

УДК: 620.92

СУЧАСНІ КОНЦЕПЦІЇ POWER TO GAS ТА ЇХ РЕАЛІЗАЦІЯ

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

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.5>

Розглянуті основні напрями, в яких реалізується концепція PtG в різних країнах. Наведені деякі результати досліджень процесів метанації і електролізу, отримані в реалізованих проектах.

The main directions in which the PtG concept is implemented in different countries are considered. Some results of studies of methanation and electrolysis processes, obtained in ongoing projects, are presented.

Бібл. 42, рис. 2.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, концепція Power to Gas, синтетичний природний газ, процеси метанації.

Вступ

Початкова концепція Power to Gas, а саме – акумулювання надлишкової відновлюваної електроенергії у водні, здійснюваному шляхом електролізу води, вже на початку ХХІ століття трансформувалась у технологічну структуру, яка передбачає акумулювання не тільки електроенергії, а і вуглекислого газу в більш енергоємному продукті – синтетичному природному газі (SNG), сумісному з існуючими газовими мережами і створюючи єдину гнучку енергетичну систему [1]. При цьому вирішуються такі проблеми:

- дестабілізація електричних мереж при безпосередньому підключенні до них перемінних джерел відновлюваної електричної енергії від сонячних та вітрових електростанцій;
- неможливість безпосереднього використання за допомогою існуючих газових мереж такого потужного і перспективного джерела відновлюваної енергії, як біогаз.

Технологічний ланцюжок PtG представляє собою трьохстадійний процес перетворення енергії. Першим кроком у цьому процесі є перетворення первинної енергії сонця, вітру, чи біомаси в електроенергію, або ж в біогаз. На другому кроці відновлювані електроенергія і біогаз використовуються для виробництва вуглекислого газу та водню. На третьому кроці – процес метанації, коли CO_2 і H_2 перетворюються у синтетичний природний газ, який врештірешт і являється акумулятором використаної відновлюваної енергії.

Процеси генерування електроенергії і біогазу в даній роботі не розглядаються. В даній роботі розглянуті основні методи і технології виробництва CO_2 і H_2 , а також концепції PtG, що вже реалізовані в лабораторних, пілотних та демонстраційних проектах ряду країн світу.

Україна має великий потенціал та перспективи розвитку виробництва біометану [2], тому використання світового досвіду реалізації концепції PtG є актуальним завданням для нашої країни.

1. Джерела реагентів для процесу метанації**1.1. Постачання водню**

Головним джерелом водню для технологій PtG може слугувати електроліз води – електрохімічна реакція по розщепленню води на водень і кисень. В цьому відношенні викликають інтерес три технології електролізу:

1. Лужний електроліз (AEL);
2. Електроліз з використанням полімерних електролітних (або протонообмінних) мембран (PEM);
3. Твердооксидний (або ж високотемпературний) електроліз (SOEC).

На сьогоднішній день найбільш вивченою і відпрацьованою (комерційно доступною) технологією є лужний електроліз з використанням в якості електроліту водного розчину KOH , або NaOH . Електроліз здійснюється як при атмосферному, так і підвищеному тиску. Електролізери під тиском менш ефективні, але мають ту перевагу, що виробляють вже стиснутий во-

день з меншими витратами енергії [3]. Недоліком таких електролізерів є недостатньо висока гнучкість при роботі з переривчастими джерелами електроенергії. Тому для них рекомендується режим роботи зі стабільним електроживленням. В таких умовах їх ресурс може складати 30 років [4].

Електролізери з полімерною електролітною мембраною в порівнянні з лужними є більш гнучкими і краще поєднуються з динамічними і переривчастими системами, виробляють водень дуже високої чистоти [5], але є дорогими.

Твердооксидний електролізер відрізняється найменшим споживанням електроенергії на генерацію 1 м³ водню. В ньому здійснюється електроліз перегрітої водяної пари замість води. З підвищенням температури тепла енергія, що вноситься парою в реакцію електролізу, – зростає, а електрична енергія (енергія Гіббса) – падає, що забезпечує практичну незалежність ентальпії реакції електролізу від температури. Чим більше теплової енергії вводиться ззовні в реакцію, тим менше електричної енергії споживає електролізер [6]. Ця властивість SOEC-електролізерів дозволяє отримати високі енергетичні показники PtG технологій, поєднавши такі електролізери з високоекзотермічними охолоджуваними метанаторами. Основними недоліками SOEC-електролізерів є порівняно швидка деградація матеріалів і втрата довготривалої стабільності. Крім того, при високих температурах генерований водень необхідно сепарувати від залишків водяної пари, що не розпалися на H₂ і O₂, а сам процес електролізу стає більш чутливим до переривання постачання електроенергії від джерела [7]. Несталість відновлюваної електроенергії викликає коливання в роботі електролізера і тому може вимагати зберігання водню. Існує кілька ймовірних методів зберігання водню: резервуари для стисненого газу, криогенні резервуари для стисненого рідкого водню, сховища металогідридів, фізичні сховища та підземні сховища (наприклад, соляні печери). Зберігання водню як криогенної рідини є енергетично неефективним через нестабільний тиск, безперервний витік газу та дорогу ізоляцію. Іншим варіантом зберігання водню є фізичне зберігання водню в підземних печерах. Хоча цей варіант є найдешевшим варіантом з усіх згаданих тут методів зберігання, це сховище краще підходить для довгострокового зберігання водню високої ємності. Таким чином, кращий варіант для тимчасового зберігання водню, який використовують для технологій метанації, це газові резервуари високого тиску [8].

1.2. Постачання вуглекислого газу

Необхідний для проєктів PtG CO₂ може бути отриманий з кількох CO₂ нейтральних джерел, таких як виробництво біогазу, газифікація біомаси, спалювання відходів або переробка вихідних газів на електростанціях, що працюють на викопному паливі. Крім того, було перевірено використання CO₂ з повітря. Джерела CO₂ з промисловості є одними з найбільших стаціонарних джерел CO₂ у світі [9]. Однак CO₂ від чавунної та сталеливарної промисловості, а також від цементної промисловості вимагатиме уловлювання CO₂ та деякої модернізації, щоб видалити шкідливі мікроелементи, такі як сірка. Видалення CO₂ з цих газів знижує енергоефективність і значно збільшує витрати.

Біогаз від анаеробного зброджування вважається основним джерелом CO₂, оскільки для проєктів PtG потрібні невеликі джерела двоокису вуглецю. Біогаз складається з метану (50-70%), CO₂ (30-50%) і невеликої кількості H₂S, меркаптанів і силосанів. Сам по собі біогаз не відповідає специфікаціям газової мережі та потребує покращення (видалення CO₂) для подачі в газову мережу. Це робиться за допомогою кількох методів, таких як адсорбція при змінному тиску, амінна абсорбція очищення водою, а також шляхом використання мембранних та криогенних технологій. Потік CO₂ із установок для збагачення біогазу зазвичай викидається або утилізується. Це може бути потенційним джерелом CO₂ для метанатора в схемі з окремим реактором. Крім того це усуває проблему утилізації або зберігання CO₂, або ж екологічні проблеми, пов'язані з викидом CO₂ в атмосферу [10].

2. Реалізація концепції PtG в пілотних, демонстраційних та лабораторних установках

Як вже було сказано, узагальнена концепція PtG передбачає одночасне зв'язування (акумулявання) вуглекислого газу CO₂, який генерується в різноманітних енергетичних процесах і є шкідливим для навколишнього середовища, і надлишкової відновлюваної електроенергії, отриманої від джерел, що працюють в переривчастому (нестабільному) режимі.

В [11] зроблений ретельний огляд проєктів PtG, реалізованих в різних країнах світу в період з 2009 по 2019 рр. Найбільша кількість проєктів за цей період виконана в Німеччині і орієнтована як на каталітичну, так і на біологічну метанацію. Серед інших країн лідерство тримає Великобританія, Данія, Швейцарія, США, Австрія, Японія та інші.

2.1. Проєкти PtG з каталітичною метанацією

Підприємство Audi e-gas (Німеччина), що працює з 2013 року, є одним з найбільших об'єктів PtG (потужність

5 МВт), які працюють по технології каталітичної метанації чистого водню і вуглекислого газу в одному ізотермічному реакторі з фіксованим шаром [12]. Електроенергія на електроліз поступає від чотирьох вітрових турбін, а CO_2 – від сусідньої біогазової установи, де він відокремлюється від сирого біогазу в процесі збагачення. ККД процесу PtG складає 54% без врахування додатково виробленої теплової енергії. Максимальна продуктивність – 320 $\text{нм}^3/\text{год}$ (SNG) з енерговмістом 13,85 $\text{кВт} \cdot \text{год} / \text{кг}$. Сама вітрова електростанція, на відміну від біогазової установи, використовується не стаціонарно, а по схемі енергопостачання [13]. Система використання і регулювання відпрацьованого тепла – дуже складна [14], і оптимізація роботи установки забезпечується моделюванням WOMBAT [15].

Ідея підвищення ефективності технології PtG шляхом термічної інтеграції високотемпературного електролізу (SOEC) з каталітичною метанацією при високому тиску [16] була реалізована в проєкті HELMETH [17], профінансованого Єврокомісією в рамках FP 7, і який об'єднував виконавців з Німеччини, Італії, Греції та Бельгії (рис.1).

Очікувалось, що ефективність процесу PtG буде підвищена від 61% (при використанні звичайних електролізерів і каталітичної метанації низького тиску) до 85% і вище при тиску до 30 бар і високотемпературному електролізері. Підвищення ефективності пов'язане з використанням тепла екзотермічної реакції метанації в процесі високотемпературного електролізу під тиском.

Для отримання високої якості синтетичного природного газу, яка б відповідала нормам газових мереж, де SNG повинен акумулюватися, була застосована схема модуля метанації з двома охолоджуваними реакторами з системою теплообмінників, що забезпечували необхідну

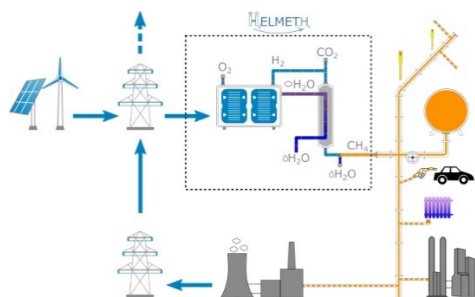


Рис. 1. Концепція HELMETH PtG з термічно інтегрованим високотемпературним електролізом та метанацією вуглекислого газу [17]

рекуперацію реакційної теплоти та ізотермічний режим метанації при температурі 300°C і тиску до 30 бар (рис. 2). Ізотермічний режим при 300°C забезпечується підвищенням тиску охолоджуючої води, при якому відбувається її кипіння, до 87 бар. Окрім температури і тиску, при яких відбувається метанація, висока якість SNG забезпечується також за рахунок конденсації і видалення реакційної води між реакторами.

Підвищення тиску, при якому здійснюється метанація, не тільки збільшує ефективність процесу PtG, але і зменшує потужність, необхідну для закачування генерованого SNG в газову мережу. Тому вибір величини тиску, при якому здійснюється процес PtG, є компромісом між його ефективністю, можливістю реалізації та інтеграції в існуючу газову мережу.

Для досягнення високого виходу метану в проєкті HELMETH були випробувані та оптимізовані різні нікелеві та рутенієві каталізatori, що забезпечило вміст метану в продукті метанації на рівні більше 97% об'ємних, а водню – на рівні менше 2% об'ємних.

Слід зазначити, що в багатьох проєктах по виробництву синтез-метану на основі каталітичної метанації, використовувався біогаз, як джерело CO_2 . При цьому досліджувались різні варіанти інтенсифікації процесу метанації як в варіанті in-situ, так і в варіанті з окремим реактором. Так, наприклад, в проєкті El-Opgraderet Biogas (Данія) модернізується біогаз шляхом постачання водню із електролізера SOEC потужністю 40 кВт.

В іншому датському проєкті Aarhus University – MeGa – stoRe модернізація біогазу здійснюється в двох-ступеневому каталітичному процесі, який очищує біогаз і перетворює забруднюючі речовини в мікроелементи для зброджувальної суспензії. Після очищення біогаз метанують в одному реакторі з повітряним охолодженням [18].

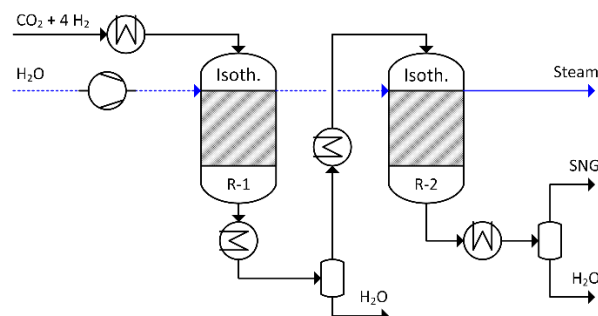


Рис. 2. Схема модуля метанації з двома реакторами, що охолоджуються, і ступенем конденсації між ними [17]

Модульний багатоканальний реактор з масляним охолодженням для модернізації біогазу передбачений в проєкті RENOYAGAS (Іспанія), який здійснювався в 2014-2016 роках [19].

В ряді інших проєктів PtG для метанації використовуються інші джерела CO_2 . Так, в нідерландському проєкті ECN-Sinthetic Methane [20] була запропонована і експериментально апробована нова сорбційна метанація, при якій до каталізатора додають цеоліт 4A, що інтенсифікує процес метанації і одночасно зневоднює SNG в реакторі. В проєкті здійснюється модернізація синтез-газу. Сорбційно інтенсифікована метанація вивчається і розробляється також в швейцарській федеральній лабораторії матеріалознавства і технології.

Покращення конверсії CO_2 здійснюється шляхом поглинання води in-situ через цеоліт-нікелевий каталізатор [21]. Процес і реактор були розроблені в рамках трьох проєктів, орієнтованих на: розробку каталізаторів [22], модернізацію біогазу [23] і метанацію промислово отриманого CO_2 [24].

Проєкт Demo SNG (Швеція), який був виконаний в період 2011-2015 роки, продемонстрував доцільність модернізації синтез-газу шляхом розробки нової концепції реактора на основі нікелевого сотового каталізатора [25].

В проєкті HSR-IET-Power-to-Gas (Швейцарія) джерелом CO_2 для метанації є повітря [26]. Ефективність установки 35% без врахування витрат енергії на сепарацію CO_2 .

В проєкті PtG Emden постачальником CO_2 являється станція очищення стічних вод. Проєкт був розпочатий в 2012 році і виконувався протягом двох років, включаючи експериментальні дослідження в лабораторних умовах [27]. В установці використовувався ізотермічний реактор при температурі 325°C і електролізер потужністю 312 кВт.

Основною метою проєкту EE-Methan aus CO_2 є розробка керамічного сотового каталізатора, адаптованого до промислових джерел CO_2 [28]. Пілотна установка для метанації складається з трьох послідовно включених реакторів з проміжним охолодженням. Для кондиціювання синтез-метану передбачалось використання мембранної технології.

2.2. Проєкти PtG з біологічною метанацією

Проєкт PtG Biological Catalysis з біологічної метанації CO_2 був розпочатий в 2014 році в датському місті Аведьоре на базі станції очищення стічних вод [29]. Передбачалась метанація CO_2 , який безпо-

середньо входив до складу сирого біогазу, отриманого в рідиннофазному анаеробному реакторі (60% CH_4 і 40% CO_2), або ж чистого CO_2 з системи модернізації біогазу [30]. Водень для метанації постачався з лужного електролізера потужністю 1 МВт, енергія для якого подавалась від вітрової електростанції. Таким чином передбачався динамічний режим роботи установки. В додаткових дослідженнях [31] було показано, що археї, які здійснюють процес метанації при температурах 60-65°C, дозволяють фіксувати в продукті реакції (метані) 98,6% CO_2 , який вміщувався в сирому біогазі складом 30% CO_2 , 68% CH_4 та до 7000 ppm сірководню. Археї показали високу толерантність до сірководню, оксидів азоту, аміаку і частково до кисню та етанолу [32]. Підтверджена концепція і технологія біологічної метанації доктора Лоренса Метса – винахідника біокаталізатора Electrochaeta [33].

Проєкт Bio Power 2 Gas є першим проєктом концепції PtG, який ґрунтується на біологічній метанації, що досяг комерційного статусу у світі. Він був розпочатий у 2013 році і реалізований в 2015 році в Аллендорфі (Німеччина). Установка включала два електролізера по 150 кВт кожний компанії Carbotech, біологічний реактор об'ємом 5 м³ від Microb Energy GmbH і системні елементи управління від Schmack Biogas GmbH [34]. Крім того біогаз мав можливість поступати на установку від двох біогазових реакторів сухої і вологої ферментації, що розташовані поблизу. До реалізації проєкту були проведені лабораторні дослідження, які підтвердили працездатність концепції біологічної метанації (вміст метану в біогазі підвищувався від 60 до 95%) [35]. Була реалізована біологічна метанація чистих CO_2 і H_2 та показано, що реактор може забезпечити метанацію в потоці, що в 30 разів перевищує його розмір [36]. У 2011 році була реалізована метанація сирого біогазу, тобто його модернізація в процесі генерування. Метаногенні бактерії споживали водень, який подавався через дно реактора і піднімався вгору через реакційну рідину. Вміст метану в біогазі збільшувався з 50 до 75% при потоці SNG 5,3 м³/год [36]. Крім того, у 2013 році була здійснена метанація біогазу з стічних вод при подачі водню безпосередньо в реактор [37].

Декілька науково-дослідних організацій Ірландії опублікували у 2019 році статтю з результатами досліджень біологічної метанації in-situ та ex-situ, проведених з метою визначення стратегій підвищення потенціалу біогазу (або ж його модернізації) до рівня біометану, тобто рівня синтетичного природного газу, який можна подавати в існуючі газові мережі [38].

В схемі in-situ для доставки реагентів до метаногенів створювався контур рециркуляції біогазу, в який подавався водень. Суміш через сопла, розташовані в дні реактора, вдувалась компресором в ферментаційну рідину (бульйон). Це на додачу до штатної мішалки дозволяло інтенсифікувати процеси і ацетатної, і гідрогенотрофної метанації. В процесах ex-situ застосовувались реактори, виконані по такій же схемі, але без мішалки, тому що реакційна рідина подавалась в реактор без твердих залишків живильного субстрату. Відбір біогазу для використання (як і для рециркуляції) здійснювався в верхній частині метантенку.

В порівнянні з іншими дослідженнями біологічної метанації новим в даній роботі є послідовне сполучення декількох блоків ex-situ, а також схема з об'єднанням блоків in-situ та ex-situ в гібридну модель.

В схемі ex-situ з трьома реакторами була досягнута конверсія 95% CO_2 при вмісті метану 85%. В гібридній схемі вміст метану в біогазі, що покидає реактор in-situ, складав 70%. Це досягалось в результаті ацетогенної і гідрогенотрофної метанації, а також за рахунок рециркуляції біогазу і його часткового очищення трьома плівковими мембранами, встановленими на виході біогазу з реактора. На виході з ex-situ реактора вміст метану в біогазі складав 84%. Вказані шляхи модернізації гібридної схеми, які підвищують рівень вмісту метану до 95%, дозволять подавати продукт процесу метанації безпосередньо в газову мережу.

В рамках проєкту PtG з використанням сонячної енергії, який планувався як перший демонстраційний проєкт США в Каліфорнії, виконувались лабораторні дослідження процесу біологічної метанації в реакторі з рідким середовищем [39].

В рамках проєкту BTU-FESPE факультету наук про навколишнє середовище та технологічну інженерію Бранденбурзького технологічного університету було розроблено анаеробний реактор зі стрічковим шаром для біокаталітичної метанації при 37°C і атмосферному тиску в безперервному процесі [40]. В реакторі розташовується нерухомий шар з будь-якого пакувального матеріалу з високою питомою поверхнею, на якому знаходяться мікроорганізми, оточені газовою фазою. Потім їх зрешують рідиною, створюючи тим самим великі градієнти концентрації і інтенсифікуючи масообмін. Результати показують вихід метану на рівні 98% в одному реакторі без необхідності рециркуляції газу [40].

Значною нещодавньою подією (28-29 квітня 2022 р.) стало офіційне відкриття у Швейцарії першого у Європі промислового заводу Power-to-Gas. Заснована на біологічній метанації, ця установка є першою в Європі і є важливою віхою як для її власника та оператора Limesco, так і для HZI Schmack (дочірнє підприємство Hitachi Zosen Inova AG), які запропонували інноваційну технологію [41]. На новій установці PtG відновлювана електроенергія з очисних споруд стічних вод використовується для розщеплення води на кисень і водень за допомогою електролізу. На другому етапі процесу цей водень подається в реактор метанації HZI Schmack разом із газом стічних вод. У процесі «BiON», розробленому власними силами, мікроорганізми в цьому біореакторі перетворюють водень і CO_2 , що міститься в газах стічних вод, в біометан в анаеробних умовах. Потім біометан очищається і може бути поданий в місцеву газову мережу як CO_2 -нейтральний замітник природного газу.

В сучасному огляді [42], виконаному науковцями факультету гірничої справи, геології і нафтової інженерії Загребського університету (Хорватія), розглянуті технології і нинішній стан виробництва біогазу і біометану в Європі. На сьогоднішній день мембранна сепарація є ведучою технологією модернізації біогазу, яка застосовується на більш, ніж 35% підприємств виробництва біометану. Використання криогенної сепарації знаходиться на початковій стадії розробки, а термічна газифікація – на ранній стадії комерціалізації. Гідротермальна газифікація проілюстрована в пілотних проєктах, виконаних в Нідерландах та Франції. Велика увага приділяється попередній технологічній обробці вихідної сировини, а саме, механічній, мікрохвильовій, термічній, хімічній і біологічній. Попередня електрохімічна обробка біомаси розглядається як перспективна для використання лігноцелюлози, а збільшення виходу біогазу може бути забезпечено за рахунок попередньої обробки біомаси іонною рідиною.

Висновки

На сьогоднішній день в багатьох країнах світу (Німеччині, Великобританії, Данії, Швейцарії, США, Австрії, Японії, Нідерландах та інших) провадяться активні роботи по створенню технологій, що реалізують концепцію Power-to-Gas. Вже здійснена велика кількість лабораторних, пілотних та демонстраційних проєктів, які підтверджують життєздатність і перспективність концепції PtG. Світовий досвід реалізації концепції

PtG має стати прикладом для України. Але поки що важко визначити магістральний напрямок розвитку технологій. Не торкаючись економічної сторони проблеми, на основі порівняння технічних характеристик виконаних проєктів PtG з процесами каталітичної і біологічної метанації, можна стверджувати, що:

- Спостерігається поступове зміщення акцентів концепції реалізованих проєктів PtG від базового (акумулявання в газі надлишкової нестабільної відновлюваної енергії) в сторону утилізації CO₂ від різних джерел. Це сприяє вирішенню нагальних проблем декарбонізації енергетики. Великого значення набуває в сучасних умовах виробництво синтетичного метану і біометану, які розглядаються як альтернатива дорогому та іноді дефіцитному природному газу.

- Проєкти PtG середньої і великої потужності (понад 1 МВт) виконуються з застосуванням технології каталітичної метанації завдяки їх здатності до масштабування і можливості підвищення ефективності процесу за рахунок використання теплоти метанації.

- Проєкти невеликої потужності доцільно виконувати з застосуванням біологічної метанації, тому що біометанація потребує застосування реакторів з великим питомим об'ємом. Проте цей напрямок біометанації компенсується її підвищеною стійкістю до таких шкідливих домішок, як сірка та кисень. Знайшли своє практичне втілення обидві концепції PtG – in-situ та ex-situ. Гібридна модель in-situ + ex-situ може стати альтернативою традиційним системам збагачення біогазу.

- Велика увага приділяється технологіям попередньої обробки біомаси.

ЛІТЕРАТУРА

1. *M. Sterner*, Bioenergy and Renewable Power Methane in Integrated 100% Renewable Energy Systems: Limiting Global Warming by Transforming Energy Systems, in: Erneuerbare Energien und Energieeffizienz/Renewable Energies and Energy Efficiency, 14, Kassel Univ. Press, 2010, ISBN 978-3-89958-798-2.
2. *Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev*. Prospects and potential for biomethane production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoet.com/Prospects-and-Potential-for-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>

3. *R. Bhandari, C.A. Trudewind, P. Zapp*, Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis: a review, Journal of Cleaner Production, 2014, Volume 85, pp. 151-163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>.

4. *F. Graf, M. Gotz, M. Henel, T. Schaaf, R. Tichler*, Abschlussbericht “Techno-ökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten”, Bonn, 2014.

5. *B. Hacker, P. Gesikiewicz, T. Smolinka*, Arbeitspaket 1b: systemoptimierung und Betriebsführung der PEM-Elektrolyse, energiejournal-praxis, 2015, 65 pp. 37-40.

6. *M.A. Laguna-Bercero*, Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: a review, Journal of Power Sources, 2012, Volume 203, pp. 4-16, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.019>

7. *A. Ursua, L.M. Gandia, P. Sanchis*, Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends, Proc. IEEE, 2012, Volume 100, Issue 2, pp. 410-426, 10.1109/JPROC.2011.2156750.

8. *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>

9. *T.A. Napp, A. Gambhir, T.P. Hills, N. Florin, P.S. Fennell*, A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, Volume 30, pp. 616-640, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.036>

10. *W. Koppel, M. Gotz, F. Graf*, Biogas upgrading for injection into the gas grid: quality aspects, technological and ecological consideration, International issue 2009, gwf-Gas Erdgas pp. 26-35. https://www.researchgate.net/publication/271073651_Biogas_Upgrading_for_Injection_into_the_Gas_Grid_Quality_aspects_technological_and_ecological_consideration

11. *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>

12. *Rieke S.* Catalytic methanation – the Audi e-gas project as an example of industrialized technology for Power to gas. REGATEC 2015, Barcelona, Spain, 2015.

13. *Strohbach O.* Audi e-gas plant stabilizes electrical grid. Press Release - Audi MediaInfo - Technology and Innovation Communications; 2015, <https://www.automobilsport.com/audi-e-gas-stabilizes-electrical-grid---138930.html>

14. Bosa T, Brusdeylins C, Regno A Del, Scherg G, Zimmer U. Annual Report 2014. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW); 2014, https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Jahresberichte/JB-2014.pdf
15. *Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien* 2012 - Forschungsberichte im Überblick. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; 2012.
16. Trimis D., Anger S., Potenzial der thermisch integrierten Hochtemperatur-Elektrolyse und Methanisierung für die Energiespeicherung durch Power-to-Gas (PtG), *gwf- Gas; Erdgas*, Januar/Februar 2014, pp. 50-59. <https://docplayer.org/52568305-Potenzial-der-thermisch-integrierten-hochtemperatur-elektrolyse-und-methanisierung-fuer-die-energiespeicherung.html>
17. *Проект HELMETH* <http://www.helmeth.eu/index.php/project>.
18. Møller P, Yde L. MeGa-stoRE final report (Project no. 12006). Aarhus: Aarhus University; 2014. <https://www.lemvigbiogas.com/MeGa-stoREfinalreport.pdf>
19. Sánchez M. RENO VAGAS - Proceso de Generación de Gas Natural Renovable. Jornada PTEHPC. Grupo de Trabajo Técnico de Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno, Huelva, Spain: Centro Nacional del Hidrógeno (CNH₂); 2015, https://www.pteco2.es/Uploads/docs/3.%20J.Rubio_RENOVAGAS_Presentacion%20Jornada%20PTEHPC.pdf
20. Saric M, Dijkstra JW, Rabou LPLM, Haije WG, Walspurger S. SNG quality in Power to Gas applications. Sixth Research Day of the Energy Delta Gas Research, Nunspeet, The Netherlands; 2014.
21. Borgschulte A, Gallandat N, Probst B, Suter R, Callini E, Ferri D, et al. Sorption enhanced CO₂ methanation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013; Volume 15, pp. 9620–9625. <https://doi.org/10.1039/C3CP51408K>
22. Gassmann F, Lutz P, Elber U. Annual Activity Report 2014. Competence Center Energy and Mobility CCEM, 2014.
23. *SmartCat* - Swiss Federal Office of Energy SFOE Ongoing projects 2015.
24. *Catalytic methanation* of industrially-derived CO₂ (Project 153928), SNSF P3 Research Database 2015. <https://p3.snf.ch/project-153928>
25. Landgraf M. Flexible methane production from electricity and bio-mass. Karlsruhe: Press Release - Karlsruhe Institute of Technology; 2014. https://www.kit.edu/downloads/pi/KIT_PI_2014_162_Flexible_Methane_Production_from_Electricity_and_Bio-mass.pdf
26. Frank E. Aktivitäten Power-to-Gas am IET/HSR. Power-to-Gas Expert. Hochschule für Technik Rapperswil; 2015. https://www.iet.hsr.ch/fileadmin/user_upload/iet.hsr.ch/Power-to-Gas/04_Frank_PtG_am_IET_FRK.pdf
27. Steinigeweg S. Power to Gas in Emden. Sitzung 19.06.2013 Betriebsausschuss Bau- und Entsorgungsbetrieb; 2013.
28. *EE-Methan from CO₂* - Development of a catalytic process for the methanation of CO₂ from industrial sources 2015.
29. Hofstetter D. Energy storage leaders launch commercial scale power-to-gas project using highly innovative technology. Press Release - BioCat Project; 2014. <https://www.electrochaea.com/latest-news/energy-storage-leaders-launch-commercial-scale-power-to-gas-project/>
30. *Energy Storage* - Thematic Research Summary. European Commission; 2014.
31. *STORE & GO* - Power-to-Gas - École Polytechnique Fédérale de Lausanne 2015. <https://www.storeandgo.info/about-the-project/index.html>
32. Hofstetter D The BioCat Project - Lifting Biological Methanation to Market Readiness. REGATEC 2015, Barcelona, Spain: 2015.
33. Iskov H, Rasmussen NB. Global screening of projects and technologies for Power-to-Gas and Bio-SNG. Hørsholm: Danish Gas Technology Centre; 2013. https://www.dgc.dk/sites/default/files/filer/publikationer/R1307_screening_projects.pdf
34. Heller T. First commercial PtG-plant with biological methanation goes live. HANNOVER MESSE - Technical Forum h2fc fair, Viessmann; 2015. <https://www.fch.europa.eu/event/hannover-messe-2015>
35. Reuter M. Power to Gas: Microbial Methanation, a Flexible and Highly Efficient Method. HANNOVER MESSE; 2013. <https://docplayer.org/8324951-Power-to-gas-microbial-methanation-a-flexible-and-highly-efficient-method.html>
36. Benjaminsson G, Benjaminsson J, Rudberg RB. Power-to-Gas - A technical review. Svenskt Gastekniskt Center AB; 2013. http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC284_eng.pdf
37. Reuter M. Viessmann Tochterunternehmen MicrobEnergy realisiert Power-to-Gas an der Kläranlage Schwandorf. Schwandorf: Press Release - MicrobEnergy GmbH; 2013.

38. *M.A. Voelklein, Davis Rusmanis, J.D. Murphy.* Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion. *Applied Energy*, 2019, Volume 235, pp. 1061-1071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.006>
39. *Raspberry T.* Southern California Gas Comments on Draft AB 1257 Report (Docket No. 15-IEPR-04). SoCalGas; 2015.
40. *Burkhardt M, Koschack T, Busch G.* Biocatalytic methanation of hydrogen and carbon dioxide in an anaerobic three-phase system. *Bioresource Technology*, 2015; Volume 178, pp. 330–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.023>
41. <https://bioenergyinternational.com/europes-first-industrial-biological-methanation-ptg-plant-inaugurated/>
42. *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>

MODERN POWER TO GAS CONCEPTS AND THEIR IMPLEMENTATION

Klimenko V.M., Suprun T.T.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2022.5>

The concept of PtG, namely the accumulation of energy in gas, has attracted the increasing attention of energy experts in recent years because:

- it allows solving the problem of using unstable solar and wind energy and thereby creating a powerful incentive for the development of these areas of renewable energy;
- it becomes a significant generator of synthetic methane – an alternative to already expensive and in some cases scarce natural gas.

Today, PtG projects are implemented in many countries of the world. The main efforts of researchers are aimed at increasing the efficiency of hydrogen generation and methanation processes, increasing the productivity of electrolyzers and methanators, and reducing their cost in order to achieve commercialization of the implemented technologies.

Among water electrolysis technologies, the direction of application of solid polymer electrolytic membranes (PEM) is promising and attractive; the main advantage of which compared to alkaline electrolysis is a faster cold start, as well as greater flexibility and a better combination with unstable sources of electrical energy. Also promising is solid oxide (known as high-temperature) electrolysis (SOES), which is characterized by low power consumption and is very well compatible in a single technological scheme with highly exothermic methanation reactions, although they are more sensitive to fluctuations in power sources.

For adiabatic catalytic methanation reactors, the main problem is ensuring the optimal reaction temperature due to cooling, in particular due to the difficulties of its control. One of the ways to overcome these difficulties is the use of three-phase reactors.

For biological methanation reactors, the main problem remains the low level of mass transfer of hydrogen, which limits the productivity of the process.

References 42, fig.2

Keywords: renewable energy sources, the concept of Power to Gas, synthetic natural gas, methanation processes.

1. *M. Sterner*, Bioenergy and Renewable Power Methane in Integrated 100% Renewable Energy Systems: Limiting Global Warming by Transforming Energy Systems, in: Erneuerbare Energien und Energieeffizienz/Renewable Energies and Energy Efficiency, 14, Kassel Univ. Press, 2010, ISBN 978-3-89958-798-2.

2. *Georgii Geletukha, Petro Kucheruk, Yuri Matveev*. Prospects and potential for biomethane production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology. ISSN 2719-7050. 2022, Volume 23, Issue 4, 67–80 pp. <http://www.ecoet.com/Prospects-and-Potential-for-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>

3. *R. Bhandari, C.A. Trudewind, P. Zapp*, Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis e a review, Journal of Cleaner Production, 2014, Volume 85, pp. 151-163, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.048>.

4. *F. Graf, M. Gotz, M. Henel, T. Schaaf, R. Tichler*, Abschlussbericht “Techno-ökonomische Studie von Power-to-Gas-Konzepten”, Bonn, 2014.

5. *B. Hacker, P. Gesikiewicz, T. Smolinka*, Arbeitspaket 1b: systemoptimierung und Betriebsführung der PEM-Elektrolyse, energiejournal-praxis, 2015, 65 pp. 37-40.

6. *M.A. Laguna-Bercero*, Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: a review, Journal of Power Sources, 2012, Volume 203, pp. 4-16, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2011.12.019>

7. *A. Ursua, L.M. Gandia, P. Sanchis*, Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends, Proc. IEEE, 2012, Volume 100, Issue 2, pp. 410-426, 10.1109/JPROC.2011.2156750.

8. *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>

9. *T.A. Napp, A. Gambhir, T.P. Hills, N. Florin, P.S. Fennell*, A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, Volume 30, pp. 616-640, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.036>

10. *W. Koppel, M. Gotz, F. Graf*, Biogas upgrading for injection into the gas grid quality aspects, technological and ecological consideration, International issue 2009, gwf-Gas Erdgas pp. 26-35. https://www.researchgate.net/publication/271073651_Biogas_Upgrading_for_Injection_into_the_Gas_Grid_Quality_aspects_technological_and_ecological_consideration

11. *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>
12. *Rieke S.* Catalytic methanation – the Audi e-gas project as an example of industrialized technology for Power to gas. REGATEC 2015, Barcelona, Spain, 2015.
13. *Strohbach O.* Audi e-gas plant stabilizes electrical grid. Press Release - Audi MediaInfo - Technology and Innovation Communications; 2015, <https://www.automobilsport.com/audi-e-gas-stabilizes-electrical-grid---138930.html>
14. *Bosa T, Brusdeylins C, Regno A Del, Scherg G, Zimmer U.* Annual Report 2014. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW); 2014, https://www.zsw-bw.de/fileadmin/user_upload/PDFs/Jahresberichte/JB-2014.pdf
15. *Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2012 - Forschungsberichte im Überblick.* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; 2012.
16. *Trimis D., Anger S.* Potenzial der thermisch integrierten Hochtemperatur elektrolyse und Methanisierung für die Energiespeicherung durch Power-to-Gas (PtG), *gwf- Gas; Erdgas*, Januar/Februar 2014, pp. 50-59. <https://docplayer.org/52568305-Potenzial-der-thermisch-integrierten-hochtemperatur elektrolyse-und-methanisierung-fuer-die-energiespeicherung.html>
17. *Project HELMETH* <http://www.helmeth.eu/index.php/project>.
18. *Møller P, Yde L.* MeGa-stoRE final report (Project no. 12006). Aarhus: Aarhus University; 2014. <https://www.lemvigbiogas.com/MeGa-stoREfinalreport.pdf>
19. *Sánchez M.* RENOVAGAS - Proceso de Generación de Gas Natural Renovable. Jornada PTEHPC. Grupo de Trabajo Técnico de Almacenamiento y Distribución de Hidrógeno, Huelva, Spain: Centro Nacional del Hidrógeno (CNH₂); 2015, https://www.pteco2.es/Uploads/docs/3.%20J.Rubio_RENOVAGAS_Presentacion%20Jornada%20PTEHPC.pdf
20. *Saric M, Dijkstra JW, Rabou LPLM, Haije WG, Walspurger S.* SNG quality in Power to Gas applications. Sixth Research Day of the Energy Delta Gas Research, Nunspeet, The Netherlands; 2014.
21. *Borgschulte A, Gallandat N, Probst B, Suter R, Callini E, Ferri D, et al.* Sorption enhanced CO₂ methanation. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2013; Volume 15, pp. 9620–9625. <https://doi.org/10.1039/C3CP51408K>
22. *Gassmann F, Lutz P, Elber U.* Annual Activity Report 2014. Competence Center Energy and Mobility CCEM, 2014.
23. *SmartCat* - Swiss Federal Office of Energy SFOE Ongoing projects 2015.
24. *Catalytic methanation* of industrially-derived CO₂ (Project 153928), SNSF P3 Research Database 2015. <https://p3.snf.ch/project-153928>
25. *Landgraf M.* Flexible methane production from electricity and bio-mass. Karlsruhe: Press Release - Karlsruhe Institute of Technology; 2014. https://www.kit.edu/downloads/pi/KIT_PI_2014_162_Flexible_Methane_Production_from_Electricity_and_Bio-mass.pdf
26. *Frank E.* Aktivitäten Power-to-Gas am IET/HSR. Power-to-Gas Expert. Hochschule für Technik Rapperswil; 2015. https://www.iet.hsr.ch/fileadmin/user_upload/iet.hsr.ch/Power-to-Gas/04_Frank_PtG_am_IET_FRK.pdf
27. *Steinigeweg S.* Power to Gas in Emden. Sitzung 19.06.2013 Betriebsausschuss Bau- und Entsorgungsbetrieb; 2013.
28. *EE-Methan from CO₂* - Development of a catalytic process for the methanation of CO₂ from industrial sources 2015.
29. *Hofstetter D.* Energy storage leaders launch commercial scale power-to-gas project using highly innovative technology. Press Release - BioCat Project; 2014. <https://www.electrochaea.com/latest-news/energy-storage-leaders-launch-commercial-scale-power-to-gas-project/>
30. *Energy Storage* - Thematic Research Summary. European Commission; 2014.
31. *STORE & GO* - Power-to-Gas - École Polytechnique Fédérale de Lausanne 2015. <https://www.storeandgo.info/about-the-project/index.html>
32. *Hofstetter D* The BioCat Project - Lifting Biological Methanation to Market Readiness. REGATEC 2015, Barcelona, Spain: 2015.
33. *Iskov H, Rasmussen NB.* Global screening of projects and technologies for Power-to-Gas and Bio-SNG. Hørsholm: Danish Gas Technology Centre; 2013. https://www.dgc.dk/sites/default/files/filer/publikationer/R1307_screening_projects.pdf
34. *Heller T.* First commercial PtG-plant with biological methanation goes live. HANNOVER MESSE - Technical Forum h2fc fair, Viessmann; 2015. <https://www.fch.europa.eu/event/hannover-messe-2015>
35. *Reuter M.* Power to Gas: Microbial Methanation, a Flexible and Highly Efficient Method. HANNOVER MESSE; 2013. <https://docplayer.org/8324951-Power-to-gas-microbial-methanation-a-flexible-and-highly-efficient-method.html>
36. *Benjaminsson G, Benjaminsson J, Rudberg RB.* Power-to-Gas - A technical review. Svenskt Gastekniskt Center AB; 2013. http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC284_eng.pdf

37. *Reuter M.* Viessmann Tochterunternehmen MicrobEnergy realisiert Power-to-Gas an der Kläranlage Schwandorf. Schwandorf: Press Release - MicrobEnergy GmbH; 2013.
38. *M.A. Voelklein, Davis Rusmanis, J.D. Murphy.* Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgridding in anaerobic digestion. *Applied Energy*, 2019, Volume 235, pp. 1061-1071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.006>
39. *Raspberry T.* Southern California Gas Comments on Draft AB 1257 Report (Docket No. 15-IEPR-04). SoCalGas; 2015.
40. *Burkhardt M, Koschack T, Busch G.* Biocatalytic methanation of hydrogen and carbon dioxide in an anaerobic three-phase system. *Bioresource Technology*, 2015; Volume 178, pp. 330–333. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.08.023>
41. <https://bioenergyinternational.com/europes-first-industrial-biological-methanation-ptg-plant-inaugurated/>
42. *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>

Отримано 07.09.2022
Received 07.09.2022