

УДК 620.92

## ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ БІОГАЗУ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Крамар В.Г., канд. техн. наук

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

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8>

*Наведено інформацію про основні технології збагачення біогазу до якості біометану, нові напрямки, що досліджуються, основні техніко-економічні показники технологій, що досягли комерційного рівня застосування. Проведено порівняння переваг та недоліків різних технологій та зроблено висновки щодо суттєвих умов при їх виборі.*

*Information on the main technologies of biogas upgrading, new areas under research, the main technical and economic indicators of commercially applied technologies are provided. A comparison of the advantages and disadvantages of various technologies was provided, and conclusions were made regarding the essential conditions for their selection.*

Бібл. 23, табл. 4, рис. 5.

**Ключові слова:** біогаз, біометан, технології очищення біогазу, видалення CO<sub>2</sub>.

**Актуальність** роботи обумовлена розширенням можливостей застосування біометану та зростанням зацікавленості виробників біогазу у впровадженні технологій його збагачення до якості біометану.

**Метою даної роботи** є огляд особливостей основних технологій збагачення біогазу, їх техніко-економічних показників, порівняння їх сильних та слабких сторін.

**Методи дослідження** включають аналіз наукових та інших публікацій, проведення оцінок та розрахунків.

**Результати дослідження**

Збагачення біогазу до якості природного газу в Україні стає все більш актуальним напрямком його застосування, що дозволяє не тільки подавати отриманий біометан в мережу природного газу, але й використання на транспорті у стисненому чи зрідженому вигляді чи в перспективі експортувати його в країни Європи. До 2030 року виробництво біометану в Україні може досягти 1 млрд м<sup>3</sup> на рік [1], і зараз у власників біогазових станцій зростає зацікавленість у такому виробництві.

Як видно з даних табл. 1, найбільш вагомою складовою, що відрізняє склад біогазу від складу природного газу чи біометану, є вміст вуглекислого газу.

Крім вуглекислого газу, біогаз містить ще ряд складових, що мають максимально вилучатись при очищенні через їх негативний екологічний вплив чи вплив на споживчі якості біометану, зокрема:

- вода (H<sub>2</sub>O), що сприяє корозії шляхом утворення кислотних сполук, а також може пошкодити обладнання при конденсації чи замерзанні при низьких температурах;

- сірководень (H<sub>2</sub>S), що є токсичним газом та утворює ще більш токсичні сполуки при спалюванні, може детонувати при спалюванні в ДВЗ, сприяє корозії

обладнання, отруює каталізатори та адсорбенти на подальших технологічних стадіях та при кінцевому використанні;

- силосани, що утворюють оксид кремнію і мікрокристалічний кварц при спалюванні, які потім відкладаються на головках циліндрів двигунів, клапанах, свічках запалювання, посилюючи абразивний знос обладнання.

- аміак (NH<sub>3</sub>), що є токсичним газом та створює токсичні сполуки при спалюванні, сприяє корозії обладнання;

- кисень - може спричиняти займання при певних концентраціях;

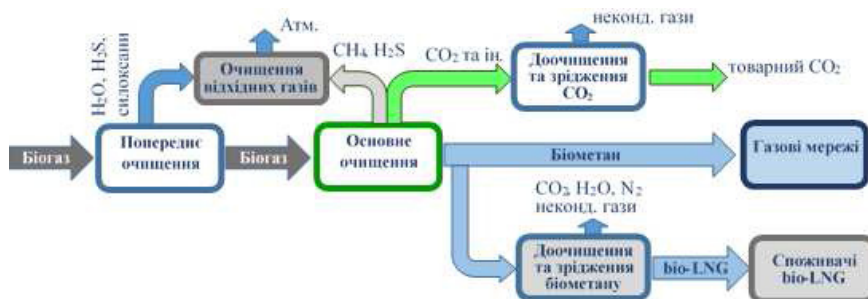
- леткі органічні сполуки (надалі - ЛОС), що є канцерогенними та токсичними, утворюють діоксини та фурани, справляють корозійний вплив на двигуни внутрішнього згоряння, руйнують резину і пластики.

На рис.1 автором узагальнено та схематично показано основні матеріальні потоки та супутні продукти, що можуть виникати в процесі збагачення біогазу до біометану та його подачі споживачам.

Вилучення вуглекислого газу є основною стадією збагачення біогазу (позначене на рис.1 як основне очищення). Для кожного методу основного очищення біогазу деякі з його компонентів можуть бути шкідливими для процесу, тому їх необхідно видалити перед основним очищенням. Також можуть бути обмеження щодо вмісту цих сполук у очищеному біометані. Тоді послідовність їх видалення залежить від того, чи відокремлюються вони під час очищення біогазу разом із CO<sub>2</sub>, чи попадають в очищений продукт. Попереднє очищення біогазу застосовують для вилучення води, сірководню та силосанів. Після збагачення біогазу,

Табл. 1. Порівняння типового складу біогазу з біогазової установки та вимог до складу природного газу та біометану

Склад та інші характеристики	Біогаз з відходів сільського господарства [2]	«Усереднений» біогаз [2, 3]	Вимоги Кодексу газотранспортної системи (Україна) [4]	Вимоги до якості біометану, що передається до газорозподільної мережі [5]
метан (CH <sub>4</sub> ), %об.	50-80	50-75	>90	> 95
вуглекислий газ (CO <sub>2</sub> ), %об.	19-50	25-45	< 2	< 2,5
вода (H <sub>2</sub> O), %об.	<6	2-7	-	-
азот (N <sub>2</sub> ),%об.	0-1	1-5	< 5	< 5
кисень (O <sub>2</sub> ),%об.	0-1	<2	< 0,2	< 1
водень(H <sub>2</sub> ),%об.	0-2	0-3	-	< 0,5
сірководень (H <sub>2</sub> S), ppm	2160-10000	0,1-0,5%	< 6 мг/м <sup>3</sup>	< 5 мг/м <sup>3</sup>
амоній (NH <sub>3</sub> ), ppm	50-144	<1	-	< 10 мг/м <sup>3</sup>
моноксид вуглецю (CO),%об.	0-1	0-0,3%	-	-
загальний хлор (Cl) мг/м <sup>3</sup>	-	-	-	< 1,5 мг/м <sup>3</sup> (F, Cl)
силоксани, %об.	сліди	-	-	< 1 мг/м <sup>3</sup>
Нижча теплота згоряння, МДж/нм <sup>3</sup>	20,5-23 [6]	-	32,66-34,54 (при 20-25 °С)	-



**Рис. 1. Основні матеріальні потоки та супутні продукти процесів очищення біогазу до біометану та його подачі споживачам**

залежно від технічних вимог операторів газових мереж, може знадобитись корекція складу отриманого біометану по температурі точки роси чи теплотворній здатності, а також одоризація. Також важливою стадією є очищення відхідних газів системи очищення біогазу, що можуть містити метан та інші хімічні сполуки.

Процеси основного очищення за фізичними принципами їх реалізації можна умовно розділити на адсорбційні, абсорбційні, мембранні, криогенні та біологічні. Класифікацію цих процесів, узагальнену автором на основі [7, 8, 9] показано на рис.2. Найбільш розповсюдженими технологіями, що досягли комерційного рівня, є наступні [2, 10, 11]:

1. Адсорбція зі зміною тиску (надалі- “pressure swing adsorption”, PSA).

2. Абсорбція водою (водяний скруббер, надалі- “high pressure water scrubber”, HPWS).

3. Фізична абсорбція органічними сорбентами (органічний фізичний скруббер, надалі- “physical scrubber”, PS).

4. Хімічна абсорбція (амінний скруббер, надалі- “chemical scrubber”, CS).

5. Мембранна сепарація (надалі- “membrane separation”, MS).

6. Криогенна сепарація (надалі- “cryogenic separation”, CrS).

Ці технології відмічені темнішим кольором на Рис. 2.

### Адсорбція зі зміною тиску (PSA) [11, 12, 13]

PSA – це періодичний процес із використанням кількох колон, заповнених адсорбентом, що працюють паралельно під тиском 0,4-1,0 МПа. Як адсорбент зазвичай застосовують активоване вугілля або молекулярні сита. Процес очищення полягає в розділенні молекул газу на основі їх молекулярної маси та розміру –  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  і  $\text{N}_2$  поглинаються адсорбентом, в той час як метан збирається у верхній частині адсорбційної колони під низьким тиском. Процес адсорбції є оборотним, і  $\text{CO}_2$  видаляється під час циклу регенерації, що відбувається при зниженні тиску або, в деяких варіантах, при зміні температури. Коли адсорбуючий матеріал в одній посудині насичується поглинутими газами, потік необробленого газу перемикається на іншу колону, в якій адсорбент був регенований. Під час регенерації тиск знижується в кілька етапів, при цьому адсорбовані сполуки видаляються та десорбуються із середовища в окремому газовому потоці. Газ, десорбований під час першого та другого падіння тиску, може бути повернутий на вхід необробленого газу, оскільки він міститиме деяку кількість метану, який був адсорбований разом із вуглекислим газом. Газ, десорбований на наступному етапі зниження тиску, або направляється до наступної колони, або, якщо він майже вільний від метану, видаляється в атмосферу. Невелика кількість потоку очищеного метану використовується для продувки кожної колони та підготовки її до нового циклу. Оскільки адсорбент поглинає  $\text{H}_2\text{S}$  необоротно, цей газ вважається токсичною домішкою для цього процесу, і має бути видалений на стадії попередньої обробки. Суттєвим недоліком процесу PSA є необхідність додаткової очистки відхідних газів, щоб запобігти викидам у навколишнє середовище.

Різновидами реалізації при PSA є наступні [8, 14]:

– адсорбція зі зміною вакууму (VSA), яка відрізняється тим, що процес регенерації адсорбенту відбувається при тиску нижче атмосферного;

– адсорбція зі зміною температури (TSA), при якій для регенерації адсорбенту через колону пропускається нагрітий газ;

– адсорбція зі зміною температури електро-нагріванням (ESA) є модифікацією процесу TSA, при якій для регенерації адсорбенту застосовується електричне нагрівання колони;

– адсорбція з мікрохвильовою регенерацією (MR) використовує електромагнітну енергію, яка безпосередньо перетворюється на теплову енергію в шарі адсорбенту, без застосування звичайних процесів теплообміну.

**Абсорбція водою (водяний скруббер, HPWS) [11, 12, 13].**

У водяному скруббері використовується властивість вуглекислого газу набагато краще розчинятись у воді, ніж метан, причому цей ефект підвищується при більшому тиску. Установа складається з трьох основних елементів- абсорбційної колони, флеш-колони та десорбційної колони. В абсорбційній колоні, заповненій шаром пористого інертного матеріалу, необроблений газ, що подається під тиском 0,6-1,0 МПа, взаємодіє з водою в протитечії, в результаті вуглекислий газ та ряд інших домішок розчиняються у воді. Далі вода подається у флешколону, де тиск менший (0,25-0,35 МПа). В результаті з води виділяється частина розчинених газів, що повертаються на вхід необробленого газу. Близько 80% обсягу цих газів становить метан. Далі вода потрапляє в десорбційну колону, де вона в шарі пористого інертного матеріалу в протитечії продувається повітрям при ще нижчому тиску, звільняючись від  $\text{CO}_2$  та  $\text{H}_2\text{S}$ , після чого подається знову в абсорбційну колону [12].

**Фізична абсорбція органічними сорбентами (органічний фізичний скруббер, PS) [11, 12, 13].**

В цьому методі вуглекислий газ з біогазу поглинається органічними розчинниками, що можуть вибірково вловлювати  $\text{CO}_2$  без будь-яких хімічних реакцій. Органічними розчинниками, які зазвичай ви-

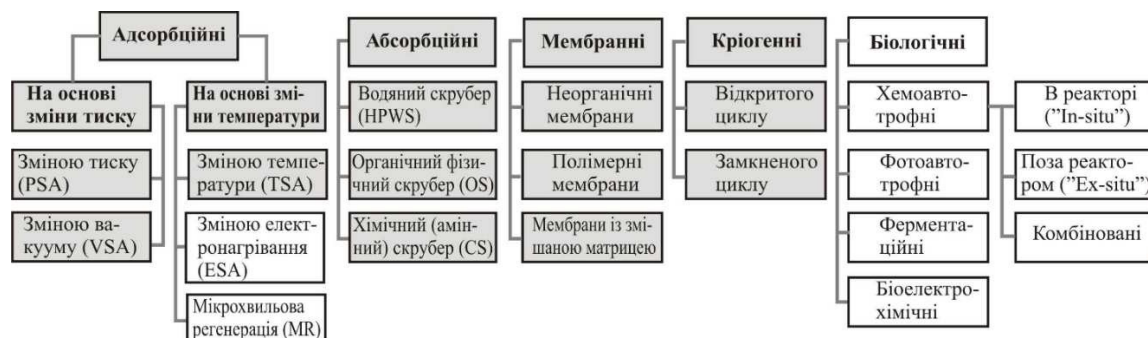


Рис. 2. Основні методи збагачення біогазу до біометану

користуються для поглинання  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{S}$  з біогазу, є поліетиленгліколеві ефіри (PEG), особливо Genosorb® і Selexol®, метанол і N-метилпіролідон [14]. Розчинність  $\text{CO}_2$  в органічних розчинниках вища, ніж у воді. Наприклад, PEG можуть поглинати в п'ять разів більше  $\text{CO}_2$  порівняно з водою. За апаратурним оформленням процес схожий на водяний скруббер. Певна відмінність полягає в тому, що процес абсорбції проводять при меншому тиску – 0,7-0,8 МПа, а також, органічний розчинник перед подачею в десорбційну колону має бути нагрітий до температури 40-80 °С, для чого застосовують скидне тепло від різних процесів, наприклад, компресорів чи установок термічного окислення відхідних газів. Завдяки вищій абсорбційній здатності органічних розчинників, їх кількість в процесі значно нижча, ніж кількість води, що означає менші витрати на перекачування. Цей процес також підходить для видалення слідів таких речовин як  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{O}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ , хоча для видалення  $\text{H}_2\text{S}$  рекомендується попереднє очищення.

**Хімічна абсорбція (амінний скруббер, CS)** [11, 12, 13].

Основна особливість цієї технології полягає у використанні реагенту, який хімічно зв'язується з молекулами  $\text{CO}_2$ , видаляючи їх з газу. Найчастіше для цього використовують водний розчин амінів. Для видалення вуглекислого газу та сірководню використовують метилдіетаноламін (MDEA), діетаноламін (DEA) і моноетаноламін (MEA). Найпоширенішою амінною системою на даний час є суміш MDEA та піперазину (PZ), яку часто називають активованою MDEA (aMDEA).

Установка складається з двох колон – абсорбера та десорбера. Необроблений біогаз вводить у абсорбційну колону під тиском 0,1–0,2 МПа. Розчин аміну вводиться у верхню частину абсорбційної колони, і тече в напрямку, протилежному руху біогазу. Абсорбційні колони можуть мати різну конструкцію та принцип дії – насадкові, плівкові, барботажні, розпилувальні, мембранні [15]. Температура водного розчину амінів в колоні підвищується від 20-40 °С до 45-65 °С за рахунок екзотермічної реакції з  $\text{CO}_2$ . Здатність розчину аміну до поглинання  $\text{CO}_2$  також зростає з температурою через більш високу швидкість реакції. Водний розчин аміну, насичений  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{S}$ , виходить з абсорбційної колони знизу, проходить через теплообмінник і надходить у колону десорбера. У колону-десорбер подається тепло від ребойлера, розміщеного внизу колони, що призводить до підвищення температури до 120–150 °С і тиску до 0,15–0,3 МПа. Це сприяє розриву хімічних зв'язків між відпрацьованим розчином аміну та  $\text{CO}_2$ , та призводить

до регенерації розчину аміну. Основним недоліком цього способу є суттєва кількість теплоти, необхідна для регенерації розчину аміну.

**Мембранна сепарація (MS)** [11, 12, 13].

Мембрана – це щільний фільтр, який може розділяти компоненти в газі або рідині на молекулярному рівні. У мембранних процесах розділення газу рушійною силою для розділення є різниця парціального тиску газу через мембранний бар'єр. Окремі компоненти можна відокремити, враховуючи їхню різну проникність через пористий мембранний матеріал або різну розчинність і дифузійну здатність через непористий щільний мембранний матеріал [15]. Процес мембранного очищення полягає в тому, що біогаз стискають до 0,6-2,5 МПа та пропускають через мембранний сепаратор, який видаляє  $\text{CO}_2$ . Очищений біогаз виходить із сепаратора на стороні високого тиску, а домішки видаляються на стороні низького тиску. Для очищення біогазу зазвичай використовуються мембрани з полімерів або неорганічних матеріалів. Полімерні мембрани є найпоширенішими, оскільки вони недорогі, прості у виготовленні та стабільні при високому тиску. Багатоступеневі мембранні системи можуть виробляти біометан із вмістом  $\text{CH}_4$  понад 96%. Очищення біогазу за допомогою мембранної сепарації – відносно простий процес, що не висуває високих експлуатаційних вимог, а найбільшим недоліком є високі початкові інвестиційні витрати. Такі домішки, як водяна пара та сірководень, необхідно видалити з біогазу перед подачею на мембрани.

**Кріогенна сепарація (CrS)** [11, 12, 13].

Принцип кріогенного збагачення біогазу заснований на тому, що різні компоненти в біогазі мають різні температури і тиски зрідження. Очищення біогазу здійснюється при тиску 8 МПа і температурі – 170 °С у чотири етапи, що включають стискання і охолодження. На першому етапі від біогазу відокремлюються силосани,  $\text{H}_2\text{S}$ , волога та галогени [10, 16, 17]. На другому етапі вільний від домішок газ стискається до тиску 1 МПа, а потім пропускається через теплообмінник, де охолоджується до – 25 °С. На третьому етапі цей охолоджений газ додатково охолоджується до – 55 °С, тоді  $\text{CO}_2$  переходить у рідкий стан. На четвертому етапі газ охолоджується до температури – 85 °С, під час якого  $\text{CO}_2$  затвердіває та відокремлюється від газу. У процесі кріогенної сепарації чистий вуглекислий газ виробляється як побічний продукт, що може принести додатковий дохід. Процес кріогенної сепарації також добре підходить для виробництва рідкого біометану. Недоліком використання низькотемпературної технології для обробки біогазу є вартість відділення діоксиду вуглецю, що залишається досить високою порівняно з іншими методами.

Окрім розглянутих вище фізико-хімічних методів, існують також **біологічні методи збагачення біогазу** [9]. Один із способів полягає у використанні хемоавтотрофних мікроорганізмів (наприклад, Архей), що перетворюють  $\text{CO}_2$  на метан шляхом реакції з воднем. Процес потребує додаткового введення водню, що може бути отриманий шляхом електролізу, а також теплової енергії. Процес метанації можна проводити як безпосередньо в біогазовому реакторі (“in-situ”), так і в окремому реакторі (“ex-situ”) [14].

Інший спосіб полягає у використанні фотоавтотрофних мікроводоростей, які в окремому фотобіореакторі поглинають  $\text{CO}_2$  з біогазу, продукуючи при цьому завдяки фотосинтезу додаткову біологічну масу, яка в свою чергу може бути використана як сировина для виробництва біогазу чи для інших потреб. Середовищем для розвитку мікроводоростей може бути рідка фаза дигестату. Крім  $\text{CO}_2$ , відбувається одночасне поглинання  $\text{H}_2\text{S}$ , що дає певні переваги [14].

Ще одним напрямком є використання  $\text{CO}_2$  у біогазі для виробництва високоцінних хімічних сполук (наприклад, бутанолу, етанолу і ацетату) за допомогою інших методів біологічної модернізації, зокрема, ферментації. Такі мікроорганізми як *Clostridium scatologenes*, *Acetobacterium woodii* і *Butyribacterium methylotrophicum* можуть перетворювати  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2$  на розчинні органічні продукти. Також, відомо про деякі ферментаційні процеси, що можуть перетворювати  $\text{CO}_2$  і цукор безпосередньо в карбонові кислоти. Вуглекислий газ у біогазі також можна перетворити на сукцинат шляхом ферментації глюкози за допомогою *Actinobacillus succinogenes* [18].

Також до біологічних методів можна віднести спосіб, що використовує біоелектрохімічні системи (BES) для

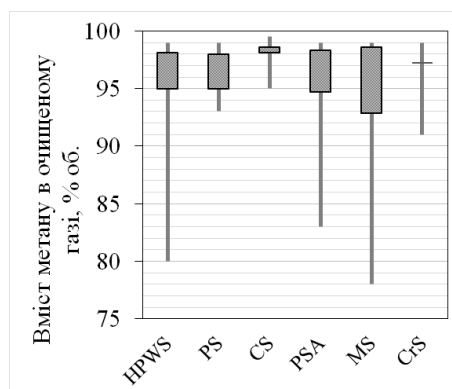
підвищення якості біогазу шляхом біоелектрохімічного відновлення  $\text{CO}_2$  до  $\text{CH}_4$ . Технологія передбачає електродні реакції, головним чином розщеплення води та виділення кисню на аноді з одночасним відновленням  $\text{CO}_2$  до  $\text{CH}_4$  на катоді. BES живиться від зовнішнього джерела електроенергії та каталізується активною метаногенною мікробною спільнотою, розташованою на катоді [19]. На даний час біологічні способи ще знаходяться на стадії дослідження та вдосконалення методів їх практичної реалізації.

В Табл. 2 та на рис. 3 представлено основні виробничі характеристики технологій, заснованих на фізико-хімічних методах очищення біогазу. На рис. 3 вертикальні лінії позначають весь діапазон значень показників, що зустрічається в літературі, а темні прямокутники- діапазон значень, що зустрічаються найбільш часто.

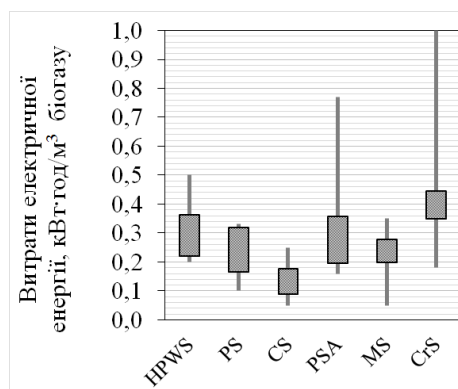
На основі аналізу численних публікацій можна зробити висновок, що кожна з технологій, що застосовуються на етапі основного очищення, має свої переваги та недоліки (табл. 3).

В табл. 4 наведено показники питомих виробничих витрат для різних технологій.

На рис. 4 показано апроксимацію літературних даних щодо капітальних витрат на впровадження розглянутих технологій збагачення біогазу. Також на цьому рисунку показано отримані залежності для орієнтовної оцінки питомих капітальних витрат для цих технологій, крім криогенної сепарації, через недостатню кількість даних. Як видно з представлених даних, на питомі капітальні витрати більше впливає масштаб впровадження (продуктивність установки), ніж застосовувана технологія.



а) ступінь чистоти отриманого біометану



б) питомі витрати електричної енергії

Рис. 3. Показники ефективності застосування технологій збагачення біогазу

Табл. 2. Основні виробничі характеристики технологій збагачення біогазу [20, 21]

Параметр	PSA	HPWS	PS	CS	MS	CrS
Діапазон продуктивності технології, м <sup>3</sup> /годину·біометану (м <sup>3</sup> /годину біогазу)	300-800 (600-1500)	200-1200 (400-2200)	300-1500 (600-2800)	400-2000 (700-3700)	50-500 (100-900)	н/д
Масштаби підприємств	малі, середні	середні, великі	середні, великі	середні, великі	малі, середні	великі
Питома потреба в площі та висота обладнання,	(м <sup>2</sup> площі/м <sup>3</sup> біогазу/годину) x м (висоти)					
	0,18 x 4	0,15 x 12	н/д	0,17 x 12	0,1 x 2,5	0,12 x 3
Частка вловленого метану, % від вмісту в біогазі	98,0	98,0	96,0	99,96	80-99,5	98-99,9
Типовий надлишковий тиск в процесі, МПа	0,1-1	0,4-1	0,4-0,8	0,005-0,4	0,7-2	1-8
Тиск газу на виході, МПа	0,4-0,5	0,7-1	0,13-0,75	0,4-0,5	0,4-0,6	0,8-1
Потреба в тепловій енергії (кВт·год/м <sup>3</sup> біогазу) та температурний рівень	–	–	<0,2 70-80 °С	0,5-0,75 120-160 °С	–	–
Необхідність попереднього очищення біогазу	так	реком.	реком.	так	реком.	так
Одночасне вловлювання Н <sub>2</sub> S	можливе	так	можливе	ні (забруднювач)	можливе	так
Одночасне вловлювання N <sub>2</sub> та O <sub>2</sub>	можливе	ні	ні	ні	частково	так
Необхідність обробки відхідних газів	так	так	так	ні	так	так
Необхідність у воді	ні	так	ні	так	ні	ні
Потреба у витратних матеріалах		Засоби для усунення відкладень, осушувачі	Органічний розчинник (безпечний)	Розчин амінів (небезпечний, корозійний)	–	н/д
Допустимі відхилення навантаження, % від ном.	85-115	50-100	50-100	50-100	50-105	н/д

На рис. 5 показано динаміку впровадження різних технологій збагачення біогазу в Європі та їх частку в 2021 році. Звертає на себе увагу стрімке зростання частки мембранної сепарації у нових проектах після 2014 року, особливо помітне в 2019-2021 роках. З 2017 року переважна частина нових біометанових заводів застосовували саме цю технологію. В результаті, зараз мембранна сепарація займає в Європі найбільшу частку (47%), випередивши технології HPWS та CS, що були лідерами раніше. Одна із причин вбачається у покращенні експлуатаційних характеристик установок

мембранної сепарації, пов'язаному з розробленням нових типів високоселективних мембран, що в поєднанні з можливістю використовувати кілька послідовних стадій очищення дозволяє отримувати біометан дуже високої чистоти [21]. Це, разом з іншими перевагами, такими як компактність, можливість масштабування на різні потужності, відсутність необхідності в хімічних реагентах, незначна кількість рухомих частин у обладнанні, просте обслуговування, робить дану технологію достатньо привабливою для впровадження.

Табл. 3. Переваги та недоліки технологій основного очищення біогазу

Технологія	Переваги	Недоліки
HPWS	Комбіноване видалення CO <sub>2</sub> та H <sub>2</sub> S; низькі втрати метану (<2%); використану воду можна регенерувати; стійкість до домішок; простота в управлінні; відсутність хімікатів.	Низька інтенсивність процесу; можливе засмічення та піноутворення, викликане зростанням мікробної біомаси; можлива корозія, викликана H <sub>2</sub> S; потрібна велика кількість води навіть за умови її регенерації.
PS	Комбіноване видалення CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, HCN, H <sub>2</sub> O. Низькі втрати CH <sub>4</sub> ; енергоефективніший процес, ніж у водяному скрубєрі, що вимагає меншої площі для розміщення.	Для невеликих продуктивностей спосіб дорогий; додаткова витрата теплової енергії на регенерацію розчинника; розчинник дорогий і вимагає спеціального поводження.
CS	Висока концентрація CH <sub>4</sub> в біометані за рахунок високої вибіркості поглинання розчинником; дуже низькі втрати CH <sub>4</sub> (<0,1%); весь H <sub>2</sub> S можна видалити за низького тиску; швидший процес, ніж у водяному скрубєрі, і розчинник легко регенерувати.	Для регенерації розчинника необхідна теплота в кількості 0,4-0,8 кВт·год/м <sup>3</sup> біогазу; розчинник дорогий, вимагає особливого поводження, його не можна зливати в навколишнє середовище; корозія, розкладання розчинника, спінювання, випадання солей.
PSA	Комбіноване видалення CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> та O <sub>2</sub> ; компактна технологія, доступна для невеликих масштабів; швидкий монтаж і запуск; низька потреба в енергії; немає потреби в хімікатах.	Потрібне попереднє видалення H <sub>2</sub> S і H <sub>2</sub> O; домішки можуть спричинити забруднення та незручності в роботі; вимагає тонкого настроювання систем регулювання тиску; високі механічні навантаження на обладнання.
MS	Комбіноване видалення CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S, H <sub>2</sub> O; масштабування для невеликих установок; послідовним встановленням 2-3 ступенів мембранного очищення можна досягти високої чистоти біометану (>99%); мало рухомих частин, надійна конструкція, не використовуються хімікати; просте обслуговування.	Низька селективність мембран; низький вихід CH <sub>4</sub> в одностадійному мембранному процесі (для біометану високої чистоти необхідні кілька етапів мембранного очищення); можливі втрати метану (до 10%); після розділення необхідна доочистка біометану від H <sub>2</sub> S.
CrS	Високий ступінь розділення, отримання CO <sub>2</sub> високої чистоти, який можна виробляти для подальшого використання; низькі додаткові витрати енергії для виробництва рідкого біометану (bio-LNG); екологічно чистий, без додаткових хімікатів.	Високі інвестиційні, експлуатаційні витрати та витрати на обслуговування; велика потреба в енергії для охолодження; залишки CO <sub>2</sub> можуть залишатися в CH <sub>4</sub> , призводячи до поломок на стадії зрідження метану.

Табл. 4. Питомі виробничі витрати для різних технологій, €-цент/м<sup>3</sup> біометану [20, 22]

Продуктивність по біометану:	PSA	HPWS	PS	CS	MS	CrS
100 м <sup>3</sup> /годину	12,8	14,0	13,8	14,4	10,8-15,8	40,0
250 м <sup>3</sup> /годину	10,1	10,3	10,2	12,0	7,7-11,6	
500 м <sup>3</sup> /годину	9,2	9,1	9,0	11,2	6,5-10,1	

**Висновки**

Наведені дані показують, що немає значної різниці в інвестиційних витратах між різними технологіями збагачення біогазу (крім технології криогенної сепарації,

що є відчутно дорожчою). Енергоспоживання також досить однакове для різних технологій. Тому при виборі технології збагачення біогазу важливо враховувати інші аспекти, зокрема, його походження (біогаз, звалищний

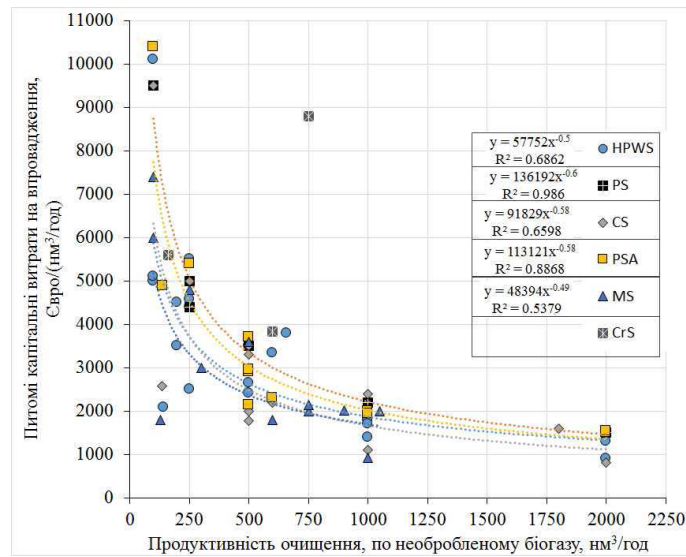


Рис. 4. Питомі капітальні витрати технологій збагачення біогазу

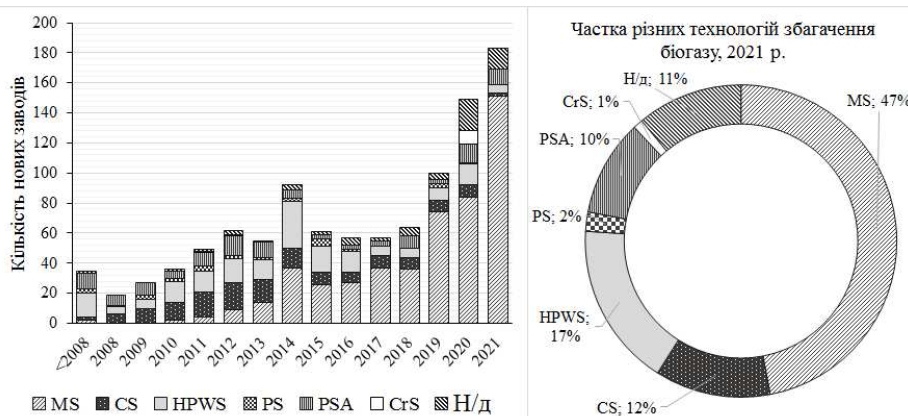


Рис. 5. Розповсюдженість різних технологій збагачення біогазу в Європі [23]

газ), використана сировина, наявність тих чи інших домішок у складі біогазу та здатність різних технологій їх видаляти, особливі вимоги до якості біометану, необхідність запобігати його викидам в атмосферу, умови впровадження (наявність виробничої площі, доступність води, хімічних реагентів), необхідний тиск біометану на виході з установки, тощо. Досить широкі діапазони технологічних показників, що зустрічаються в літературі, показують необхідність аналізу конкретних пропозицій постачальників технологій збагачення біогазу та порівняння значень показників, що гарантують постачальники при застосуванні їх обладнання.

В умовах України більш актуальними для збагачення біогазу можуть бути технології PSA та MS з огляду на відсутність потреби у воді та хімічних речовинах, можливість застосування в тому числі на невеликих біогазових станціях, а також на перспективу подальшого вдосконалення цих технологій. Крім того, досі перспек-

тивною може бути технологія HPWS завдяки її простоті та відносно невеликим капітальним витратам. Для всіх застосованих технологій необхідне очищення відхідних газів від залишків метану, що є сильним парниковим газом. Досягнення менших питомих викидів парникових газів на одиницю енергії виробленого біометану покращує умови його можливого експорту, зменшує вплив на оточуюче середовище.

ЛІТЕРАТУРА:

1. 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>.

2. *Atelge, Rasit & Senol, Halil, et al.* A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes. *Sustainability* 2021, 13, 11515. <https://doi.org/10.3390/su132011515>.
3. *Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, et al.* Biogas handbook, Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, ISBN 978-87-992962-0-0, <http://www.sdu.dk>.
4. *Кодекс газотранспортної системи, затверджений постановою НКРЕКП № 2493 від 30.09.2015.* <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text>.
5. *Технічні умови приєднання до газорозподільної системи виробників біометану.* РГК Вінницязгаз. <https://vn.dsoua.com/app.php/ua/files/43631/1>.
6. *Andlar M, Belskaya H, et al.* Biogas Production Systems and Upgrading Technologies: A Review. *Food Technol Biotechnol.* 2021 Dec;59(4):387-412. doi:10.17113/ftb.59.04.21.7300.
7. *Xiao Yuan Chen, Hoang duc Vinh, Antonio Avalos Ramirez* 2015, Membrane gas separation technologies for biogas upgrading, *RSC advances* 2015 v.5 no.31 pp. 24399-24448. DOI:10.1039/C5RA00666J.
8. *J. M. Mutunga, H. M. Ndiritu, et al.* Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Proceedings of the 2022 Sustainable Research and Innovation Conference JKUAT Main Campus, Kenya, 5 - 6 October, 2022.*
9. *Angelidaki, Irini & Xie, Li & Luo, Gang, et.al* (2019). Biogas Upgrading: Current and Emerging Technologies. DOI:10.1016/B978-0-12-816856-1.00033-6.
10. *Michael Beil, Wiebke Beyrich, 15 - Biogas upgrading to biomethane, Editor(s): Arthur Wellinger, Jerry Murphy, David Baxter, In Woodhead Publishing Series in Energy, The Biogas Handbook, Woodhead Publishing, 2013, Pages 342-377, ISBN 9780857094988, https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.342.*
11. *Fiona Mwacharo, Suraj Bhandari, et al.* Biogas Drying and Purification Methods. *Centria University of Applied Sciences 2020, https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-7173-55-8.*
12. *Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., & Tamm, D.* (2013). Biogas upgrading - Review of commercial technologies. (SGC Rapport; Vol. 270). *Svenskt Gastekniskt Center AB.* <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>.
13. *Adnan, & Ong, & Nomanbhay, & Kit Wayne, Chew & Show, Pau-Loke.* (2019). Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Bioengineering.* DOI:10.3390/bioengineering6040092.
14. *Lóránt, Bálint, and Gábor Márk Tardy.* Current Status of Biological Biogas Upgrading Technologies. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, vol. 66, no. 3, Mar. 2022, p. 465. *Budapest University of Technology and Economics, https://doi.org/10.3311/ppch.19537.*
15. *M. Gruenewald, A. Radnjanski, 14 - Gas-liquid contactors in liquid absorbent-based PCC, Editor(s): Paul H.M. Feron, Absorption-Based Post-combustion Capture of Carbon Dioxide, Woodhead Publishing, 2016, Pages 341-363, ISBN 9780081005149, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100514-9.00014-7.*
16. *Petersson, Anneli & Wellinger, Arthur.* (2009). *Biogas Upgrading Technologies – Developments and Innovations.* IEA Bioenergy Task 37-Energy From Biogas and Landfill Gas. 37.
17. *Fiona Mwacharo, Suraj Bhandari et al.* Biogas Drying and Purification Methods. *Centria University of Applied Sciences 2020, https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-7173-55-8.*
18. *Muhammad Usman Khan, Jonathan Tian En Lee et al.* Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 149, 2021, 111343, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>.
19. *Aryal, Nabin & Ottosen, Lars & Kofoed, Michael & Pant, Deepak.* (2021). Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading. doi:10.1016/C2019-0-01200-9.
20. *Aile, Nantes* (2012). Biogas to Biomethane Technology Review. *Vienna Univ. Technology (Austria), Inst. Chem. Eng. Res. Div. Therm. Process Eng. Simul., (May): 1–15.*
21. *Lems, R., Langerak, J., Dirkse E.H.M.* Next Generation Biogas Upgrading Using High Selective Gas Separation Membranes. - Showcasing the Poundbury Project - DMT Environmental Technology. *17th European Biosolids and Organic Resources Conference, 2013.*
22. *Rosa, M. D.* (2018). Economic assessment of producing and selling biomethane into a regional market. *Energy & Environment.* <https://doi.org/10.1177/0958305X18762581>.
23. *EBA (European Biogas Association)* (2022). *Tracking biogas and biomethane deployment across Europe. Statistical report.*

## BIOGAS UPGRADING TECHNOLOGIES AND THEIR CHARACTERISTICS

**Kramar V.G., Ph.D.**

*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03057, Ukraine*

<https://doi.org/10.31472/tpe.1.2023.8>

Recently, in Ukraine, the interest of biomethane producers in the implementation of biogas upgrading technologies for supply of biomethane to the natural gas network is growing. The purpose of this article is to inform industry specialists about the main existing biogas upgrading technologies and their technical and economic characteristics, comparing their strengths and weaknesses. There is a rapid increase in the use of membrane separation in Europe, which has become the main method of biogas purification at new enterprises in recent years. In general, the given data show that there is no significant difference in investment costs between different biogas upgrading technologies (except cryogenic separation technology, which is significantly more expensive). In addition, the power consumption is quite similar for different technologies. Therefore, when choosing a biogas upgrading technology, it is important to consider other aspects, in particular, its origin (biogas, landfill gas) and raw materials used (agricultural waste, solid household waste), the presence of certain impurities in the composition of biogas and the ability of various technologies to remove them, special requirements for the quality of biomethane, the need to prevent its emissions into the atmosphere, implementation conditions (availability of production space, water supply, chemical reagents), the required pressure of biomethane at the outlet of the installation, etc. The rather wide ranges of technological indicators found in the literature, especially regarding such key parameters as the purity of the obtained biomethane, the specific use of electrical energy, show the need to analyze the specific proposals of suppliers of biogas upgrading technologies and compare the values of the indicators guaranteed by suppliers at application of their equipment.

References 23, table 4, figure 5.

**Keywords:** biogas, biomethane, biogas purification technologies, CO<sub>2</sub> removal.

1. *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>.
2. *Atelge, Rasit & Senol, Halil, et al.* A Critical Overview of the State-of-the-Art Methods for Biogas Purification and Utilization Processes. *Sustainability* 2021, 13, 11515. <https://doi.org/10.3390/su132011515>.
3. *Teodorita Al Seadi, Dominik Rutz, et al.* Biogas handbook, Published by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, DK-6700 Esbjerg, Denmark, ISBN 978-87-992962-0-0, <http://www.sdu.dk>.
4. [*Code of the gas transportation system, approved by the Decree of NEURC No. 2493 dated September 30, 2015*]. (Ukr). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1378-15#Text>.
5. [*Technical requirements for connection of biomethane producers to the gas distribution system*]. RGK Vinnytsiagaz (Ukr). <https://vn.dsoua.com/app.php/ua/files/43631/1>.
6. *Andlar M, Belskaya H, et al.* Biogas Production Systems and Upgrading Technologies: A Review. *Food Technol Biotechnol*. 2021 Dec;59(4):387-412. doi:10.17113/ftb.59.04.21.7300.
7. *Xiao Yuan Chen, Hoang duc Vinh, Antonio Avalos Ramirez* 2015, Membrane gas separation technologies for biogas upgrading, *RSC advances* 2015 v.5 no.31 pp. 24399-24448. DOI:10.1039/C5RA00666J.
8. *J. M. Mutunga, H. M. Ndiritu, et al.* Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Proceedings of the 2022 Sustainable Research and Innovation Conference JKUAT Main Campus, Kenya, 5 - 6 October, 2022*.
9. *Angelidaki, Irini & Xie, Li & Luo, Gang, et al.* (2019). Biogas Upgrading: Current and Emerging Technologies. DOI:10.1016/B978-0-12-816856-1.00033-6.
10. *Michael Beil, Wiebke Beyrich, 15 - Biogas upgrading to biomethane, Editor(s): Arthur Wellinger, Jerry Murphy, David Baxter, In Woodhead Publishing Series in Energy, The Biogas Handbook, Woodhead Publishing, 2013, Pages 342-377, ISBN 9780857094988, https://doi.org/10.1533/9780857097415.3.342.*
11. *Fiona Mwacharo, Suraj Bhandari, et al.* Biogas Drying and Purification Methods. *Centria University of Applied Sciences* 2020, <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-7173-55-8>.
12. *Bauer, F., Hulteberg, C., Persson, T., & Tamm, D.* (2013). Biogas upgrading - Review of commercial technologies. (SGC Rapport; Vol. 270). *Svenskt Gastekniskt Center AB*. <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>.

13. *Adnan, & Ong, & Nomanbhay, & Kit Wayne, Chew & Show, Pau-Loke.* (2019). Technologies for Biogas Upgrading to Biomethane: A Review. *Bioengineering*. DOI:10.3390/bioengineering6040092.
14. *Lóránt, Bálint, and Gábor Márk Tardy.* Current Status of Biological Biogas Upgrading Technologies. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, vol. 66, no. 3, Mar. 2022, p. 465. Budapest University of Technology and Economics, <https://doi.org/10.3311/ppch.19537>.
15. *M. Gruenewald, A. Radnjanski,* 14 - Gas-liquid contactors in liquid absorbent-based PCC, Editor(s): Paul H.M. Feron, Absorption-Based Post-combustion Capture of Carbon Dioxide, Woodhead Publishing, 2016, Pages 341-363, ISBN 9780081005149, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100514-9.00014-7>.
16. *Petersson, Anneli & Wellinger, Arthur.* (2009). Biogas Upgrading Technologies – Developments and Innovations. IEA Bioenergy Task 37-Energy From Biogas and Landfill Gas. 37.
17. *Fiona Mwacharo, Suraj Bhandari et al.* Biogas Drying and Purification Methods. Centria University of Applied Sciences 2020, [https://urn.fi/URN: ISBN:978-952-7173-55-8](https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-7173-55-8).
18. *Muhammad Usman Khan, Jonathan Tian En Lee et al.* Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 149, 2021, 111343, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343>.
19. *Aryal, Nabin & Ottosen, Lars & Kofoed, Michael & Pant, Deepak.* (2021). Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading. doi:10.1016/C2019-0-01200-9.
20. *Aile, Nantes* (2012). Biogas to Biomethane Technology Review. Vienna Univ. Technology (Austria), Inst. Chem. Eng. Res. Div. Therm. Process Eng. Simul., (May): 1–15.
21. *Lems, R., Langerak, J., Dirkse E.H.M.* Next Generation Biogas Upgrading Using High Selective Gas Separation Membranes. - Showcasing the Poundbury Project - DMT Environmental Technology. 17th European Biosolids and Organic Resources Conference, 2013.
22. *Rosa, M. D.* (2018). Economic assessment of producing and selling biomethane into a regional market. *Energy & Environment*. <https://doi.org/10.1177/0958305X18762581>.
23. *EBA (European Biogas Association)* (2022). Tracking biogas and biomethane deployment across Europe. Statistical report.

Отримано 08.02.2023  
Received 08.02.2023