

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ МЕТАНУВАННЯ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА СИНТЕТИЧНОГО ВІДНОВЛЮВАНОВОГО МЕТАНУ В УКРАЇНІ

Т. Т. Супрун, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут технічної теплофізики НАН України

E-mail: suprun@secbiomass.com

Анотація. Відомо, що однією з найважливіших і найактуальніших проблем сучасної світової енергетики став пошук і розробка відновлюваних джерел енергії як альтернатив традиційним викопним паливам.

Метанування, тобто реакція перетворення вуглекислого газу і водню з отриманням синтетичного відновлюваного метану, є одним із напрямів пошуку і освоєння альтернативних джерел енергії як заміника дефіцитного природного газу.

Об'єктом цього дослідження є синтетичний відновлюваний метан, а також особливості технологій метанування для його виробництва.

Мета роботи - огляд світового досвіду розробки технологій метанування для виробництва синтетичного відновлюваного метану та визначення перспективних шляхів впровадження цих технологій в Україні.

Методи дослідження включають вивчення і аналіз літературних та інших даних, зокрема результатів впровадження проєктів з метанування.

Як показали проведені дослідження, особливо цікавими для умов України є технології метанування тільки з відновлюваними компонентами. Саме такі технології і аналізуються в статті.

У роботі розглянуті технологічні можливості застосування методів каталітичного і біологічного метанування з метою ефективного використання відновлюваної сонячної і вітрової електроенергії для генерування водню шляхом електролізу води, а також вуглекислого газу органічного походження для виробництва синтетичного відновлюваного метану.

Найдокладніше розглянуто технологію біологічного метанування як перспективного напрямку впровадження технологій метанування в Україні для виробництва синтетичного відновлюваного метану. Проаналізовано аспекти, пов'язані з сучасними технологіями, такими як *in situ*, *ex situ*. Показано особливості концепції підземного метанування, що є одним із напрямів біологічного метанування.

У роботі розглянуті різні конструкції реакторів для каталітичного і біологічного метанування, зазначені їх переваги і недоліки.

Ключові слова: синтетичний відновлюваний метан, технології метанування, відновлювані джерела енергії

Актуальність. Відомо, що однією з найважливіших і найактуальніших проблем сучасної світової енергетики став пошук і розробка відновлюваних джерел енергії в якості альтернатив традиційним викопним паливам.

Метанування, тобто реакція перетворення вуглекислого газу CO_2 і водню H_2 з отриманням синтетичного відновлюваного метану, є одним із напрямів пошуку і освоєння альтернативних джерел енергії як заміника дефіцитного природного газу. Для отримання синтетичного відновлюваного метану всі компоненти реакції мають бути відновлюваними, саме такі технології метанування розглядаються в статті. Перетворення вуглекислоти органічного походження в метан можна розглядати не тільки як засіб отримання альтернативного джерела теплової енергії, а ще як ефективний засіб декарбонізації теплової енергетики, що є актуальним завданням. Застосування несталої і переривчастої в часі електроенергії вітрових і сонячних електростанцій для виробництва водню шляхом електролізу води дозволяє, з однієї сторони, уникнути труднощів використання такої енергії в електромережах, а, з іншої сторони, це стає потужним стимулом для розвитку відновлюваної електроенергетики. Виходячи з вищевикладеного, впливає актуальність застосування технологій метанування для виробництва синтетичного відновлюваного метану. У зв'язку з активним розвитком в останні роки розробок та впровадження біометанових технологій в Україні [1] використання такого досвіду є актуальним і для нашої країни.

Аналіз результатів останніх досліджень і публікацій. В останні роки значно збільшилась кількість досліджень, присвячених технологіям метанування [2, 3, 4]. Зокрема, такі дослідження провадяться в багатьох країнах світу: США, Швейцарії, Данії, Німеччині, Франції, Японії та інших. Вже відомі лабораторні, пілотні та демонстраційні установки, в яких реалізовані такі технології.

Огляду особливостей існуючих технологій виробництва синтетичного відновлюваного метану та аналізу можливостей їх застосування в Україні були присвячені публікації [5, 6].

Мета дослідження – огляд світового досвіду розробки технологій метанування для виробництва синтетичного відновлюваного метану та визначення перспективних шляхів впровадження цих технологій в Україні. Метою цього дослідження є надання актуального огляду процесу метанування та опису параметрів, що впливають на процес і продуктивність метанування, поточне застосування та майбутні перспективи. Огляд також розглядає різноманітні схеми та конструкції реакторів для технологій метанування.

Матеріали та методи дослідження. Методи дослідження включають вивчення і аналіз літературних даних щодо технологій метанування, зокрема, порівнювальний аналіз технологій каталітичного і біологічного метанування, їх переваг і недоліків, аналіз літературних даних про вплив різних параметрів на ці технології, вивчення конструкцій реакторів для технологій метанування, аналіз результатів впровадження проєктів з метанування.

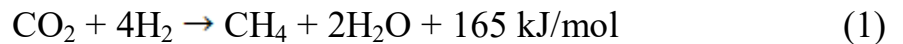
Результати досліджень та їх обговорення.

Процес метанування може здійснюватися двома способами:

- в каталітичних реакторах, в яких реалізується хімічна реакція Сабатьє;
- в біологічних реакторах, в яких процес метанування відбувається за участі метаногенних мікроорганізмів, так званих архей.

1. Технології каталітичного метанування

Каталітичне метанування - це хімічна реакція, в якій водень та вуглекислий газ синтезуються в метан. Виробництво метану через реакцію Сабатьє (1) є екзотермічною каталітичною реакцією і зазвичай проходить при температурах від 200° до 550°C:



Адіабатичне підвищення температури, пов'язане з ходом реакції, є досить високим, що призводить до зменшення частки H_2 і CO_2 , що прореагували (тобто зменшення кількості генерованого метану або ж швидкості метанування). Збільшення виходу метану можна досягти знизивши температуру процесу метанування, а також збільшивши тиск у реакторі.

У багатьох статтях, де розглядалась технологія каталітичного метанування, приведені результати досліджень з метою розробки новітніх конструкцій реакторів та каталізаторів з високою активністю, селективністю за CH_4 і стійкістю до тепла реакції. Розглядалися такі каталізatori як Nickel, Ruthenium, Rhodium, Palladium, Cobalt, Iron [7]. Зокрема, в публікації [8], присвяченій дослідженню процесу каталітичного метанування, відмічалось, що в діапазоні 225–275 °C при використанні Ru-каталізатора були продемонстровані відмінна конверсія CO_2 , стабільність і селективність метану.

Одним з успішних проєктів з каталітичним метануванням є проєкт HELMETH [9], де була реалізована ідея термічної інтеграції високотемпературного електролізу (твердооксидний електроліз SOEC) з каталітичним метануванням при високому тиску. Підвищення ефективності пов'язане з використанням тепла екзотермічної реакції метанування в процесі високотемпературного електролізу під тиском.

2. Технології біологічного метанування

Біологічне метанування - процес генерування синтетичного метану з двоокису вуглецю та водню за допомогою метаногенів, так званих архей, які отримують енергію для зростання шляхом анаеробного засвоєння водню і двоокису вуглецю.

У багаточисленних літературних оглядах біометанування описується як гнучкий процес, здатний працювати в широкому діапазоні температур (T), нейтрального рН і стандартного тиску (P). Результати більшості досліджень вказують на те, що процес посилюється в термофільних умовах ($T < 60$ °C) і під час підвищення тиску в реакторі через їх позитивний вплив на швидкість реакції та розчинення газу, що забезпечує високий вихід продукту.

Основні переваги біометанування містять: (1) високу стійкість до домішок у кінцевому продукті та вихідному газі; (2) можливість роботи з перервами; (3) біометанування відбувається в рідкій фазі, що допомагає буферизувати ефекти навантаження; та (4) здатність біокаталізатора самовідновлюватися за відповідних умов.

У роботі [10] було детально досліджено біометанування H_2 і CO_2 як біотехнологічний процес, і було продемонстровано як впливають на продуктивність

процесу декілька факторів, включаючи прийняті стратегії налаштування (тобто *in situ*, *ex situ*), вибір біокатализатора (тобто чиста мікробна культура або змішаний метаногенний консорціум), а також деякі хіміко-фізичні параметри.

Біометанування *in situ* може бути досягнуто шляхом введення H_2 , отриманого із зовнішніх джерел, безпосередньо в біогазовий реактор. Поряд із CO_2 , що утворюється під час анаеробного зброджування у біогазовому реакторі, H_2 перетворюється на CH_4 за допомогою активності гідрогенотрофних метаногенів [11] (рис. 1, a).

Біометанування *ex situ* відбувається за допомогою введення H_2 і CO_2 із зовнішніх джерел всередину реактора біометанування, що містить збагачені або чисті гідрогенотрофні метаногенні культури [12] (рис. 1, b).

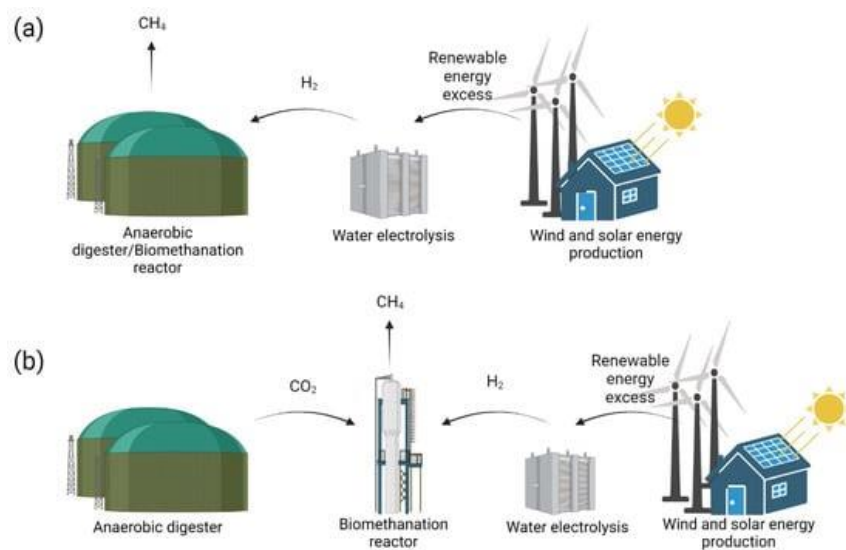


Рис. 1. Схема, що представляє технології біометанування *in situ* (a) та *ex situ* (b) [10]

У схемі *in situ* введення в метантенк водню стимулює метаногенез, але пригнічує ацетогенез. Тобто основним недоліком біометанування *in situ* є те, що в одному процесі не можуть бути забезпечені оптимальні умови як для ацетокластичних, так і для гідрогенотрофних метаногенів. Основною перевагою концепції *ex situ* є те, що можна створити оптимальні умови для протікання реакції гідрогенотрофного метагенезу, не впливаючи при цьому на увесь ланцюг перетворення комплексної органічної речовини в процесі метанового бродіння в *in situ* технології.

Технологія біологічного метанування привернула багато уваги та була широко досліджена протягом останніх 10 років [10 - 14]. Біометанування можна ідентифікувати як технологію на ранніх стадіях, яка, хоча й глибоко досліджена в лабораторних масштабах і демонструє багатообіцяючий потенціал, проте показує небагато успішних прикладів на сьогоднішній день демонстраційних/комерційних установок [10]. Результати різних досліджень показують як процеси біометанування можуть призвести до виробництва біометану, рівень CH_4 в якому подібний до природного газу і часто перевищує 95% газової суміші, що робить його повністю сумісним з існуючою інфраструктурою. Таким чином, біометан можна використовувати як заміну природного газу і безпосередньо закачувати в газову мережу та системи зберігання, значно скорочуючи початкові інвестиції. Згідно з багаточисленними опитуваннями, станом на 2019 рік на різних стадіях реалізації було 33 проекти біометанування [10]. У таких проєктах застосовується H_2 , який виробляється за допомогою електролізу води, що живиться від надлишку електроенергії, виробленої відновлюваними джерелами енергії, і CO_2 , який в основному отримують зі стічних вод і каналізаційних газів (наприклад, проекти SYMBIO, Electrochaea GmbH). Крім того, повідомляється про кілька прикладів установок біометанування в комерційних масштабах, в яких вироблений біометан вводять безпосередньо в газову мережу або зберігають його на місці [3, 4].

2.1 Підземне біометанування

Новий напрямок досліджень для технології біометанування представлено підземним метануванням - повільним і спонтанним явищем, що виникає в результаті перетворення суміші H_2 і CO_2 в CH_4 у глибоких геологічних структурах через присутність метаногенних архей у місцевих мікробних популяціях [10].

Технічна концепція підземного біометанування безпосередньо пов'язана з технологією підземного зберігання природного газу та полягає у впорскуванні газоподібного водню та вуглекислого газу в підземну структуру під час піків виробництва енергії, які згодом частково перетворюються на метан. Отримана багата метаном газова суміш відводиться під час високої потреби в енергії.

На рис. 2 показана підземна біореакторна система (UMR - underground methanation reactor) у пористих підземних структурах, перевагою якої є величезний об'єм реактора в поєднанні зі сховищем, які обидва вважаються критичними аспектами в ланцюжку процесу біометанування. Водень і вуглекислий газ вводяться в у пористу формацію через нагнітальну свердловину. Газ, який згодом складається з метану та водню, може бути відібраний експлуатаційною свердловиною. Вироблений «зелений» метан або газову суміш з реактора необхідно переробити та подати трубопроводами до споживачів. Наземна інфраструктура вимагає, щоб електролізер для виробництва водню був розміщений поблизу відновлюваних джерел енергії, які будуть використовуватися для його постачання, а також наявності доступного джерела CO₂, який буде закачуватися в підземне сховище. Це може бути, наприклад, біогазова установка.

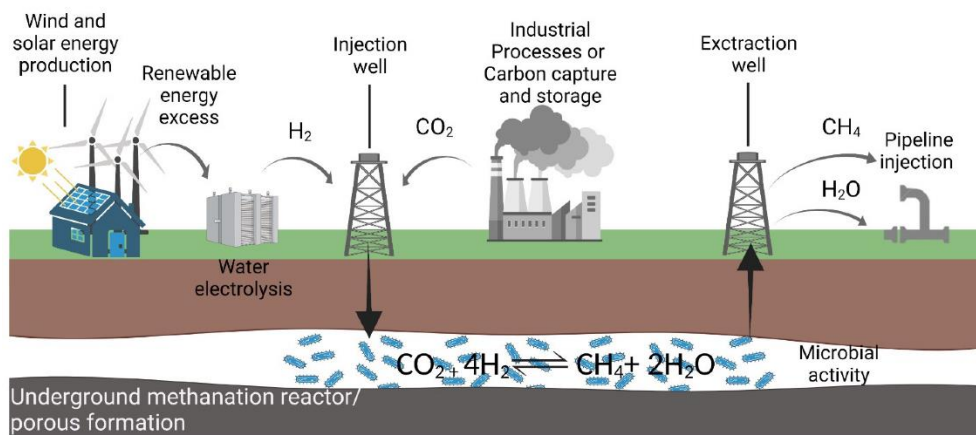


Рис. 2. Схематичне зображення концепції підземного реактора метанування (UMR) [10]

Проведені дослідження [15] показують, що концепція підземного реактора метанування має високий потенціал. Можливість зберігання та перетворення в одному місці може допомогти централізувати енергію з локальних установок електролізу. Крім того, підземне метанування потенційно може бути важливою частиною конверсії в енергетичному секторі, що базується на водні, і циклічній економіці з мінімальним викидом вуглецю, де поєднується уловлювання вуглецю з багатих вуглецем галузей і виробництво «зеленого/блакитного» водню, тобто так звана вуглецева циркулярна економіка.

3. Конструкції реакторів для технології метанування

Метанування можна проводити як у біологічних, так і в каталітичних реакторах метанування.

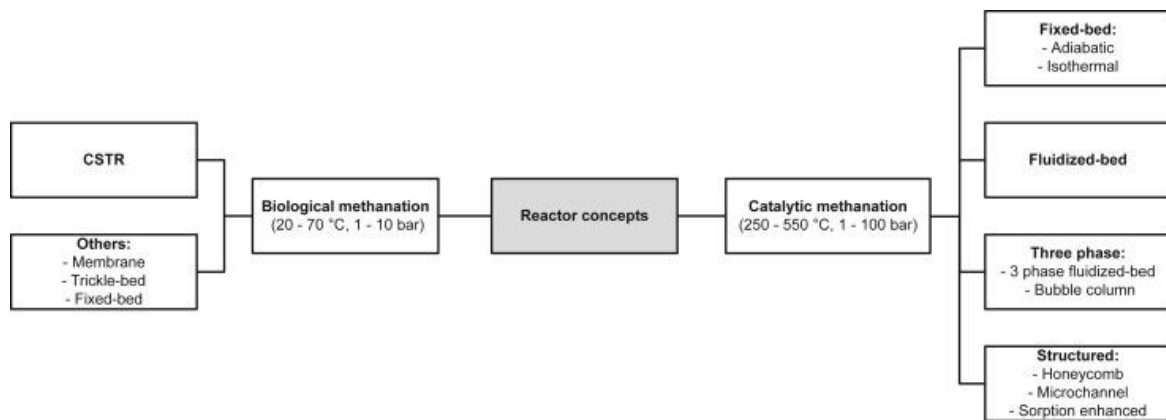


Рис. 3. Концепції реакторів для технологій метанування [2]

Реактори каталітичного метанування зазвичай працюють при температурах від 200 °C до 550 °C і при тиску в діапазоні від 1 до 100 бар.

Як впливає з рис.3, реактори для каталітичного метанування бувають різних конструкцій, зокрема:

- реактори з фіксованим (нерухомим) шаром: адіабатні; ізотермічні;
- реактори з псевдозрідженим чи киплячим шаром;
- реактори трифазні: три фази киплячого шару; бульбашкова колона;
- реактори структуровані: хонейкомбові, мікроструктуровані; сорбційно підсиленої реакції метанування.

Як зазначалось вище, реакція Сабатьє екзотермічна, тому адіабатичне підвищення температури, пов'язане з ходом реакції, є досить високим. Для збільшення виходу метану необхідно знизити температуру процесу метанування за рахунок зменшення адіабатного нагрівання компонентів реакції, а також збільшити тиск у реакторі. Адіабатний реактор з нерухомим шаром каталізатора будучи найпростішим (і тому найдешевшим у виконанні) є неоптимальним щодо своєї продуктивності. Для досягнення цільової продуктивності можна застосовувати кілька послідовно з'єднаних адіабатичних реакторів з проміжним охолодженням газу перед кожним наступним каталітичним реактором. Альтернативою вказаному

способу зниження робочої температури є різноманітні схеми відведення реакційної теплоти, а саме застосування реакторів з фіксованим (нерухомим) шаром, з псевдозрідженим чи киплячим шаром, трифазних та структурованих реакторів.

У схемі біологічного метанування *ex situ* можуть використовуватись реактори різної конструкції: з безперервним перемішуванням, реактори зі струменевим шаром, мембранні реактори (мембрани з пористим волокном), реактори з фіксованою біоплівкою [13]. Нині найбільшу швидкість генерування метану забезпечують реактори з безперервним перемішуванням. Швидкість метаноутворення залежить від об'ємного коефіцієнта газорідинного масообміну, який можна регулювати змінюючи швидкість перемішування, рециркуляцію газу та за рахунок удосконалення пристроїв для його дифузії.

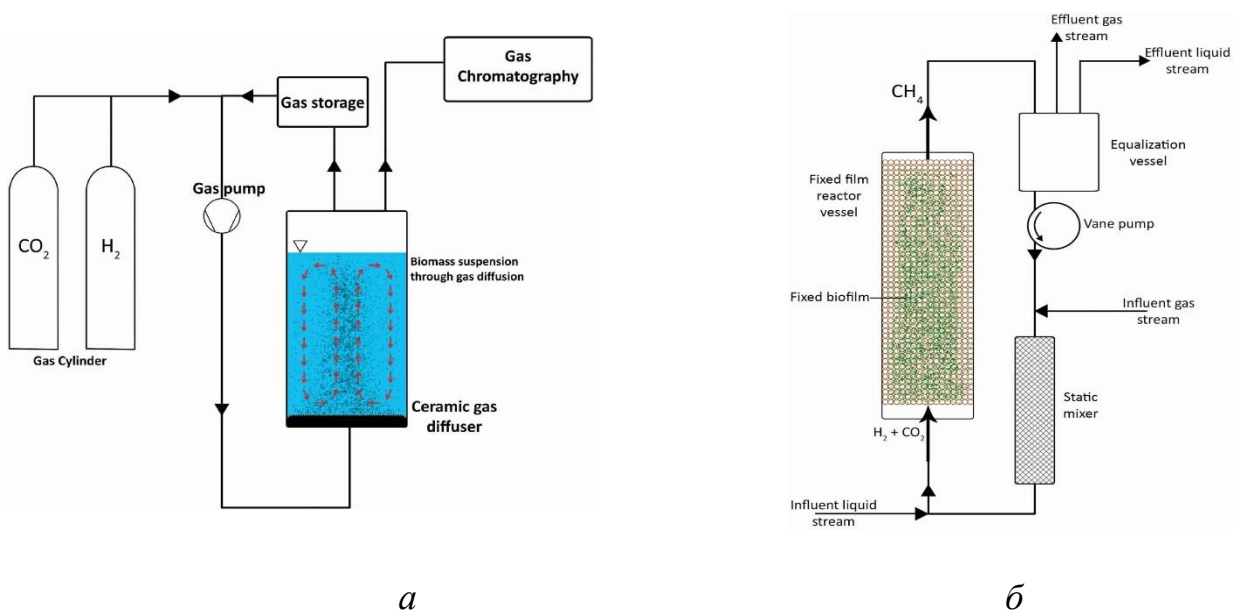


Рис.4. Реактори для біометанування [13]:

а – модифікований CSTR з керамічним газовим дифуззором; *б* – реактор з фіксованою плівкою/анаеробним фільтром

На рис.4 показані приклади реакторів для біометанування. Зокрема, модифікований CSTR (Continuous stirred-tank reactor - Реактор безперервної дії з мішалкою) з керамічним газовим дифуззором, в якому механізм перемішування був замінений керамічним газовим дифуззором, що закриває основу реактора. Також показано реактор з фіксованою плівкою/анаеробним фільтром. Біореактори з

фіксованою плівкою влаштовані таким чином, що мікробні популяції прикріплюються до пакувального матеріалу всередині реактора, тому досягається максимальна площа поверхні. Метою цього є забезпечення максимальної взаємодії рідини та газу. Газ дифундує з дна реактора та проходить через шар нерухомої плівки упаковки. Рідини рециркулюють і впорскуються в нижню частину реактора, а потім просочуються вгору через пакувальну плівку за допомогою газового потоку, що входить, забезпечуючи археї поживними речовинами.

4. Перспективні технології метанування для умов України

Як показали результати огляду технологій метанування для виробництва синтетичного відновлюваного метану, найбільший інтерес для України становлять технології, пов'язані з біоенергетичним напрямом розвитку відновлюваної енергетики, широким впровадженням біометанових технологій, а також з використанням існуючих в країні біоресурсів. Тобто застосування технологій саме біологічного метанування для виробництва синтетичного відновлюваного метану є перспективним напрямом для України.

Порівнюючи дві описані концепції біометанування можна зробити висновок, що концепція *in situ* є більш дешевою і простішою у виконанні, ніж концепція *ex situ*, але поки що значно складнішою у реалізації процесу метанування. Це пов'язано з відмінностями оптимальних умов протікання процесів анаеробного зброджування і біологічного метанування в одному метантенку.

Застосування концепції *ex situ* потребує подальшого удосконалення та оптимізації реакторів для виробництва синтетичного відновлюваного метану, зокрема, за рахунок використання дифузійних технологій.

Висновки і перспективи. У статті представлено узагальнене дослідження застосування технологій метанування для виробництва синтетичного відновлюваного метану. На основі огляду результатів цих досліджень зроблено висновки щодо перспективності застосування технологій біометанування для умов України.

Хоча в даний час потенціал біометанування все ще недостатньо виражений, потрібні подальші зусилля для його застосування в промислових масштабах.

Враховуючи характеристики процесу, для досягнення високої продуктивності слід застосовувати мезофільні та низькотемпературні процеси, що вимагають меншої кількості теплової енергії. Крім того, використання змішаних метаногенних консорціумів, які вимагають менш суворих умов і здатних рости в рідких відходах різних промислових процесів (тобто осад стічних вод, сироватка та стічні води), може додатково знизити витрати на процес, підвищуючи ринкову конкурентоспроможність біометанування. Нарешті, враховуючи екзергонічний характер процесу біометанування, енергія, що вивільняється у вигляді тепла, може бути відновлена та повторно використана для підтримки енергетичних потреб процесу або генерації H_2 . Застосування всіх вищеперерахованих заходів в перспективі дозволить зробити промислове виробництво синтетичного відновлюваного метану рентабельним.

Список використаних джерел

1. Geletukha G., Kucheruk P., Matveev Yu. Prospects and potential for biomethane production in Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*. 2022. Vol. 23. Issue 4. P.67–80 <http://www.ecoeet.com/Prospects-and-Potential-for-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>
2. 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. Vol. 85. P. 1371-1390 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>
3. Bailera M., Lisbona P., Romeo L.M., Espatolero S. Power to Gas Projects Review: Lab, Pilot and Demo Plants for Storing Renewable Energy and CO_2 . *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017. Vol.69. P.292–312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.130>
4. Thema M., Bauer F., Sterner M. Power-to-Gas: Electrolysis and Methanation Status Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019. Vol. 112. P. 775–787. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.030>
5. Клименко В.М., Супрун 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>
6. 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), P.41–45. <https://doi.org/10.31489/2023No2/41-45>
7. Chung Hong Tan, Saifuddin Nomanbhay, Abd Halim Shamsuddin, Young-Kwon Park, H. Hernandez-Cocoletzi, Pau Loke Sho. Current Developments in Catalytic Methanation of Carbon Dioxide – A Review. *Front. Energy Res.* 2022. Vol. 9. P.795423. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.795423>

8. Janke C., Duyar M.S., Hoskins M., Farrauto R. Catalytic and adsorption studies for the hydrogenation of CO₂ to methane, *Appl. Catal. B Environ.* 2014. Vol.152-153. P. 184-191, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.01.016>
9. Проект HELMETH URL: <http://www.helmeth.eu/index.php/project>
10. 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. Vol. 15(11). P. 4064. <https://doi.org/10.3390/en15114064>
11. Bassani I., Kougias P.G., Angelidaki I. In-Situ Biogas Upgrading in Thermophilic Granular UASB Reactor: Key Factors Affecting the Hydrogen Mass Transfer Rate. *Bioresour. Technol.* 2016. Vol. 221. P. 485–491. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.083>
12. Kougias P.G., Treu L., Benavente D.P., Boe K., Campanaro S., Angelidaki I. Ex-Situ Biogas Upgrading and Enhancement in Different Reactor Systems. *Bioresour. Technol.* 2017. Vol. 225. P. 429–437 <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.124>
13. Rusmanis Davis, O'Shea Richard, Wall David M., Murphy Jerry D. Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency. *Bioengineered*. 2019. Vol. 10. P.604-634 <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1684607>
14. Voelklein M.A., Rusmanis Davis, Murphy J.D. Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion. *Appl. Energy*. 2019. Vol. 235. P. 1061-1071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.006>
15. Strobel Gion, Hagemann Birger, Huppertz Thiago Martins, Ganzer Leonhard. Underground bio-methanation: Concept and potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol.123. P.109747. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109747>

References

1. Geletukha, G., Kucheruk, P., Matveev, Yu. (2022). Prospects and potential for biomethane production in Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23 (4), 67–80. <http://www.ecoet.com/Prospects-and-Potential-for-Biomethane-Production-in-Ukraine,149995,0,2.html>
2. Gotz, M., Lefebvre, J., Mors, F. et al. (2016). Renewable power-to-gas: A technological and economic review. *Renewable Energy*, 85, 1371-1390. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.066>
3. Bailera, M., Lisbona, P., Romeo, L.M. et al. (2017). Power to Gas Projects Review: Lab, Pilot and Demo Plants for Storing Renewable Energy and CO₂. *Renew. Sustain. Energy Rev*, 69, 292–312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.130>
4. Thema, M., Bauer, F., Sterner, M. (2019). Power-to-Gas: Electrolysis and Methanation Status Review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 112, 775–787. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.030>
5. Klimenko V.M., Suprun T.T. (2022) Tekhnolohiyi metanatsiyi dlya otrymannya syntetychnoho vidnovlyuvanoho metanu [Methanation technologies for producing synthetic renewable methane]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 44 (3), 63-72. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2022.6>

6. Klimenko, V.N., Suprun, T.T. (2023). Analysis of synthetic renewable methane production technologies for implementation in Ukraine. Eurasian Physical Technical Journal, 20 (2(44)), 41–45. <https://doi.org/10.31489/2023No2/41-45>
7. Chung Hong, Tan, Saifuddin, Nomanbhay, Abd Halim, Shamsuddin, *et al.* (2022). Current Developments in Catalytic Methanation of Carbon Dioxide – A Review. Front. Energy Res., 9, 795423. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.795423>
8. Janke, C., Duyar, M.S., Hoskins, M. *et al.* (2014). Catalytic and adsorption studies for the hydrogenation of CO₂ to methane, Appl. Catal. B Environ., 152-153, 184-191, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.01.016>
9. Project HELMETH Available at: <http://www.helmeth.eu/index.php/project>
10. Bellini, R., Bassani, I., Vizzarro, A. *et al.* (2022). Biological Aspects, Advancements and Techno-Economical Evaluation of Biological Methanation for the Recycling and Valorization of CO₂. Energies, 15(11), 4064. <https://doi.org/10.3390/en15114064>
11. Bassani, I., Kougiyas, P.G., Angelidaki, I. (2016). In-Situ Biogas Upgrading in Thermophilic Granular UASB Reactor: Key Factors Affecting the Hydrogen Mass Transfer Rate. Bioresour. Technol., 221, 485–491. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.09.083>
12. Kougiyas, P.G., Treu, L., Benavente, D.P. *et al.* (2017). Ex-Situ Biogas Upgrading and Enhancement in Different Reactor Systems. Bioresour. Technol, 225, 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.11.124>
13. Rusmanis, Davis, O'Shea, Richard, Wall, *et al.* (2019). Biological hydrogen methanation systems – an overview of design and efficiency. *Bioengineered*, 10, 604-634. <https://doi.org/10.1080/21655979.2019.1684607>
14. Voelklein, M.A., Rusmanis, Davis, Murphy, J.D. (2019). Biological methanation: Strategies for in-situ and ex-situ upgrading in anaerobic digestion. Appl. Energy, 235, 1061-1071. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.006>
15. Strobel, Gion, Hagemann, Birger, Huppertz Thiago, Martins. *et al.* (2020). Underground bio-methanation: Concept and potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 123, 109747. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109747>

Prospects for the application of methanation technologies for the production of synthetic renewable methane in Ukraine

T. Suprun

Abstract. *It is known that one of the most important and urgent problems of modern world energy has become the search and development of renewable energy sources as alternatives to traditional fossil fuels.*

Methanation, that is, the reaction of the transformation of carbon dioxide and hydrogen to produce synthetic renewable methane, is one of the areas of search and development of alternative energy sources as a substitute for scarce natural gas.

The object of this study is synthetic renewable methane, as well as features of methanation technologies for its production.

The purpose of the work is to review global experience in the development of methanation technologies for the production of synthetic renewable methane and to identify promising ways to introduce these technologies in Ukraine.

Research methods include the study and analysis of literature and other data, in particular the results of the implementation of methanation projects.

As studies have shown, methanation technologies with only renewable components are especially interesting for the conditions of Ukraine. It is these technologies that are analyzed in the article.

The paper examines the technological possibilities of using catalytic and biological methanation methods for the effective use of renewable solar and wind electricity to generate hydrogen by electrolysis of water, as well as carbon dioxide of organic origin for the production of synthetic renewable methane.

The technology of biological methanation is considered in most detail as a promising direction for introducing methanation technologies in Ukraine for the production of synthetic renewable methane. Aspects related to modern technologies, such as in situ, ex situ, are analyzed. The features of the concept of underground methanation, which is one of the areas of biological methanation, are shown.

The work examines various designs of reactors for catalytic and biological methanation, and notes their advantages and disadvantages.

Some measures that will make industrial production of synthetic renewable methane based on methanation technology profitable in the future are indicated.

Key words: *synthetic renewable methane, methanation technologies, renewable energy sources*