

УДК 662.767

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ БІОМЕТАНУВАННЯ IN-SITU НА ЗБІЛЬШЕННЯ ВИРОБНИЦТВА БІОМЕТАНУ В КЛАСИЧНИХ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВКАХ

Домбровський О.Г.¹, канд. екон. наук, Тракслер І.С.², канд. техн. наук, Потапова М.В.³, канд. техн. наук¹ПрАТ «МХП Еко Енерджі», директор, e-mail: a.dombrovskiy@mhp.com.ua²Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України, старший науковий співробітник, e-mail: traksler@ukr.net, ORCID: 0009-0006-6485-3514³ПрАТ «МХП ЕкоЕнерджі», консультант, maryana.potapova2@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9689-3912<https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2025.11>

У статті досліджується та аналізується вплив процесу біометанування водню in-situ на підвищення виробництва метану в класичних біогазових установках. Розглянуто механізми гідрогенотрофного метаногенезу, гомоацетогенезу та ацетокластичного метаногенезу, які забезпечують біоконверсію CO₂ і H₂ у метан; вплив різних параметрів (температура, парціальний тиск водню, співвідношення CO₂ / H₂) на біохімічні шляхи перетворення CO₂ і H₂ у метан, а також на різноманітність та домінування різних груп бактерій в анаеробних реакторах. Впровадження технологій біометанування водню in-situ підтримує принципи циркулярної економіки та сприяє сталому розвитку. Подальші дослідження сприятимуть оптимізації даних технологій їх широкій інтеграції в діючі біогазові установки.

The article investigates and analyzes the impact of the in-situ hydrogen biomethanation process on increasing methane production in classical biogas plants. The mechanisms of hydrogenotrophic methanogenesis, homoacetogenesis and acetoclastic methanogenesis, which ensure the bioconversion of CO₂ and H₂ into methane, are considered; the influence of various parameters (temperature, hydrogen partial pressure, CO₂/H₂ ratio) on the biochemical pathways of CO₂ and H₂ conversion into methane, as well as on the diversity and dominance of different groups of bacteria in anaerobic reactors. The implementation of in-situ hydrogen biomethanation technologies supports the principles of a circular economy and promotes sustainable development. Further research will contribute to the optimization of these technologies and their broad integration into operating biogas plants.

Бібл. 22, рис. 2.

Ключові слова: біометанування водню in-situ, гідрогенотрофний метаногенез, гомоацетогенез, співвідношення CO₂ / H₂, парціальний тиск водню.

1 Анаеробне зброджування та важливість очищення біогазу для ефективного використання

Анаеробне зброджування — це біохімічний процес, під час якого органічна речовина розкладається з утворенням біогазу через чотири послідовні стадії: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез. Біогаз, що утворюється, має теплотворну здатність 20–25 МДж/м³ завдяки вмісту метану і є важливим джерелом відновлюваної енергії. Технологія анаеробного зброджування (АЗ) широко застосовується для переробки органічних відходів і виробництва біоенергії. У зв'язку з проблемами нестачі енергії та забрудненням навколишнього середовища, що викликане використанням викопного палива, біогазова промисловість швидко розвивається [1]. У 2023 році виробництво біогазу в Європі склало приблизно 17,1 млрд м³, а потужність виробництва електроенергії з біогазових установок у світі досягла приблизно 25 ГВт у 2022 році. Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) повідомило про збільшення потужності на 3,4 ГВт (приблизно на 16%) з 2021 по

2022 рік. Європа, Китай і США є провідними регіонами з виробництва електроенергії з біогазу, причому на Європу припадає близько 70% світового виробництва [1, 2].

Європейський Союз поставив амбітну мету: до 2030 року виробляти 35 мільярдів кубометрів біометану щорічно в рамках плану REPowerEU [3].

Однак, для досягнення цього обсягу виникає питання забезпечення достатньої кількості органічної сировини для анаеробного зброджування. Одним із перспективних рішень є використання водню в процесі біотрансформації CO₂ та H₂ до метану [4].

В процесі анаеробного зброджування зазвичай використовують органічні відходи, такі як сільськогосподарські рештки, гній та харчові відходи. Проте, для досягнення цілі в 35 млрд кубометрів біометану, наявних ресурсів може бути недостатньо. За оцінками, у ЄС-27 є потенціал виробництва біометану до 41 млрд кубометрів до 2030 року, але це вимагає максимально ефективного використання всіх доступних ресурсів [5, 6].

Інтеграція водню в процес виробництва біометану може стати вирішенням проблеми дефіциту сировини. Процес метанування CO_2 за допомогою водню дозволяє перетворювати вуглекислий газ та водень на метан і воду. Це не лише підвищує вихід метану, але й сприяє зменшенню викидів CO_2 , що є важливим для досягнення кліматичних цілей.

Переваги технології:

- ефективність: додавання водню до процесу зброджування може збільшити виробництво метану без потреби в додатковій органічній сировині;
- сталий розвиток: використання відновлюваного водню в поєднанні з CO_2 сприяє циркулярній економіці та зменшенню парникових викидів;
- енергетична безпека: збільшення виробництва біометану з використанням водню може зменшити залежність від імпорту викопного палива.

Незважаючи на переваги, впровадження цієї технології потребує значних інвестицій та розвитку інфраструктури для виробництва та транспортування водню. Крім того, необхідно розробити нормативну базу та стандарти для інтеграції таких технологій в існуючі енергетичні системи [7].

Європейський Союз значно інвестує в розвиток технологій метанування в рамках програми Horizon 2020. Одним з прикладів є проєкт Biomethaverse спрямований на вдосконалення трансформації CO_2 та H_2 в метан і підвищення ефективності анаеробного зброджування. Інвестиції ЄС сприяють зміцненню енергетичної безпеки, зменшенню залежності від викопного палива та переходу до відновлюваної енергії [3].

Використання водню для біотрансформації CO_2 в метан є перспективним напрямом для досягнення цілей ЄС щодо виробництва біометану до 2030 року. Ця технологія може стати ключовим елементом у забезпеченні енергетичної безпеки та сталого розвитку, проте вимагає координації зусиль науковців, промисловості та урядів для її успішного впровадження.

2 Біометанування водню in-situ

Сьогодні для біологічного метанування застосовуються два основні підходи: метанування in-situ (введення H_2 безпосередньо в анаеробний реактор) та метанування ex-situ (здійснюється у спеціальному реакторі, який містить збагачені культури гідрогенотрофних метаногенів, куди вводять H_2 і CO_2 або H_2 та біогаз). In-situ метанування потребує менших інвестиційних витрат і може бути інтегроване у вже існуючі біогазові установки. Найпоширенішою конфігурацією реакторів для переробки промислових, побутових і міських відходів із

застосуванням in-situ технології біометанування є реактори безперервного перемішування (CSTR) [8, 9, 10, 11].

Крім збільшення концентрації метану в біогазі процес біометанування може стимулювати збільшення продуктивності вироблення метану.

Основні недоліки системи in situ є:

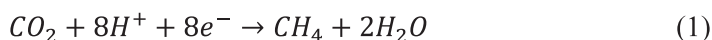
- накопичення проміжних продуктів за рахунок підвищеного парціального тиску H_2 (p_{H_2})
- підвищення рН через прогресуюче виснаження ендogenous розчиненого CO_2
- низька розчинність водню, яка може обмежувати однорідний та ефективний розподіл газу в рідкій фазі [9].

Виробництво CH_4 , що стимулюється введенням водню, тісно пов'язане з механізмами споживання H_2 в процесі анаеробного зброджування (АЗ). Цей процес складається з чотирьох основних стадій: гідроліз, кислотогенез, ацетогенез та метаногенез. На перших трьох етапах утворюються H_2 і CO_2 , а також накопичується ацетат. Завершальна стадія, метаногенез, забезпечує синтез CH_4 із H_2 і CO_2 через два основні шляхи за участі трьох груп мікроорганізмів (рис. 1):

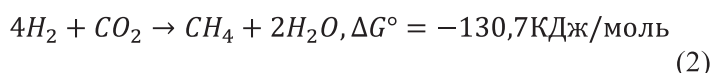
- гідрогенотрофних метаногенів (ГМ, Етап I);
- ацетокластичних метаногенів (АМ, Етап III), асоційованих із гомоацетогенами (ГА, Етап II) [12, 13].

Тобто якщо розглядати in situ біоконверсію CO_2 в CH_4 за рахунок лише наявної мікробіоти в реакторі, то існують такі шляхи біоперетворення: прямий гідрогенотрофний метаногенез, непрямий шлях через утворення гомоацетогенного ацетату з подальшим ацетокластичним метаногенезом, форміатний цикл та шлях прямого переносу електронів (ППЕ) [1].

Шлях ППЕ відбувається на біокатоді мікробної електрохімічної системи через так званий електрометаногенний процес, у якому метаногени отримують електрони безпосередньо з біокатода через фізичний контакт з електродом (рівняння 1) [1].



Пряме перетворення вуглекислого газу в метан здійснюється гідрогенотрофними метаногенами, які використовують 4 моля H_2 як донор електронів і 1 моль CO_2 як джерело вуглецю та акцептор електронів для отримання 1 молю CH_4 через так званий цикл Вульфа (рис. 2 А), який спрощено можна записати через реакцію Сабатьє (рівняння 2). Цей механізм є найбільш вивченим шляхом in-situ модернізації біогазу [1, 8, 14].



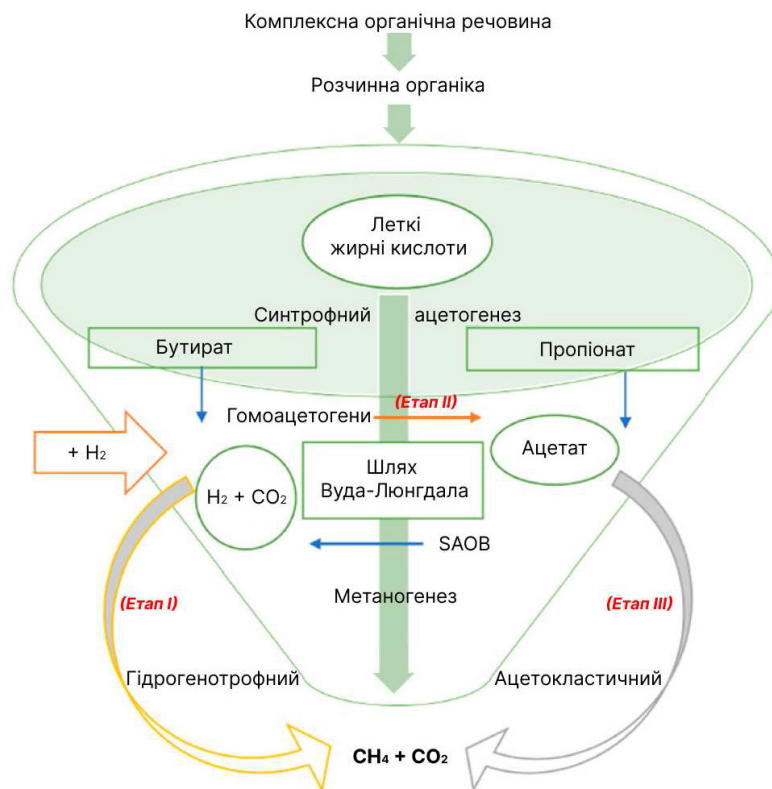


Рис. 1. Етапи анаеробного зброджування: метаболічні шляхи метаногенезу за участю водню [12, 13]

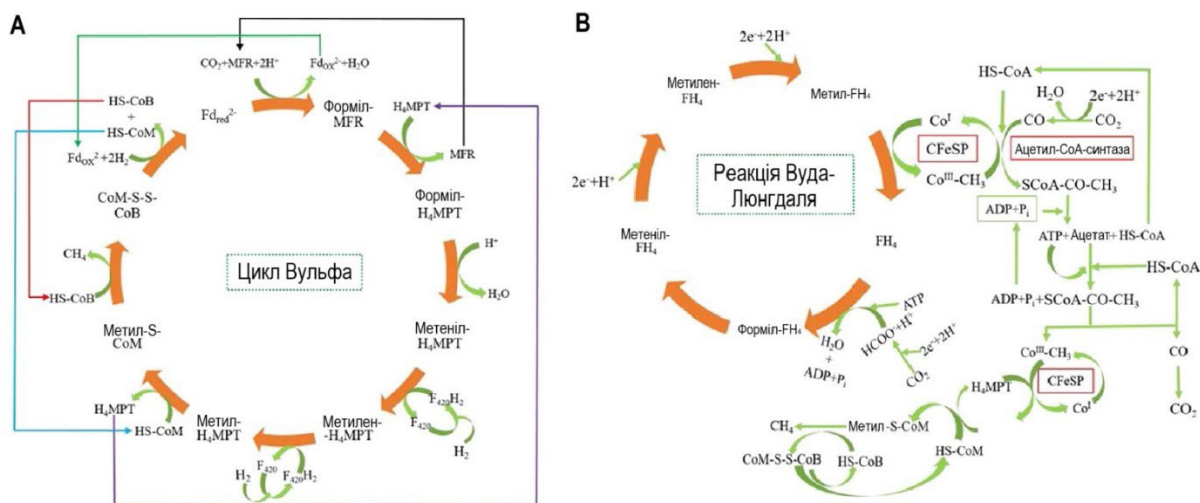


Рис. 2. (А) Цикл Вульфа відновлення CO_2 до CH_4 (В) Реакція Вуда-Льонгдала виробництва гомоацетогенного ацетату та розщеплення ацетату до CH_4 та CO_2 [1]



H_2 відіграє ключову роль у всьому процесі анаеробного зброджування. Екзогенне додавання H_2 призводить до зростання популяції як гідрогенотрофних метаногенів, так і гомоацетогенів, які утворюють оцтову кислоту з H_2 та CO_2 [13].

Однак недоліком додавання H_2 у процес АЗ є інгібування синтрофних ацетогенів, які беруть участь у деградації пропіонату та бутирату, а також синтрофних ацетатокислювальних бактерій (SAOB – syntrophic acetate-oxidizing bacteria). Важливо контролювати концентрацію H_2 для забезпечення рівноваги біохімічних реакцій (рис. 1.) [12, 13].

З біохімічної точки зору, непрямий шлях біоконверсії CO_2 в CH_4 (етапи гомоацетогенезу та ацетокластичного метаногенезу) потребує більше енергії, ніж гідрогенотрофний метаногенез, через синергію гомоацетогенів та ацетокластичних метаногенів, для підтримання клітинного метаболізму та зростання клітин. У результаті майже весь H_2 , утворений на етапі ацетогенезу, перетворюється на CH_4 через етап І (гідрогенотрофний метаногенез).

Дослідження демонструють, що додавання екзогенного CO_2 може суттєво змінити шляхи перетворення ацетату на CH_4 . Оскільки як CO_2 , так і H_2 є проміжними продуктами у виробництві CH_4 , введення H_2 потенційно може впливати на подальші шляхи утворення CH_4 , що відкриває велике поле для досліджень [12, 15].

У [9, 12] зазначається, що приблизно 40% поданого H_2 зазвичай споживається через процеси гомоацетогенезу та ацетокластичного метаногенезу.

Збагачення оцтової кислоти та метану ізотопом ^{13}C показало, що $61 \pm 3\%$ спожитого водню перетворювалося гомоацетогенами за концентрації CO_2 менше 7%. За цих умов спостерігалось підвищення рН до 8,33, що інгібувало ацетокластичних метаногенів і сприяло гомоацетогенезу. Підвищений тиск водню (>10 кПа) також інгібував активність метаногенів, тоді як за концентрації CO_2 понад 25% і тиску H_2 менше 10 кПа активність ацетокластичних метаногенів відновлювалася [16].

Ендогенний H_2 , утворений ацидогенними чи ацетогенними бактеріями, споживається гомоацетогенами або гідрогенотрофними метаногенами, підтримуючи низький парціальний тиск H_2 . Надмірний H_2 (>10 кПа) пригнічує гідролітичну та ферментативну активність у процесі АЗ. Проте цей ефект нівелюється завдяки розмноженню гідрогенотрофних бактерій, особливо за додавання CO_2 , що стимулює утилізацію H_2 та формування синтрофних зв'язків між ферментативними бактеріями та метаногенами [15].

ГМ мають обмежену здатність споживати H_2 . Навіть за конкуренції з ГА, споживання водню гідрогенотрофними метаногенами обмежене його кількістю в реакторі, тому інгібування шляхів споживання водню гомоацетогенами не є неефективним [12].

Біологічне виробництво H_2 у процесі АЗ не є стійким шляхом з огляду на ефективність енергетичної

рекуперації. Більше того, біологічне виробництво H_2 у процесі АЗ складно контролювати. З цієї точки зору, природна еволюція процесу АЗ до утворення CH_4 має бути переосмислена. У зв'язку з цим необхідно досліджувати екзогенні методи, зокрема подачу H_2 та CO_2 , для підвищення продуктивності утворення CH_4 [1, 12].

3 Вплив основних параметрів на біохімію процесу біометанування

На гідрогенотрофний, ацетокластичний метаногенез, гомоацетогенез, синтрофні взаємодії між різними групами метаногенів впливають і регулюють багато факторів, включаючи парціальний тиск H_2 , температуру, співвідношення CO_2 / H_2 , концентрація амонійного азоту та інші робочі параметри реактора. Ці всі параметри потребують ґрунтовних досліджень для можливості керування та оптимізації процесу біометанування водню.

3.1 Співвідношення CO_2 / H_2

Відповідно до реакції біометанування (рівняння 1), водень слід вводити в молярному співвідношенні 4 з бажаним споживанням вуглекислого газу. Однак точна оцінка потреби у водні вимагає оновлених сучасних знань про фонове виробництво вуглекислого газу, яке неможливо спостерігати безпосередньо, також подача водню в діючий анаеробний реактор може змінити продуктивність метаногенезу [17].

Водень використовується не тільки для метаногенезу, а й для росту клітин гідрогенотрофних архей отже, співвідношення CO_2 / H_2 , яке зазвичай використовується в in-situ та ex-situ технологіях біометанування, 1 / 4 недостатнє для повного перетворення водню та вуглекислого газу на метан, якщо таке завдання ставиться [15].

Для вивчення впливу подачі водню до працюючого анаеробного реактора на ланцюг органічного розпаду, у дослідженні [9] запропонували новий підхід, реалізований у напівперіодичних біореакторах, що полягає у поступовому збільшенні дози H_2 для акліматизації та розвитку спеціалізованої біомаси. В літературі є інші дослідження, які зосереджуються на покращенні якості біогазу в процесі АЗ осаду стічних вод, зокрема на співвідношенні CO_2 / H_2 для оптимізації процесу. Важливо отримати глибші знання про вплив співвідношення CO_2 / H_2 на формування консорціуму бактерій і архей, здатних стабільно максимізувати процес біометанування водню та CO_2 , а також розклад органічних субстратів [9].

Оскільки, як було сказано вище, для споживання 1 молю CO_2 потрібно 4 молі H_2 , то зазвичай в дослідженнях використовують стехіометричне співвідношення CO_2 / H_2 близько до 1 / 4. Хоча в літературі неодноразово згадується, що подача водню в систему ззовні стимулює перебудову біохімічних шляхів перетворення органічної речовини.

Наприклад у дослідженні [18] досягнуто зменшення CO_2 до 39% за допомогою H_2 , що становить 5% об'єму вільного простору, при гідравлічному часу утримання 21 день. Таким чином, для реактора об'ємом 1 літр із припущенням, що вільний простір становить 20%, буде потрібно 10 мл- H_2 /л, що менше, ніж у попередніх дослідженнях.

Проте перед масштабуванням до великого (комерційного) рівня важливо оптимізувати додавання H_2 для ефективного перетворення CO_2 та H_2 на біометан. Цей процес можна максимізувати, наприклад вводячи H_2 на початковому етапі налаштування АЗ органічних відходів [18].

3.2 Парціальний тиск водню

Парціальний тиск H_2 є надзвичайно чутливим фактором у процесі АЗ і зазвичай підтримується на низькому рівні в стабільному класичному процесі метаногенезу. Гідрогенотрофний метаногенез і гомоацетогенез можуть відбуватися лише при високому парціальному тиску H_2 (≥ 500 Па), тоді як синтрофне окислення ацетату з утворенням H_2 і CO_2 відбувається при низькому парціальному тиску H_2 [1, 12, 15, 19].

Тобто непрямий шлях конверсії CO_2 та H_2 в метан є більш сприятливим за високого парціального тиску H_2 , а також лужного рН. Якщо ж синтрофна взаємодія з ацетокластичними метаногенами відсутня, то надлишок водню в системі може потенційно інгібувати процес АЗ. Але за певних умов, ГА можуть випереджати ГМ у споживанні H_2 [8].

Оскільки анаеробні системи працюють близько до термодинамічної рівноваги, зміна концентрацій субстратів може змінити напрям процесів.

Кількість H_2 у системі визначає домінуючий шлях трансформації CO_2 та ацетату, а також вибірковість росту різних мікроорганізмів. Гідрогенотрофні метаногени домінують за низького H_2 , тоді як гомоацетогенні бактерії мають перевагу за високого H_2 . Ці взаємодії важливі для оптимізації біометанування залежно від концентрації H_2 у системі [20].

Введення H_2 у процес АЗ підвищує парціальний тиск H_2 , що впливає на активність мікроорганізмів, зокрема гомоацетогенів та змінює конверсію пропіонату й бутирату на ацетат. У таких умовах гомоацетогенез здатен споживати більшу кількість H_2 , сприяючи виробництву CH_4 через ацетокластичний метаногенез (Етап III, рис. 1). У стабільному АЗ при низькому парціальному тиску H_2 роль ГА у споживанні H_2 (2–5%) та у виробництві CH_4 через АМ є мінімальною. Основну частину H_2 (95–98%) споживають ГМ, які забезпечують близько 28% утворення CH_4 , тоді як 72% походить від АМ [12, 16, 19].

Можна чітко сказати, що здатність до метаногенезу залежить від концентрації H_2 , який є лімітуючим субстратом через низьку розчинність у воді. При високому парціальному тиску H_2 утворюється більше метану.

Ріст гідрогенотрофних метаногенів обмежується кількістю H_2 , що утворюється на етапах гідролізу та ацидогенезу. У процесі in-situ біометанування додавання H_2 може порушити цей баланс, що стимулює ріст ГМ, які споживають CO_2 , що утворюється на попередніх етапах. У результаті вихідний газ збагачується метаном, вміст якого може досягати 80–90% залежно від експериментальних умов.

АМ розкладають ацетат, утворюючи метан і CO_2 . В умовах підвищеного H_2 вони можуть втрачати конкурентну здатність через зсув рівноваги у бік утворення водню та CO_2 .

Синтрофні ацетат-окислювальні бактерії (SAOB) окиснюють ацетат у H_2 і CO_2 , якщо H_2 використовується іншими мікроорганізмами, такими як метаногени. Ці бактерії взаємодіють з гідрогенотрофними метаногенами, які конвертують H_2 і CO_2 безпосередньо в метан утворюючи циклічний метаногенез.

ГА та ГМ конкурують за H_2 і CO_2 . Метаногени зазвичай переважають при низьких концентраціях H_2 через кращу афінність (нижча K_s – константа напівнасичення). ГА можуть переважати при високому H_2 завдяки більшій гнучкості у використанні субстратів.

SAOB та ацетокластичні метаногени також конкурують за ацетат. У in-situ системах вони зазвичай мають близькі значення μ_{max} (максимальна питома швидкість росту) та K_s , що створює сильну конкуренцію [20].

З цього чітко видно, що оптимізація процесу in-situ біометанування вимагає поєднання високої ефективності процесу з підтримкою суворо синтрофних відносин всередині мікробних асоціацій реактора АЗ [8].

3.3 Температура

В термофільних умовах (55–60 °C) в середовищі реактора частіше домінують гідрогенотрофні метаногени, що пояснюється збільшенням швидкості росту з підвищенням температури від 33–35 до 55–60 °C. Відповідно, у мезофільних умовах (33–35 °C) зростає конкуренція між ГА та ГМ, тобто гомоацетогени краще пристосовані до нижчих температур і часто мають конкурентну перевагу [1, 15, 20].

Якщо розглянути три популяції мікроорганізмів: гомоацетогенів, ацетокластичних та гідрогенотрофних метаногенів, температура може бути найважливішим параметром, що впливає на частку певної популяції в консорціумі системи АЗ, оскільки гідрогенотрофні метаногени, здається, є єдиною популяцією, яка споживає H_2 та CO_2 при 55–60 °C.

Ацетокластичні метаногени мають нижчі швидкості росту за температури 35 °С, порівняно з ГМ та ГА. Але в системах анаеробного зброджування, особливо у процесах in-situ біометанування, АМ широко представлені у мікробних консорціумах завдяки етапам ацидогенезу та ацетогенезу, які постачають ацетат [20].

В дослідженні [21] було виявлено, що термофільний гідрогенотрофний метаноген був більш стійким до високих концентрацій аміаку порівняно з мезофільним гідрогенотрофним метаногеном.

За нижчих температур, які є типовими для процесів in-situ метанування, може виникати конкуренція, наприклад, із гомоацетогенами. Ймовірно, саме це є причиною, чому процеси ex-situ метанування забезпечують вищу частку метану в вихідному газі, до 98%, завдяки підвищенню робочої температури порівняно з системами in-situ біометанування [15, 20].

3.4 Амонійний азот

Рівень аміаку може впливати на шлях біоконверсії водню та CO_2 в CH_4 . Перехід від ацетокластичного шляху до гідрогенотрофного відбувався при підвищенні рівня аміаку (з 1 до 7 г $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{л}$) [1]. Тобто якщо порівнювати ацетокластичні метаногени з гідрогенотрофними, то останні були більш толерантними до інгібуючого ефекту аміаку [21].

В дослідженні [21] вихід метану при високій концентрації амонійного азоту в середовищі (7 г $\text{NH}_4^+ / \text{л}$) був на 41,0% та 22,3% нижчим, ніж при низькій концентрації амонійного азоту (1 г $\text{NH}_4^+ / \text{л}$) за мезофільних та термофільних умов відповідно.

При високій концентрації амонійного азоту (7 г $\text{NH}_4^+ / \text{л}$) введення водню призвело до майже дворазового збільшення кількості представників родин *Thermoanaerobacteraceae*, *Ruminococcaceae* та роду *Clostridium*. Ці результати свідчать про те, що додавання водню в реактор сприяє формуванню більш стійкого мікробного співтовариства, здатного протистояти високим концентраціям амонійного азоту порівняно зі звичайними процесами анаеробного зброджування. Результати показали, що процес виробництва та підвищення якості біогазу за допомогою водню може також позитивно впливати на стадії гідролізу та ацидогенезу під час анаеробного зброджування за умов високих концентрацій амонійного азоту.

Варто також зазначити, що ріст бактерій, чутливих до амонійного азоту (наприклад, *Halanaerobiaceae* та *Leucobacter*), був посилений введенням водню. Збільшення росту ГМ можна пояснити підвищеним метаболізмом SAOB за рахунок додаткового введення водню, оскільки гідрогенотрофні метаногени можуть споживати продукти SAOB і долати енергетичні бар'єри [22].

Висновки

1. Проведене дослідження доводить, що біометанування in-situ є ефективним методом підвищення вмісту метану в біогазі, виробленому на класичних біогазових установках.

2. Інтеграція водню в анаеробні процеси забезпечує ефективне перетворення водню та CO_2 на метан за допомогою гідрогенотрофного та непрямого метаногенезу, що сприяє підвищенню виходу біометану без додаткової потреби в органічній сировині.

3. Технології біометанування in-situ гарантують скорочення викидів CO_2 і забезпечує досягнення кліматичних цілей за рахунок використання відновлюваного водню та його інтеграції в існуючі системи виробництва біогазу.

4. Основними визначальними факторами ефективності процесу біометанування in-situ є:

- контроль парціального тиску водню;
- підтримка оптимального співвідношення H_2 і CO_2 ;
- уникнення інгібуючої дії на синтрофні бактерії та ацетокластичні метаногени.

5. Процес біометанування in-situ знижує капітальні витрати, усуваючи потребу в окремих реакторах для метанування, таким чином роблячи цю технологію доступною для встановлення на промислових і комунальних біогазових установках.

6. Подальші дослідження мають бути зосереджені на оптимізації параметрів процесу біометанування in-situ, включаючи розподіл водню в реакторі, модифікацію складу мікробного консорціуму та вплив високих концентрацій H_2 і CO_2 на стабільність анаеробного зброджування.

Отримані результати сприяють розробці сталих біогазових технологій, які відповідають сучасним вимогам до екологічної та енергетичної безпеки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Fu, S., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2020). In situ Biogas Upgrading by CO_2 -to- CH_4 Bioconversion. Trends in Biotechnology, 39(4), 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006>
2. Incorrrys Inc. (2023, September 19). Biogas power generation capacity 2010-2022. Data, Intelligence, and Forecasts for New Energy, Environment, and New Technology. <https://incorrrys.com/power-generationbiogas-power-generation/biogas-power-generation-capacity-2010-2022/>

3. Тракслер І.С. & Потапова М.В. (2024). Огляд технологій трансформації зеленого водню для підвищення виробництва біометану на діючих заводах України та Європи. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(4), 91-100. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10>
4. Гелету́ха Г.Г., Гивель М.М. & Кучерук П.П. (2024). Можливості виробництва передового біометану з мікроводоростей, вирощених на дигестаті біогазових установок. Частина 1. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46(4), 60-73. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7>
5. Нове дослідження Gas for Climate | Потенціал виробництва біометану в ЄС | 2022. (n.d.). <https://uabio.org/materials/13559/>
6. Гелету́ха Г., Желізна Т., Кучерук П. & Драгнєв С. (2023). Аналіз перспективних напрямків використання енергетичного потенціалу біомаси України. *Теплофізика та теплоенергетика*, 49(2), 77-86 <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9>
7. *EBA Statistical Report 2023* | European Biogas Association. (n.d.). <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>
8. Lembo, G., Rosa, S., Marone, A., & Signorini, A. (2023). In situ biogas upgrading in a randomly packed Gas-Stirred Tank reactor (GSTR). *Energies*, 16(7), 3296. <https://doi.org/10.3390/en16073296>
9. Corbellini, V., Feng, C., Bellucci, M., Catenacci, A., Stella, T., Espinoza-Tofalos, A., & Malpei, F. (2021). Performance Analysis and Microbial Community Evolution of In Situ Biological Biogas Upgrading with Increasing H₂/CO₂ Ratio. *Archaea*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/8894455>
10. Крамар В. Технології збагачення біогазу та їх характеристики. (2023). *Теплофізика та теплоенергетика*, 48 (1), 64–74. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8>
11. Домбровський О. Г., Тракслер І. С., & Потапова М. В. Біометанування водню in-situ: оптимізація виробництва біометану та очищення біогазу від CO₂. (2024). *Відновлювана Енергетика*, 3, 140–144. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\)140-144](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)140-144)
12. Liu, R., Hao, X., & Wei, J. (2015). Function of homoacetogenesis on the heterotrophic methane production with exogenous H₂/CO₂ involved. *Chemical Engineering Journal*, 284, 1196–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.081>
13. Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Chew, K. W., & Show, P. L. (2019). Technologies for Biogas upgrading to Biomethane: a review. *Bioengineering*, 6(4), 92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>
14. Zhao, J., Li, Y., & Dong, R. (2021). Recent progress towards in-situ biogas upgrading technologies. *The Science of the Total Environment*, 800, 149667. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149667>
15. Zhu, X., Zhou, P., Chen, Y., Liu, X., & Li, D. (2020). The role of endogenous and exogenous hydrogen in the microbiology of biogas production systems. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(6). <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02856-9>
16. Agneessens, L. M., Ottosen, L. D. M., Andersen, M., Olesen, C. B., Feilberg, A., & Kofoed, M. V. W. (2018). Parameters affecting acetate concentrations during in-situ biological hydrogen methanation. *Bioresource Technology*, 258, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.102>
17. Poggio, D., Sastraatmaja, A., Walker, M., Michailos, S., Nimmo, W., & Pourkashanian, M. (2023). Experimental evaluation of continuous In-Situ biomethanation of CO₂ in anaerobic digesters fed on sewage sludge and food waste and the influence of hydrogen Gas–Liquid mass transfer. *Processes*, 11(2), 604. <https://doi.org/10.3390/pr11020604>
18. Okoro-Shekwaga, C. K., Ross, A., & Camargo-Valero, M. A. (2021). Enhancing bioenergy production from food waste by in situ biomethanation: Effect of the hydrogen injection point. *Food and Energy Security*, 10(3). <https://doi.org/10.1002/fes3.288>
19. Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., & Angelidaki, I. (2022). H₂ competition between homoacetogenic bacteria and methanogenic archaea during biomethanation from a combined experimental-modelling approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107281. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107281>
20. Raftafi, Y., Laguillaumie, L., & Dumas, C. (2020). Biological Methanation of H₂ and CO₂ with Mixed Cultures: Current Advances, Hurdles and Challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 12(10), 5259–5282. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01283-z>
21. Wang, H. (2016). Optimization of biomethanation focusing on high ammonia loaded processes. Welcome to DTU Research Database. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/optimization-of-biomethanation-focusing-on-high-ammonia-loaded-pr>
22. Wang, H., Zhu, X., Yan, Q., Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2019). Microbial community response to ammonia levels in hydrogen assisted biogas production and upgrading process. *Bioresource Technology*, 296, 122276. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122276>

RESEARCH ON THE IMPACT OF THE IN-SITU BIOMETHANIZATION PROCESS ON INCREASING BIOMETHANE PRODUCTION IN CLASSIC BIOGAS PLANTS

Dombrovskiy O.G.¹, PhD in Economics, **Traksler I.S.**², PhD in Technical Sciences, **Potapova M.V.**³, PhD in Technical Sciences

¹PrJSC "MHP Eco Energy", Director, e-mail: a.dombrovskiy@mhp.com.ua

²Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Senior Researcher, e-mail: traksler@ukr.net, ORCID: 0009-0006-6485-3514

³PrJSC "MHP Eco Energy", Consultant, maryana.potapova2@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9689-3912

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2025.11>

Objective: The study explores integrating in-situ hydrogen biomethanation into traditional biogas plants to enhance methane production. It aims to analyze biochemical mechanisms, assess the impact of operational parameters, and evaluate the feasibility of this technology for sustainable energy.

Tasks:

1. Investigate biochemical pathways—hydrogenotrophic methanogenesis, homoacetogenesis, and acetoclastic methanogenesis—for converting CO₂ and H₂ into methane.
2. Examine how parameters such as temperature, hydrogen partial pressure, and the CO₂ / H₂ ratio influence methane production and microbial diversity.
3. Assessing the potential of in-situ biomethanation as a cost-effective and sustainable technology aligned with circular economy principles.

Methods:The research employed a comprehensive literature review to evaluate the integration of hydrogen biomethanation into continuous stirred tank reactors (CSTR). Key areas included gas-phase analysis, microbial dynamics, and thermodynamic modeling to evaluate methane production pathways and constraints.

Results: In-situ hydrogen biomethanation effectively enhances methane yields by leveraging hydrogenotrophic methanogens and homoacetogens. Hydrogen introduction facilitates CO₂ and H₂ conversion into methane via hydrogenotrophic pathways, with indirect contributions from homoacetogenic and acetoclastic processes.

Key findings include:

- **Parameter Optimization:** The CO₂ / H₂ ratio near 1:4 maximizes conversion rates.
- **Microbial Interactions:** High hydrogen levels support hydrogenotrophic methanogens but can inhibit syntrophic acetate oxidation, requiring precise control of hydrogen pressure.
- **Technology Integration:** In-situ biomethanation adapts to existing biogas plants with minimal changes, reducing organic feedstock reliance and improving biogas quality.

Conclusion

In-situ hydrogen biomethanation emerges as a promising technology for improving methane production in biogas plants while supporting renewable energy goals. Its integration aligns with the European Union's ambition to achieve 35 billion cubic meters of biomethane production annually by 2030. However, challenges such as hydrogen solubility limitations and the need for controlled operational conditions require further investigation. Continued research will focus on optimizing reactor configurations and scaling the technology for broader application.

References 22, Figures: 2.

Key words: In-situ hydrogen biomethanation, hydrogenotrophic methanogenesis, homoacetogenesis, CO₂ / H₂ ratio, anaerobic digestion.

1. Fu, S., Angelidaki, I., & Zhang, Y. (2020). In situ Biogas Upgrading by CO₂-to-CH₄ Bioconversion. *Trends in Biotechnology*, 39(4), 336–347. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2020.08.006>
2. *Incorrys Inc.* (2023, September 19). Biogas power generation capacity 2010-2022. Data, Intelligence, and Forecasts for New Energy, Environment, and New Technology. <https://incorrys.com/power-generation/biogas-power-generation/biogas-power-generation-capacity-2010-2022/>
3. Traksler, I., & Potapova, M. (2024). Review of green hydrogen transformation technologies for increasing biomethane production at existing plants in Ukraine and Europe. *Teplofizika ta teploenergetika*, 46(4), 91–100. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.10> (in Ukr.)
4. Geletukha, G., Hyvel, M., & Kucheruk, P. (2024). Opportunities of advanced biomethane production from microalgae grown on biogas plant digestate. Part 1. *Teplofizika ta teploenergetika*, 46(4), 60–73. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2024.7> (in Ukr.)
5. *New research Gas for Climate | Biomethane production potential in the EU | 2022.* (n.d.). <https://uabio.org/materials/13559/> (in Ukr.)

6. Geletukha, G., Zheliezna, T., Kucheruk, P., & Drahnev, S. (2023). Analysis of prospective directions for using Ukraine's biomass potential for energy. *Teplofizika ta teploenergetika*, 49(2), 77–86. <https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.9> (in Ukr.)
7. *EBA Statistical Report 2023* | European Biogas Association. (n.d.). <https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2023/>
8. Lembo, G., Rosa, S., Marone, A., & Signorini, A. (2023). In situ biogas upgrading in a randomly packed Gas-Stirred Tank reactor (GSTR). *Energies*, 16(7), 3296. <https://doi.org/10.3390/en16073296>
9. Corbellini, V., Feng, C., Bellucci, M., Catenacci, A., Stella, T., Espinoza-Tofalos, A., & Malpei, F. (2021). Performance Analysis and Microbial Community Evolution of In Situ Biological Biogas Upgrading with Increasing H₂/CO₂ Ratio. *Archaea*, 2021, 1–15. <https://doi.org/10.1155/2021/8894455>
10. Kramar V. Biogas enrichment technologies and their characteristics. (2023). *Teplofizika ta teploenergetika*, 48 (1), 64–74. <https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8> (in Ukr.)
11. Dombrovskiy O.G., Traksler I.S., & Potapova M.V. In-situ hydrogen biomethanization: optimization of biomethane production and biogas purification from CO₂. (2024). *Vidnovliuvana Enerhetyka*, 3, 140–144. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\)140-144](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79)140-144) (in Ukr.)
12. Liu, R., Hao, X., & Wei, J. (2015). Function of homoacetogenesis on the heterotrophic methane production with exogenous H₂/CO₂ involved. *Chemical Engineering Journal*, 284, 1196–1203. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.09.081>
13. Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., Chew, K. W., & Show, P. L. (2019). Technologies for Biogas upgrading to Biomethane: a review. *Bioengineering*, 6(4), 92. <https://doi.org/10.3390/bioengineering6040092>
14. Zhao, J., Li, Y., & Dong, R. (2021). Recent progress towards in-situ biogas upgrading technologies. *The Science of the Total Environment*, 800, 149667. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149667>
15. Zhu, X., Zhou, P., Chen, Y., Liu, X., & Li, D. (2020). The role of endogenous and exogenous hydrogen in the microbiology of biogas production systems. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 36(6). <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02856-9>
16. Agneessens, L. M., Ottosen, L. D. M., Andersen, M., Olesen, C. B., Feilberg, A., & Kofoed, M. V. W. (2018). Parameters affecting acetate concentrations during in-situ biological hydrogen methanation. *Bioresource Technology*, 258, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.102>
17. Poggio, D., Sastraatmaja, A., Walker, M., Michailos, S., Nimmo, W., & Pourkashanian, M. (2023). Experimental evaluation of continuous In-Situ biomethanation of CO₂ in anaerobic digesters fed on sewage sludge and food waste and the influence of hydrogen Gas–Liquid mass transfer. *Processes*, 11(2), 604. <https://doi.org/10.3390/pr11020604>
18. Okoro-Shekwaga, C. K., Ross, A., & Camargo-Valero, M. A. (2021). Enhancing bioenergy production from food waste by in situ biomethanation: Effect of the hydrogen injection point. *Food and Energy Security*, 10(3). <https://doi.org/10.1002/fes3.288>
19. Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., & Angelidaki, I. (2022). H₂ competition between homoacetogenic bacteria and methanogenic archaea during biomethanation from a combined experimental-modelling approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(2), 107281. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107281>
20. Rafrafi, Y., Laguillaumie, L., & Dumas, C. (2020). Biological Methanation of H₂ and CO₂ with Mixed Cultures: Current Advances, Hurdles and Challenges. *Waste and Biomass Valorization*, 12(10), 5259–5282. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01283-z>
21. Wang, H. (2016). Optimization of biomethanation focusing on high ammonia loaded processes. Welcome to DTU Research Database. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/optimization-of-biomethanation-focusing-on-high-ammonia-loaded-pr>
22. Wang, H., Zhu, X., Yan, Q., Zhang, Y., & Angelidaki, I. (2019). Microbial community response to ammonia levels in hydrogen assisted biogas production and upgrading process. *Bioresource Technology*, 296, 122276. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122276>

Отримано 30.01.2025

Received 30.01.2025

Прийнято до друку 18.02.2025

Accepted for publication 18.02.2025