснене повітря для різних потреб. Тому це середовище також розглядається для потреб водневої станції, хоча, як альтернатива пропонується врахувати встановлення власного компресора в складі станції.

В технології водневих станцій використовуються такі ж середовища, як і на атомних електростанціях, що спрощує їх когенерацію



Оскільки процес електролізу супроводжується виділенням теплоти, то є необхідність застосування системи охолодження. Тому розглядається технічна вода АЕС з кінцевими поглиначами, такими як ставки-охолоджувач, градирні та бризкальні басейни. У разі неможливості використання води АЕС пропонується власна система охолодження, що базується на контурі циркуляції з сухими градирнями невеликої потужності. Нарешті, промислові стоки, побутові водопровід та каналізація для потреб персоналу – все це може бути організовано, спираючись на існуючу інфраструктуру АЕС.

Як бачимо, в технології водневих станцій використовуються середовища такі ж самі, як і на АЕС. Крім цього, на АЕС вже є готовий висококваліфікований персонал, який може працювати з такими середовищами, і з мінімальним навчанням готовий експлуатувати нові водневі станції.

Це якісна оцінка факторів, що сприяють когенерації водневих станцій з АЕС. Однією з задач проекту NPHyCo є їх кількісне підтвердження.

## Основні результати кількісної оцінки когенерації водневої станції та АЕС

### Розміщення

В першу чергу, постало питання вибору місця під розміщення водневої станції. Оскільки маємо справу з діючими АЕС, вільних місць на майданчику обмаль. Крім того, враховуючи потенційну вибухонебезпечність водневої станції, бажано, щоб це місце було подалі від об'єктів, важливих для безпеки, але ближче до джерел потрібних середовищ. Для кожної з АЕС проаналізовано вільні місця. Було вирішено знайти два місця: перше – на проммайданчику, а друге – в санітарно-захисній зоні, але з можливістю використання важливих ресурсів (електропостачання, вода, персонал тощо).

Після обговорень та обстежень такі локації знайдено. Поруч з усіма локаціями є під'їзні та залізничні колії. Місце на проммайданчику РАЕС розташовується на відстані 450 м від енергоблоків, але близько до градирень та загальностанційної резервної дизель-електростанції. Місце в санітарно-захисній зоні РАЕС знаходиться в потенційно більш безпечному для АЕС місці, але потрібна більша протяжність комунікацій. Місце на проммайданчику ХАЕС розташовується на відстані 350 м від енергоблоків, але близько до відкритого розподільчого пристрою 330 кВ, гнучких ліній зв'язку резервного живлення енергоблоків та масломазудо-дизель-господарства, у якому зберігається значна кількість горючих речовин.

Враховуючи близькість до важливих об'єктів, необхідне суттєве обґрунтування безпеки такого розташування. Місце в санітарно-захисній зоні ХАЕС також було знайдене, але пізніше було прийнято рішення задіяти це місце для розміщення тимчасового містечка для будівельників., тому воно було виключене з розгляду.



## Електроенергія

Потужність водневої станції приймається 45 МВт (з них сумарна потужність електролізерів – 30 МВт). Електролізні установки підключаються до мережі середньої напруги 20(30) кВ. Крім того, для роботи компресорів необхідний рівень напруги 6 кВ, а інше обладнання працюватиме від 400 В. На обох АЕС відбір електроенергії пропонується здійснювати на відкритому розподільчому пристрої. На РАЕС є вільна комірка, від якої воднева станція може житись. На відкритому розподільчому пристрої ХАЕС планується встановити трансформатор, який можна використовувати для підключення водневої станції. Далі, для організації електричного живлення водневої станції, на обох АЕС знадобиться вимикач та роз'єднувач, лінія електропередач, понижуючий трансформатор, комплектні розподільні пристрої та інше електричне обладнання. В цілому для обох майданчиків технічний аспект організації електроживлення водневої станції та приблизний кошторис робіт виглядає зрозумілим.

## Демінералізована вода

Для електролізної установки обраної потужності витрата демінералізованої води оцінюється приблизно 5,7 т/год. Проектом АЕС передбачено систему хімічного водоочищення з продуктивністю 265 м<sup>3</sup>/год на РАЕС і 280 м<sup>3</sup>/год на ХАЕС. Частина води може бути використана для водневої станції. Відповідно до внутрішнього стандарту НАЕК "Енергоатом" вимоги до якості хімічно знесоленої води не відповідають вимогам водневої станції, тому на водневій станції необхідно встановити систему доочищення. Але це все ж краще, ніж знесолювати сиру воду чи купувати воду потрібної якості і постійно транспортувати її. На РАЕС є режими, коли продуктивності її системи хімічного водоочищення не достатньо навіть для потреб РАЕС, тому в такі піки вода не зможе бути використана для потреб водневої станції (наявність цих режимів залежить від рівня води в річці Стир, з якої здійснюється забір).

Тому на РАЕС слід встановити бак запасу демінералізованої води для водневої станції. У найгіршому випадку робота водневої станції може бути тимчасово призупинена.

## Азот

Обидві АЕС мають власні азотно-кисневі станції, які можуть забезпечити водневі станції необхідною кількістю азоту. Чистота азоту - 99,6 ÷ 99,9%. Відстань до найближчого трубопроводу азоту, до якого можливо приєднатися, в межах 450 м. Крім цього, азот може транспортуватися у балонах з розміщенням в спеціальній рампі.

## Стиснене повітря

При більш детальному вивченні питання стисненого повітря на обох майданчиках з'ясувалось, що з використанням систем АЕС є певні складнощі. Загальностанційна система стисненого повітря не забезпечує необхідної чистоти/вологості повітря і необхідного тиску (він нижчий).

Система стисненого повітря пневмоприводів локалізуючої арматури відноситься до важливих для безпеки систем і не може використовуватися для інших цілей (або потрібна тривала робота з обґрунтування та погодження). Тому пропонується встановити на водневій станції власний компресор.

## Охолоджувальна вода

Виходячи з вибраної потужності водневої станції, для охолодження штабелів електролізера, випрямного агрегату та водню потрібна витрата 750-900 т/год, оптимальна температура подачі охолоджувальної води 30°C та перепад на теплообміннику – 10°C.

Розглянуто декілька варіантів використання систем АЕС. Система технічної води невідповідальних споживачів на обох АЕС навантажена практично до межі своїх можливостей. Від неї взяти потрібну витрату неможливо. Розглядалися також система додаткової води на РАЕС і система технічної води основного підживлення на ХАЕС. На ХАЕС найбільш перспективним визначено варіант використання води оборотної циркуляційної системи шляхом спорудження власної насосної станції на підвідному каналі. Скид нагрітої води можливо організувати у відвідний канал.

Такий варіант інтеграції обладнання водневої станції в існуючу оборотну систему циркуляційного водопостачання енергоблоків забезпечує можливість постійної та безперебійної роботи обладнання водневої станції за будь-якої конфігурації роботи енергоблоків та забезпечує перспективи нарощування потужності (кількості) водневої станції. Але для РАЕС цей варіант не є доцільним, оскільки охолоджуюча вода є дефіцитною для цього майданчика, тому пропонується автономна замкнута система охолодження водневої станції з використанням сухої градирні.

Розглядаючи результати кількісних досліджень за проектом НРНyCo, питання імплементації водневої станції в проекти РАЕС та ХАЕС можна вважати технічно прийнятним



### Стічні води

Майданчики РАЕС і ХАЕС мають розвинуті мережі відводу стічних вод різного походження, які можуть бути задіяними для потреб водневої станції. Це господарсько-побутова каналізація, промислово-зливова каналізація, каналізація забруднених нафтопродуктами вод. Потужність очисних споруд на обох АЕС має значний запас, для обробки додаткових стоків водневої станції, кількість яких не очікується більш 2.5 м<sup>3</sup>/год. Окремо вивчалось питання хімічно забруднених стоків, якщо будуть застосовані лужні електролізери. Якщо хімічно забруднені стоки потребують попередньої нейтралізації, існує альтернатива здійснювати нейтралізацію в межах водневої станції або завести ці стоки на вузол нейтралізації об'єднаного допоміжного корпусу. Стисло результати цієї роботи можна розглянути у Таблиці 1.

Таким чином, питання імплементації водневої станції в проекти РАЕС та ХАЕС можна вважати технічно вирішеним. На черзі прийняття рішення про початок робіт з розробки проектних рішень. Продовжується робота за напрямом цілі №2 проекту NPHyCo, а саме оцінки доданої вартості виробництва водню на / поблизу існуючих АЕС.

Якщо ця додана вартість буде визначена занадто великою, то чи буде це ознакою того, що проект потрібно зупинити? На наш погляд - ні. Не завжди нові технології з самого початку є рентабельними. Якщо є глобальна ціль вироблення водню методом електролізу, використовуючи електроенергію, що вироблена без викиду вуглецю, і, якщо передбачається, що АЕС і в подальшому будуть конкурентоспроможні відносно до "зеленої" енергетики, то єдине, що може зупинити проект - це фактор безпеки.

### Чи порушується безпека АЕС

В рамках проекту NPHyCo виконується дослідження з оцінки впливу на АЕС з боку водневої станції. Перші результати дослідження показують, що саме електролізна установка не несе загрози об'єктам на відстані понад 100 м у найекстремальнішому випадку (вибух при великій течії) без врахування послаблення з боку будівлі водневої станції. Питання безпеки об'єктів, розташованих ближче, що не відносяться до систем, важливих для безпеки реакторної установки, вирішується відповідним до категорії А проектуванням будівлі та приміщень водневої станції (можливо з використанням легкоскридних конструкцій) та погодженням з ДСНС.

**Таблиця 1. Можливість забезпечення потреб водневої станції ресурсами АЕС**

Потреби водневої станції	Основне завдання	Яким чином АЕС може покрити потреби водневої станції?
Розміщення	Безпечне місце поблизу АЕС	Промисловий майданчик або санітарно-захисна зона АЕС
Електроенергія	Для обладнання водневої установки - джерело змінного струму. Для електролізу - джерело постійного струму	Забір з відкритого розподільчого пристрою
Демінералізована вода	Для безпосереднього виготовлення водню шляхом електролізу	Використання систем водоочиснення АЕС і власна система доочищення
Азот	Для запобігання утворенню вибухонебезпечної суміші	Азотно-киснева станція на АЕС та транспортування трубопроводом або у балонах
Стиснене повітря	Для роботи пневмоклапанів, які регулюють потік водню	Встановлення власного компресора
Охолоджувальна вода	Для відводу теплоти, яка утворилась в процесі електролізу	Встановлення власної насосної станції або використання сухих градирень
Стічні води	Для відводу рідких продуктів, що утворюються під час роботи водневої станції	Підключити до мережі відводу стічних вод АЕС

Крім цього, необхідно розробити і погодити технічні рішення та звіти з аналізу безпеки з Держатомрегулювання України.

Стосовно безпеки з боку ресиверів водню, що призначені для зберігання водню і постачання його споживачам, то попередні дослідження за проектом показують, що безпечна відстань від такого об'єкта при зберіганні у ньому 5 т водню складає 940 м, а при зберіганні 15 т - 1350 м.

**В рамках проекту NPHyCo виконується дослідження з оцінки впливу на безпеку АЕС з боку водневої станції**



Для вирішення цієї проблеми є два шляхи. Перший – це розміщення таких сховищ на відстані понад один кілометр до об'єктів, що відносяться до систем, важливих для безпеки реакторної установки або таких, які впливають на безпеку АЕС. На цьому шляху потрібен пошук вільних місць за територією АЕС. Другий шлях – це обмеження розміру окремого ресивера (не більше 0,5 т) і забезпечення їх фізичного розділення, щоб показати, що вибух одного ресивера не призводить до пошкодження інших. Тоді розрахунок надлишкового тиску від ударної хвилі вибуху можна буде проводити, взявши за найнесприятливіший варіант малоймовірну подію – одночасний повний витік водню з двох ресиверів з наступним вибухом. Але дослідження продовжуються, розрахунки виконуються, результати обговорюються, тому остаточні результати будуть отримані на пізніх стадіях проєкту.

## Користь водневої станції для АЕС

При дослідженні питання рентабельності водневої станції потрібно звертати увагу на такий нюанс, як робота комплексу АЕС - воднева станція під час диспетчерських обмежень потужності АЕС. У деяких випадках електроенергія для водневої станції стає, так би мовити, "подарованою", адже є збитковою для електричної мережі. Таким чином, наприклад при необхідності зниження електричної потужності АЕС на 20 МВт, що в свою чергу потребує зниження навантаження енергоблока з 800 МВт до 780 МВт, навантаження водневої станції на 20 МВт утилізує ту кількість електроенергії, що була би втрачена.

Окрім суто економічної складової є ще деякі чинники корисного впливу на АЕС від наявності водневої станції. Наприклад, під час диспетчерських обмежень видачі електроенергії в енергосистему сумісний маневр потужністю турбогенератора і потужністю електролізерів зменшить циклічне навантаження на ядерне паливо за рахунок зменшення амплітуди змін теплової потужності енергоблока при тій же амплітуді змін видачі електроенергії в енергосистему. А ще воднева станція буде корисною у разі системної аварії в енергосистемі, коли передбачається перехід енергоблоків АЕС в режим електроживлення власних потреб, а потім один з енергоблоків навантажується електроживленням всієї АЕС. Справа в тому, що робота турбогенератора на малій потужності власних потреб обмежена. Чим більше буде потужність, тим довше енергоблок має шанс працювати без порушень тепломеханічного стану до відновлення енергосистеми.

Наприклад, перед повним зупином Запорізької АЕС один з її енергоблоків працював задля електроживлення власних потреб АЕС декілька днів. Електрична потужність енергоблока коливалась у межах 120 – 140 МВт. При цьому персонал працював над тим, які прилади необхідно заживити додатково, щоб потужність стала якомога більшою. У такому випадку навантаження у вигляді водневої станції стало б в нагоді як додаткове навантаження. Також потрібно розуміти, що якщо на цьому етапі буде показана фізична можливість когенерації АЕС - воднева станція на діючих АЕС, то в майбутньому реалізація цього на стадії проєктування нових енергоблоків дасть додаткові переваги, як у сфері безпеки, так і в економічності виробництва.

В такому разі повинні бути передбачені такі умови:

- забезпечення і обґрунтування безпеки у проєкті;
- можливість підключення випрямних агрегатів безпосередньо до шин генератора, а допоміжного обладнання до шин нормальної експлуатації енергоблока, що дозволить уникнути додаткових трансформаторів;
- повна інтеграція з системами енергоблока за середовищами (хімічно знесолена вода, охолоджувальна вода, азот, стиснене повітря, стоки, тощо);
- додаткове навантаження власних потреб енергоблока зробить більш надійним переведення енергоблока на власні потреби;
- можливість використання водню як пального для газотурбінних установок для засобів аварійного електропостачання (замість чи додатково до дизель-генераторів);
- після додаткового дослідження режимів управління електролізерами (швидкість збільшення/зменшення потужності, автоматичне регулювання) можна замислитися над участю електролізерів у нормованому первинному регулюванні частоти та потужності в енергосистемі.

**Враховуючи вищенаведене, автори вважають, що застосування проєкту НРНyCo має перспективи і вкотре підтверджує необхідність впровадження водневих технологій у складі АЕС. Звісно, ми розуміємо, що в умовах війни та дефіциту електроенергії внаслідок втрати генерації це впровадження є передчасним, але це не заважає пропрацювати технічну, економічну та ліцензійну частину, бути "в ногу" з цивілізованим світом та після перемоги бути готовим до нових модернізацій та впроваджень.**