

УДК 620.92

ПЕРСПЕКТИВИ РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ PTG В УКРАЇНІ

Клименко В.М.¹, член-кореспондент НАН України, Супрун Т.Т.², канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, головний науковий співробітник, старший науковий співробітник, vnklimenko@gmail.com, Scopus Author ID 36833344100

²Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, Київ, 03057, Україна, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник, suprun@secbiomass.com, ORCID iD 0000-0002-5360-388X

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2023.9>

В статті представлена систематизація процесів і технологій перетворення (акумулявання) електричної енергії в газовий енергоємний продукт (концепція PtG), які реалізуються сьогодні у світі. Однією з найважливіших проблем сучасної світової енергетики став пошук і розробка відновлюваних джерел енергії, як альтернатив традиційним викопним паливам. Реалізації цієї задачі присвячена концепція PtG, яка передбачає перетворення надлишків відновлюваної електроенергії, отриманої від сонячних та вітрових електростанцій, в газоподібний енергоємний продукт (паливо). Розглянуті шляхи і особливості виробництва біометану, як універсального газового енергоносія, що для України є найбільш доцільним і перспективним шляхом реалізації концепції PtG з використанням існуючих в країні величезних біоресурсів.

The article presents the systematization of processes and technologies for converting (accumulating) electrical energy into a gas energy-intensive product (PtG concept), which are being implemented today in the world. One of the most important problems of modern world energy has become the search and development of renewable energy sources as an alternative to traditional fossil fuels. The implementation of this task is dedicated to the PtG concept, which provides for the conversion of excess renewable electricity received from solar and wind power plants into a gaseous energy-intensive product (fuel). The ways and features of the production of biomethane as a universal gas energy carrier are considered, which is the most expedient and promising for Ukraine by implementing the PtG concept using the vast bioresources existing in the country.

Бібл. 20, рис. 1.

Ключові слова: концепція PtG, відновлювані джерела енергії, біометан.

Актуальність роботи обумовлена активним розвитком та впровадженням біометанових технологій в Україні.

Метою даної роботи є огляд світового досвіду розробки концепції PtG та визначення перспективних шляхів впровадження цієї концепції в Україні.

Методи дослідження включають аналіз вітчизняних і зарубіжних публікацій щодо реалізації концепції PtG.

Вступ

Проблема зберігання (акумулявання) електричної енергії обумовила появу на рубежі XX і XXI століть концепції PtG (Power to Gas), що передбачає перетворення цієї енергії в газ, який можна було б зберігати, або ж накопичувати. В якості газового носія було визначено водень, який можна отримувати шляхом електролізу води з використанням відновлюваної електроенергії. Проте вже скоро стало ясно, що для енергетичного використання водень по деяким показникам значно поступається природному газу, який на той час вже достатньо широко використовувався. Так, температура його згорання вища, а енергоємність майже в 3,5 рази нижча ніж у природного газу, що в деяких

випадках ускладнює роботу енергетичного устаткування. Крім того, висока плинність і відчутна агресивність до конструкційних матеріалів значно ускладнює його зберігання і транспорт за допомогою існуючих газових мереж. Тому кінцевою метою PtG процесу було визначено інші види водневомісних речовин, з яких найбільший інтерес для енергетичного використання представляє метан – продукт екзотермічної реакції водню з вуглекислим газом. Перетворення вуглекислоти в метан, так звану метанацію, можна розглядати не тільки як засіб отримання альтернативного джерела теплової енергії, а ще як ефективний засіб декарбонізації теплової енергетики. Необхідний для метанації вуглекислий газ (а також монооксид вуглецю) можна отримувати з атмосферного повітря, з газових викидів різноманітних технологічних процесів і, нарешті, як одного з продуктів теплового чи біологічного розкладу біомаси рослинного і тваринного походження. Останнє з названих джерел CO₂ представляє на сьогоднішній день найбільший інтерес, тому що генерація CO₂ відбувається в процесі утилізації відходів життєдіяльності людини і тварин, відходів сільськогосподарського вироб-

ництва, харчової і м'ясомолочної промисловості. Це повністю узгоджується з концепцією природоохоронної діяльності людини.

Для виробництва водню шляхом електролізу води використовується нестала і переривчаста в часі електроенергія вітрових і сонячних електростанцій, що дозволяє, з однієї сторони, уникнути труднощів використання такої енергії в електромережах, а, з іншої сторони, це стає потужним стимулом для розвитку відновлюваної електроенергетики.

Поєднання вуглекислого газу з воднем (метанація) з утворенням синтетичного метану здійснюється в процесі екзотермічної реакції Сабатьє за участі металевих каталізаторів. Ще одним шляхом отримання метану є так звана біометанація, в якій з біомаси в процесі анаеробного зброджування генерується біогаз за допомогою метаногенних бактерій. При цьому в біогазі крім біометану утворюється вуглекислий газ, який також можна перетворити у метан шляхом здійснення каталітичної реакції, або ж за допомогою гідрогенотрофних бактерій – архей.

Кожен з цих шляхів виробництва метану був здійснений і досліджений за останні два десятиліття в багатьох країнах світу (США, Німеччині, Великобританії, Італії, Іспанії та інш.), для яких реалізація концепції PtG стала злгоденною і невідкладною задачею [1, 2]. З огляду на порівняльний аналіз отриманих результатів і врахування отриманого досвіду буде корисним систематизувати реалізовані технології виробництва метану, шляхи побудови структурної схеми реалізованих ланцюжків перетворення енергії, починаючи з використаної сировини (джерела CO_2 , або «їжі» для бактерій) і закінчуючи отриманим продуктом PtG.

1. Структурна схема

Структурна схема (рис.1) не включає таких складових технологічних ланцюжків як склади, сховища, резервуари, логістика, системи регулювання, тощо, які необхідні при оцінці енергетичної та економічної ефективності, але не є складовими процесу перетворення енергії. Для визначення шляхів реалізації концепції PtG не мають також принципового значення технологічні особливості отримання компонентів метанації і самого процесу метанації. Схема розроблена з використанням літературних джерел [2-12].

При побудові схеми відправним пунктом є джерела електроенергії і води для виробництва водню і сировини для процесу виробництва метану – вуглекислого газу і біомаси. В зв'язку з цим конкретні шляхи реалізації концепції PtG визначаються наявністю в країні вказаних ресурсів.

В рамках концепції PtG водень є незамінним компонентом у всіх без винятку процесах метанації – як каталітичної, так і біологічної. Оскільки водень виробляється за рахунок відновлюваних джерел енергії, то він вважається відновлюваним компонентом процесу метанації.

Другим компонентом реакції Сабатьє є вуглекислий газ. Він може бути як неорганічного, так і органічного походження. Якщо CO_2 отримується з неорганічних джерел – шляхом сепарування з продуктів згорання викопних палив в різноманітних промислових пристроях, на теплових електростанціях, в котлах, які працюють на викопному паливі, або ж з атмосферного повітря, то такий компонент є невідновлюваним. Тому продукт метанації з таким CO_2 – синтетичний метан є невідновлюваним. Невідновлюваним залишається також і продукт очистки синтетичного метану – синтетичний природний газ, паливо, доведене до концепції натурального природного газу. Вуглекислий газ органічного походження, отриманий в результаті сепарації з продуктів згорання котла, який працює на органічному паливі, або в процесі піролізу біомаси, або ж в процесі збагачення біогазу шляхом реалізації метанації дозволяє отримати синтетичний відновлюваний газ – відновлюваний аналог невідновлюваного природного газу.

Біометанація шляхом анаеробного зброджування біомаси дозволяє отримати біогаз, звалищний газ і шламовий газ – суміш метану, вуглекислого газу та інших домішок. З біогазу можна отримати біометан (аналог природного газу) шляхом його очищення (сепарації CO_2), або ж шляхом ще однієї метанації за допомогою гідрогенотрофних бактерій – архей. Ця метанація здійснюється або у метантенку, в якому генерується біогаз (процес in-situ), або ж у окремому реакторі (процес ex-situ).

Усі види метанів, отриманих з сировини органічного походження, являються відновлюваними видами газового палива. Таким чином, на сьогоднішній день існує 8 шляхів реалізації концепції PtG з отриманням таких газових палив як водень, звалищний газ, шламовий газ, біогаз, синтетичний метан, синтетичний природний газ, біометан і синтетичний відновлюваний метан. На рис. 1 всі види палив виділені іншим кольором.

На схемі не відображений ще один шлях отримання альтернативного газового палива – шлях підземної біометанації, при якому в якості реактора використовується порожнина в земній корі, в які закачується вуглекислий газ, водень і мікроорганізми, необхідні для процесу метанації [13]. В залежності від походження CO_2 в результати метанації можна отримати відновлюваний або невідновлюваний синтетич-

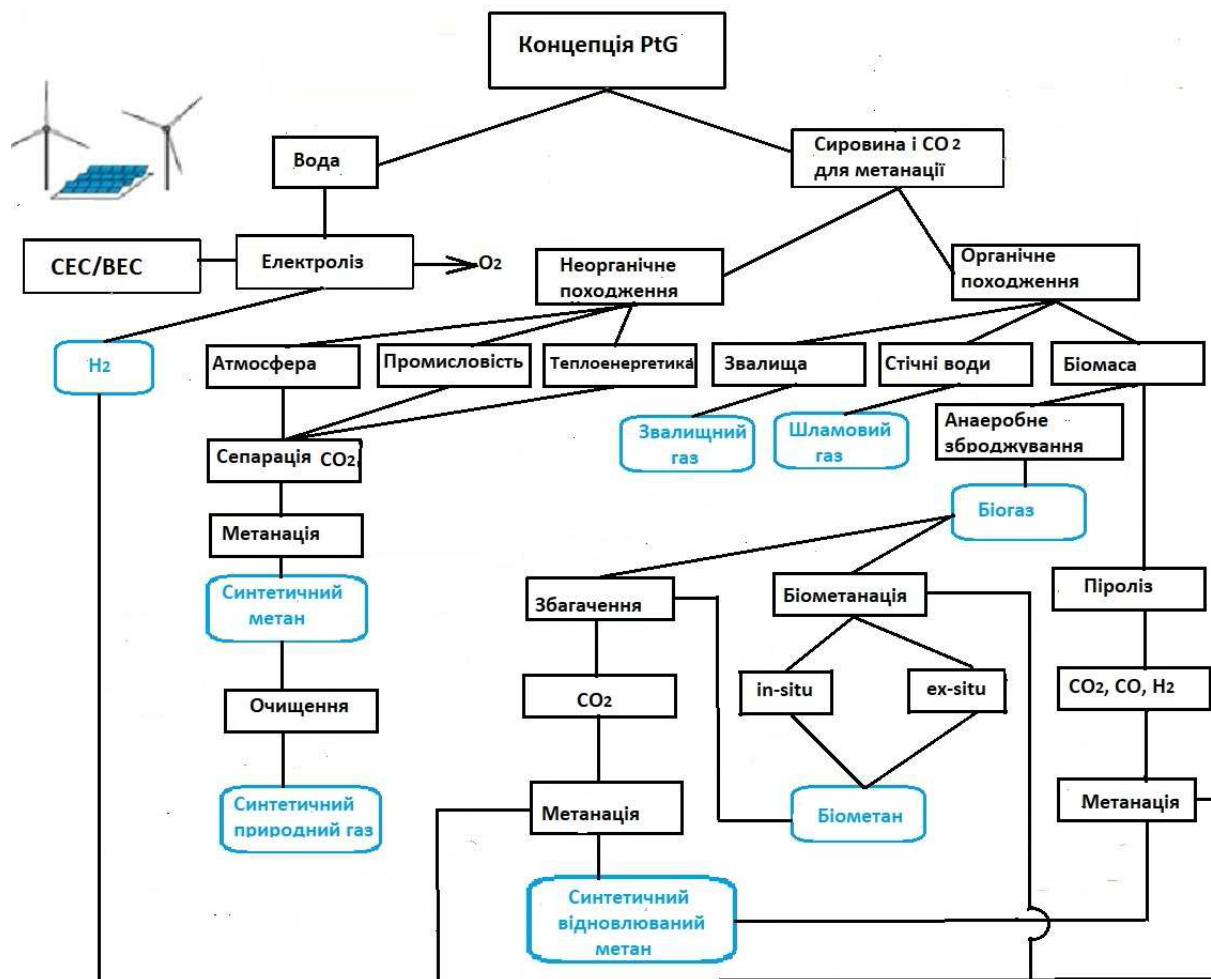


Рис.1. Структурна схема реалізації концепції PtG

ний метан. Тобто по суті цей шлях вже відображений в розглянутій схемі і відрізняється лише реактором як елементом технології метанації, що не є принциповим.

2. Етапи розвитку концепції PtG

Ці вказані вище види палив можна розбити на три різні по своїй якості групи або ж покоління, які послідовно реалізувались в процесі розвитку концепції PtG: водень, синтетичні багатоконпонентні палива і модернізовані синтетичні палива, які по своїм характеристикам є аналогами природного газу.

2.1 Водень

Водень – газовий продукт PtG першого покоління. Як уже вказувалось, на початку реалізації ідей PtG водню відводилась роль акумулятора надлишкової відновлюваної електроенергії, а далі - роль одного з основних компонентів процесів метанації при виробництві палив другого і третього поколінь. Більш широке використання водню, наприклад, в хімічній промисловості при виробництві аміаку і метанолу, в нафтопереробній

та інш. повністю залежить від успіхів в рішенні проблем, пов'язаних з виробництвом (зменшення вартості електролізу), збереженням і транспортуванням водню, а також його впливом на навколишнє середовище [11, 12]. В останні роки все більше уваги приділяється водню як альтернативному паливу для використання в теплоенергетиці і в теплових двигунах (на транспорті), що в значній мірі залежить від успіхів вирішення проблем транспортування водню, зокрема з використанням існуючих газотранспортних мереж, і збереження водню на борту транспортного засобу.

2.2 Синтетичний метан і біогаз

Синтетичний метан і біогаз є продуктом PtG другого покоління, отриманий шляхом каталітичної чи біологічної метанації і включає в своєму складі окрім метану ще й вуглекислий газ, монооксид вуглецю, сірководень, кисень та інші нешкідливі і шкідливі домішки. До цієї категорії палив відносяться також звалищний і шламовий газ.

Теплотворна здатність палив другого покоління PtG, зокрема біогазу, значно менша (22-24 МДж/м³) ніж теплотворна здатність природного газу (36 МДж/м³).

Виробництво синтетичного метану пов'язано головним чином з потужними джерелами CO₂ – промисловими підприємствами та тепловими електростанціями. Його реалізація технічно більш складна, потребує великих капіталовкладень, застосування засобів зберігання виробленого продукту і його транспортування до споживача. Таке виробництво може бути організованим і стати економічно доцільним лише в промислово-розвинутих країнах.

Біогаз (включаючи звалищний і шламовий газ) уже сьогодні відіграє в енергетичному балансі багатьох країн помітну роль, виступаючи в ролі заміника викопних палив. Використовується біогаз переважно для генерування теплоти і електроенергії (біля двох третин виробленого у світі біогазу). До 30% біогазу використовується у домашньому господарстві і лише остаточною доля виробленого біогазу (десь до 10%) перероблюється сьогодні в біометан [5].

Біля 84% від сумарного виробництва біогазу в Європі виробляється в процесі анаеробного зброджування біомаси. Лідерами цього напрямку виробництва біогазу являються: Німеччина (98% від внутрішнього виробництва біогазу), Франція (79%), Італія (62%) та Великобританія (43%). Найменше біогазу в Європі (менше 5% від загального виробництва) виробляється з мулу стічних вод (Польща – 40%, Іспанія – 25%, Нідерланди – 18% від внутрішнього виробництва). Виробництво звалищного біогазу в Європі найбільше представлено в Великобританії (43% від внутрішнього виробництва), Італії (27%), Франції (24%) та Іспанії (12%) [5].

Такий розподіл виробництва біогазу в Європі визначається перш за все наявністю в країні необхідної достатньої сировинної бази, незайнятих земель для вирощування енергетичних культур, природних та екологічних умов. Проте загальною рисою для всіх країн Європи є перевага, яка віддається саме біологічному шляху реалізації концепції PtG. Біологічні джерела CO₂, необхідного для процесу метанації, існують практично у будь якій країні, що дозволяє організовувати виробництво біогазу на установках зазвичай невеликої потужності з використанням виробленого продукту поблизу місця виробництва.

2.3 Синтетичний природний газ, біометан і синтетичний відновлюваний метан

Це продукти 3-го покоління PtG, які привертають сьогодні найбільшу увагу дослідників і виробників альтернативних палив, тому що саме ці продукти можна використовувати замість природного газу як паливо,

а також у всіх процесах, де останній застосовується, і їх можна транспортувати і зберігати за допомогою існуючих газотранспортних і газорозподільних мереж. Продукти третього покоління отримуються шляхом очищення, збагачення (модернізації), біометанації продуктів другого покоління.

Спільне виробництво біогазу і біометану в 2020 році перевищило в Європі 191 ТВт·год, що складає більше 70% світового виробництва. Очікується, що до 2050 року це виробництво може перевищити 1000 ТВт·год [5].

Серед відомих на сьогоднішній день шляхів здійснення концепції PtG найбільш затребуваними і реалізованими є технологічні ланцюжки виробництва біогазу і біометану з використанням в якості сировинної бази біомаси різного походження, звалищних органічних відходів та мулу стічних вод.

Синтетичний природний газ отримують за допомогою очищення синтетичного метану. Синтетичний відновлюваний метан виробляють шляхом процесу метанації CO₂ (біологічного походження) та водню H₂, отриманого, в свою чергу, з відновлюваних джерел енергії.

3. Значення концепції PtG для України

Для України саме біологічний шлях реалізації концепції PtG є найбільш доцільним і переважним, тому що держава має унікальні можливості для розвитку біоенергетики: розвинене сільськогосподарське виробництво, сприятливий клімат, наявність великих земельних площ для вирощування енергетичних культур, розвинену промисловість – для виробництва власного технологічного обладнання.

Роботи по створенню наукових основ і практичних методів біоенергетики в Україні були розпочаті ще наприкінці 90-х років минулого століття. В Інституті технічної теплофізики НАН України були створені структура і наукові напрямки по вивченню процесів генерування біогазу і біометану з біомаси різного походження з оцінкою наявних і перспективних ресурсів біомаси, придатної і доступної для виробництва біогазу, з аналізом життєвого циклу виробництва газових енергоносіїв, включаючи вирощування біомаси, логістику і екологічний вплив на навколишнє середовище. Зокрема, в роботах [14, 15] досліджені потенційні можливості виробництва в Україні біопалив і показано, що країна має один з найбільших в світі потенціалів аграрної сировини для виробництва біогазу і біометану. Маючи розвинену газотранспортну і газорозподільну мережу визначено райони найбільш доцільного розташування об'єктів виробництва біопалива з урахуванням

можливостей його доставки до споживача. Отримані нові експериментальні дані щодо ефективності анаеробного зброджування поживних решток пшениці, кукурудзи та соняшнику, що створює наукове підґрунтя для подальшого розвитку технологій виробництва біогазу з лігноцелюлозної біомаси аграрного походження [16-18]. Досліджені основні технології збагачення біогазу до біометану, в яких використовуються процеси абсорбції, адсорбції, фільтрації та криогенні технології [19]. Розпочаті роботи з вивчення можливостей і технологій метанації для виробництва синтетичного відновлюваного метану [1, 2, 20]. Співробітники Інституту являються ініціаторами і учасниками розробки поправок до існуючих законів України і нормативної бази, необхідної для підтримки, стимулювання і просування біоенергетики України.

4. Метанація

Реалізація процесів отримання біометану, що особливо цікаво для умов України, може здійснюватися двома шляхами:

- Безпосередньо з біомаси шляхом її термічної газифікації (піролізу) з отриманням в результаті розкладу суміші CO_2 , CO і H_2 (синтетичного газу) і наступної каталітичної або біологічної метанації окислів вуглецю.
- Шляхом біологічної (за допомогою мікроорганізмів – бактерій) метанації біомаси з виробництвом суміші метану і вуглекислого газу, - так званого біогазу з наступним його збагаченням і метанацією сепарованого CO_2 біологічним чи каталітичним способом.

В усіх процесах виробництва синтетичного метану ключовою технологією безумовно є процес метанації, тобто поєднання вуглекислого газу і водню. Сьогодні в практиці реалізації концепції PtG застосовуються два види метанації – каталітична і біологічна.

Каталітична метанація – це екзотермічна реакція між CO_2 і H_2 , яка здійснюється, зазвичай, при температурах від 200 до 550 °C і тиску від 1 до 100 бар. Однією з проблем, які вирішуються при реалізації каталітичної метанації, є відвід теплоти реакції і стабілізація процесу в умовах нестабільної і переривчастої роботи установки, пов'язаних з режимами роботи використаних джерел електричної енергії (сонячних і вітрових електростанцій). В якості каталізатора використовуються такі метали, як нікель, рутеній, родій, кобальт, з яких найбільш застосовується нікель. Існують в деяких випадках проблеми з деактивацією каталізатора і його відновленням.

При біометанації відбуваються біохімічна реакція за участі водневотрофної групи метаногенів – архей, які отримують енергію для своєї життєдіяльності шляхом анаеробного засвоєння вуглекислого газу і водню. В

процесі виробництва біометану безпосередньо з CO_2 і H_2 метан утворюється шляхом гідрогенотрофного метаногенезу. В цьому процесі може використовуватись вуглекислий газ і водень будь-якого походження, в тому числі отримані в процесі газифікації (піролізу) біомаси. Якщо виробництво біометану здійснюється з використанням біогазу, то розглядається весь ланцюжок енергетичних перетворень PtG від біомаси до біометану. Він включає процес виробництва біогазу шляхом анаеробного зброджування біомаси з її гідролізом до простих мономерів, перетворюванням їх в ацетат, CO_2 і H_2 і, нарешті, в ацетокластичний метан за допомогою ацетогенних мікробів. Вироблений в процесі зброджування вуглекислий газ і водень, який окремо подається в метантенк, за допомогою гідрогенотрофних метаногенних архей перетворюються в біометан. Такий процес виробництва біометану прийнято називати метаногенезом *in-situ* (на місці), тобто в тому ж реакторі (метантенку), в якому виробляється біогаз. Завдяки цьому реалізація технології *in-situ* потребує найменших капіталовкладень. Проте метаногенезу *in-situ* властиві труднощі, пов'язані з одночасним забезпеченням оптимальних умов життєдіяльності як ацетогенних, так і метаногенних бактерій при підвищеній концентрації H_2 в зброджувальній суспензії. Справа в тому, що підвищення концентрації H_2 є корисним для гідрогенотрофних мікроорганізмів (архей), які можуть «вживати» чотириох кратну кількість водню по відношенню до вуглекислого газу. В той же час для ацетогенних реакцій парціальний тиск водню не повинен перевищувати 10 Па. Надлишок водню призводить до його накопичування в суспензії, що може викликати припинення ацетогенезу. Таким чином, потрібно знайти збалансований режим роботи установки, який забезпечив би адекватні умови співіснування ацетогенних і гідрогенотрофних мікроорганізмів.

Цієї проблеми немає при реалізації концепції *ex-situ*, тому що процеси ацетогенезу і метаногенезу здійснюються в окремих реакторах, і тому для кожного процесу можна забезпечити свої оптимальні умови і режими роботи. У цьому випадку в окремий реактор необхідно вводити не тільки CO_2 і H_2 , але й гідрогенотрофні метаногенні культури, поживні елементи, необхідні для забезпечення мікробного метаболізму. Відокремлення біометанації від виробництва біогазу забезпечує більш високу гнучкість і стабільність процесу ніж це можна реалізувати в процесі *in-situ*.

Одним з перспективних напрямків розвитку біометанації розглядається комбінація концепцій *in-situ* та *ex-situ* [8]. Збагачення біогазу в секції *in-situ* дозволяє зменшити розміри включеного послідовно реактора *ex-situ*.

Як уже було сказано, ще одним шляхом реалізації концепції PtG може стати підземна біометанація CO₂, для чого можуть бути використані виснажені резервуари вуглеводнів, або ж глибинні водоносні горизонти, в які закачується відновлюваний водень, вуглекислий газ довільного походження, а також метаногенні археї і поживні речовини, необхідні для їх виживання, розмноження і зростання. Оцінка перспектив успішного розвитку PtG у цьому напрямку залежить від можливостей виконання ряду геологічних, мікробіологічних, екологічних і економічних вимог. Геологічні вимоги пов'язані з забезпеченням необхідної ємності і герметичності підземного сховища особливо по відношенню до водню, відсутністю реагування газів з гірничими породами, збереженням стабільності і їх пористості, проникності та механічних властивостей. Існують обмеження водонасичених порід, що пов'язано з забезпеченням доступу H₂, CO₂ і живильних речовин до мікроорганізмів. Ще одна з вимог до підземного реактора стосується забезпечення мезофільного, термофільного чи гіпертермофільного режиму роботи в залежності від метаногенних бактерій, які застосовуються. Тиск не повинен перевищувати 150 бар. Необхідно також враховувати можливість співіснування архей з іншими, можливо ворожими до них, бактеріями. Звісно, залишаються також проблеми, властиві розглянутим вище технологіям біометанації – погана розчинність H₂, висока вартість отримання H₂ шляхом електролізу води, вплив рівня pH на процес метанації. Успіхи в розвитку підземної метанації будуть повністю залежати від вирішення вказаних проблем [13].

Всі шляхи реалізації концепції PtG є прийнятними для України. Проте на сьогоднішній день найбільш сприятливими в організаційному, екологічному і економічному відношенні в Україні є біологічний шлях реалізації концепції PtG з виробництвом в якості палива як біогазу, так і біометану, який може стати повноцінною заміною природного газу на всіх об'єктах, де він використовується. Тим більше, що в країні є потужні газотранспортна і газорозподільна системи.

Висновки

Реалізація концепції PtG є сьогодні однією з найважливіших глобальних проблем енергетики. Вирішенням цієї задачі займаються практично в усіх промислово-розвинених країнах світу. Дослідження ведуться як в напрямку отримання синтетичного метану, синтетичного природного газу, так і в напрямку виробництва метану біологічного походження – біогазу і біометану.

Україна має унікальні можливості реалізації концепції PtG саме в напрямку виробництва біометану: розвинене сільськогосподарське виробництво, розвинена харчова промисловість, можливість самостійного виробництва необхідного технологічного обладнання, величезні земельні площі для вирощування енергетичних культур, нарешті, сприятливий клімат.

Найбільш доцільний напрямок – біологічна метанація через виробництво біогазу.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Клименко В.М., Сунрун Т.Т. Технології метанації для отримання синтетичного відновлюваного метану. Теплофізика та теплоенергетика, 2022, т.44, №3. С.63-72 <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.6>
2. Клименко В.М., Сунрун Т.Т. Сучасні концепції Power to Gas та їх реалізація. Теплофізика та теплоенергетика, 2022, т. 44, №4. С.40-50 <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/511>
3. Gotz M., Lefebvre J., Mors F., Koch A.M., Graf F., Bajohr S., Reimert R. & Kolb T., Renewable power-to-gas: A technological and economic review. Renewable Energy, 2016, Volume 85, pp. 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>
4. Bailera M., Lisbona P., Romeo L.M. & Espatolero S. Power-to-gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, Volume 69, pp. 292-312, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.13>
5. J. Pavicic, K. Novak Mavar, V. Brkic, K. Simon. Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. Energies, 2022, Volume 15, no 8, 2940. <https://doi.org/10.3390/en15082940>
6. Bellini, R.; Bassani, I.; Vizzarro, A.; Azim, A.A.; Vasile, N.S.; Pirri, C.F.; Verga, F.; Menin, B. Biological Aspects, Advancements and Techno-Economical Evaluation of Biological Methanation for the Recycling and Valorization of CO₂. Energies 2022, 15, 4064. <https://doi.org/10.3390/en15114064>
7. Davis Rusmanishttps, Richard O'Shea, David M. Wallhttps, and Jerry D. Murphy. Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency. Bioengineered 2019, Vol. 10, No. 1, 604-634 <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1684607>
8. M.A. Voelklein, D. Rusmanis, J.D. Murphy. Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upbraiding in anaerobic digestion. Applied Energy, 2019, Vol. 235, pp. 1061-1071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.006>

9. Anna Skorek-Osikowska, Mario Martín-Gamboas, Javier Dufoura Thermodynamic, economic and environmental assessment of renewable natural gas production systems Energy Conversion and Management: X 7 (2020) 100046 <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100046>
10. D.Devaraj, E.Syron, P.Donnellan. Synthetic natural gas production: production cost, key cost factors and optimal configuration. Int. J. of Energy Prod. & Mgmt., 2020, Vol. 5, No 2, 91-101. DOI: 10.2495/EQ-V5-N2-91-101
11. Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. Environmental Chemistry Letters, 2021, 20(1), 153-188. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>
12. Till Weidner, Victor Tulusa, Gonzalo Guillén-Gosálbez. Environmental sustainability assessment of large-scale hydrogen production using prospective life cycle analysis. International Journal of Hydrogen Energy. 2023, Vol. 48, Issue 22, pp. 8310-8327. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.044>
13. Gion Strobel, Birger Hagemann, Thiago Martins Huppertz, Leonhard Ganzer. Underground bio-methanation: Concept and potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews 123, 2020. 109747 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109747>
14. Geletukha, G., Kucheruk, P., Matveev, Y. Prospects and Potential for Biomethane Production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology, 2022, 23(4), 67-80. <https://doi.org/10.12912/27197050/149995>
15. Гелету́ха Г.Г., Матвеев Ю.Б. Перспективи виробництва біометану в Україні. Теплофізика та теплоенергетика, 2021, 43(3), 65–70. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2021.8>
16. Кучерук П.П., Матвеев Ю.Б., Рудська В.О. Експериментальне дослідження показників виходу біогазу в процесі періодичного метанового бродіння соломи. Відроджена енергетика, 2018, 2(53), 88-98. <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/152>
17. Grabovskyi, M., Kucheruk, P., Pavlichenko, K. et al. Influence of macronutrients and micronutrients on maize hybrids for biogas production. Environ. Sci. Pollut. Res. 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27235-3>
18. Ablieieva I.Yu., Geletukha G.G., Kucheruk P.P., Enrich-Prast A., Carraro G., Berezhna I.O., Berezhnyi D.M. Digestate potential to substitute mineral fertilizers: Engineering approaches. Journal of Engineering Sciences ISSN 2312-2498, 2022, Vol. 9(1), pp. H1–H10, doi: 10.21272/jes.2022.9(1).h1 https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/87882/1/Ablieieva_jes_1_2022.pdf;jsessionid=A91FF3342772FE1D0D430C2CFD5D11B1
19. Крамар В. Технології збагачення біогазу та їх характеристики. Теплофізика та теплоенергетика, 2023, 48(1), 64-74. <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/525>
20. Klimenko V.N., Suprun T.T. Analysis of synthetic renewable methane production technologies for implementation in Ukraine. Eurasian Physical Technical Journal, 2023, Vol. 20, No. 2(44), 41–45. <https://doi.org/10.31489/2023No2/41-45>

PROSPECTS OF IMPLEMENTATION OF THE PtG CONCEPT IN UKRAINE

Klimenko V.M.¹, Suprun T.T.²

¹Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, Scopus Author ID 36833344100, e-mail: vnklimenko@gmail.com

²PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, ORCID iD 0000-0002-5360-388X, e-mail: suprun@secbiomass.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2023.9>

The article attempts to systematize the processes and technologies for converting (accumulating) electrical energy into a gas energy-intensive product (the PtG concept), implemented today in the world. The first step on this path is the production of hydrogen by electrolysis of water. The second step is the production of methane in a mixture with other gases and impurities - synthetic methane and biogas (including landfill and sludge gas). In addition, finally, the third step is the purification of synthetic methane and biogas from harmful impurities, the separation of carbon dioxide and its methanation, bringing the final product (synthetic natural gas and biomethane) to natural gas condition. Obtaining a synthetic universal gas energy carrier - biomethane has become today the main direction of development and the task of improving alternative renewable energy. The creation of a developed network of gas generating stations of small and medium capacity (depending on the available local resource base) can be considered as a tool for accomplishing this task. These stations can be combined into a single energy system using existing electrical and gas transmission networks. The key problems that need to be solved to implement this PtG concept are: improving and reducing the cost of the hydrogen production process, developing and improving methanation technologies, studying the impact of bioenergy on the environment, creating the legislative and regulatory framework necessary to support and stimulate the development of bioenergy. In Ukraine, developments are being carried out in all these areas. The reviews of foreign studies have shown that for Ukraine the most preferable and promising way to implement the PtG concept is the way of obtaining biomethane using the huge bioresources existing in the country.

References 20, figure 1.

Key words: concept of PtG, renewable energy sources, biomethane.

1. Klimenko V.M., Suprun T.T. Tekhnolohiyi metanatsiyi dlya otrymannya syntetychnoho vidnovlyuvanoho metanu [Methanation technologies for producing synthetic renewable methane]. [Thermophysics and Thermal Power Engineering], 2022, V.44, №3. P.63-72 DOI <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.6> (Ukr)

2. Klimenko V.M., Suprun T.T. Suchasni kontseptsiiy Power to Gas ta yikh realizatsiya [Modern Power to Gas concepts and their implementation]. [Thermophysics and Thermal Power Engineering], 2022, V. 44, №4. P.40-50 <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/511> (Ukr)

3. Gotz M., Lefebvre J., Mors F., Koch A.M., Graf F., Bajohr S., Reimert R. & Kolb T., Renewable power-to-gas: A technological and economic review. Renewable Energy, 2016, Volume 85, pp. 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>

4. Bailera M., Lisbona P., Romeo L.M. & Espatolero S. Power-to-gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, Volume 69, pp. 292-312, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.13>

5. J. Pavicic, K. Novak Mavar, V. Brkic, K. Simon. Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. Energies 2022, Volume 15, no 8, 2940. <https://doi.org/10.3390/en15082940>

6. Bellini, R.; Bassani, I.; Vizzarro, A.; Azim, A.A.; Vasile, N.S.; Pirri, C.F.; Verga, F.; Menin, B. Biological Aspects, Advancements and Techno-Economical Evaluation of Biological Methanation for the Recycling and Valorization of CO₂. Energies 2022, 15, 4064. <https://doi.org/10.3390/en15114064>

7. Davis Rusmanis, Richard O'Shea, David M. Wall, and Jerry D. Murphy. Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency. Bioengineered 2019, Vol. 10, No. 1, 604-634 <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1684607>

8. M.A. Voelklein, D. Rusmanis, J.D. Murphy. Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upbraiding in anaerobic digestion. Applied Energy, 2019, Vol. 235, pp. 1061-1071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.006>

9. Anna Skorek-Osikowska, Mario Martín-Gamboa, Javier Dufour Thermodynamic, economic and environmental assessment of renewable natural gas production systems Energy Conversion and Management: X 7 (2020) 100046 <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2020.100046>

10. *D.Devaraj, E.Syron, P.Donnellan*. Synthetic natural gas production: production cost, key cost factors and optimal configuration. *Int. J. of Energy Prod. & Mgmt.*, 2020, Vol. 5, No 2, 91-101. DOI: 10.2495/EQ-V5-N2-91-101
11. *Osman, A. I., Mehta, N., Elgarahy, A. M., Hefny, M., Al-Hinai, A., Al-Muhtaseb, A. H., & Rooney, D. W.* Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 20(1), 153-188. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01322-8>
12. *Till Weidner, Victor Tulusa, Gonzalo Guillén-Gosálbez*. Environmental sustainability assessment of large-scale hydrogen production using prospective life cycle analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023, Vol. 48, Issue 22, pp. 8310-8327. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.11.044>
13. *Gion Strobel, Birger Hagemann, Thiago Martins Huppertz, Leonhard Ganzer*. Underground bio-methanation: Concept and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 123 (2020) 109747 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109747>
14. *Geletukha, G., Kucheruk, P., Matveev, Y.* Prospects and Potential for Biomethane Production in Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2022, 23(4), 67-80. <https://doi.org/10.12912/27197050/149995>
15. *Geletukha, G., Matveev, Y.* Perspektyvy vyrobnytstva biometanu v Ukraini. [Prospects of biomethane production in Ukraine] *[Thermophysics and Thermal Power Engineering]*, 2021. 43(3), 65–70. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2021.8> (Ukr)
16. *Kucheruk, P., Matveev, Y., V. Rudská* Eksperymental'ne doslidzhennya pokaznykiv vykhodu biohazu v protsesi periodychnoho metanovoho brodinnya solomu [Experimental study of biogas output parameters in the batch anaerobic digestion of straw] *[Vidnovluvana Energetika]*, 2018. 2(53), 88-98. <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/152> (Ukr)
17. *Grabovskyi, M., Kucheruk, P., Pavlichenko, K. et al.* Influence of macronutrients and micronutrients on maize hybrids for biogas production. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27235-3>
18. *Ablicieva I.Yu., Geletukha G.G., Kucheruk P.P., Enrich-Prast A., Carraro G., Berezhna I.O., Berezhnyi D.M.* Digestate potential to substitute mineral fertilizers: Engineering approaches. // *Journal of Engineering Sciences* ISSN 2312-2498, 2022, Vol. 9(1), pp. H1–H10, doi: 10.21272/jes.2022.9(1).h1 https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/87882/1/Ablicieva_jes_1_2022.pdf;jsessionid=A91FF3342772FE1D0D430C2CFD5D11B1
19. *Kramar V.* Tekhnolohiyi zbahachennya biohazu ta yikh kharakterystyky. [Biogas upgrading technologies and their characteristics] *[Thermophysics and Thermal Power Engineering]*, 2023, 48(1), 64-74. <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/525> (Ukr)
20. *Klimenko V.N., Suprun T.T.* Analysis of synthetic renewable methane production technologies for implementation in Ukraine. *Eurasian Physical Technical Journal*, 2023, Vol. 20, No. 2(44), 41–45. <https://doi.org/10.31489/2023No2/41-45>

Отримано 12.09.2023

Received 12.09.2023

Прийнято до друку 23.11.2023
Accepted for publication 23.11.2023