

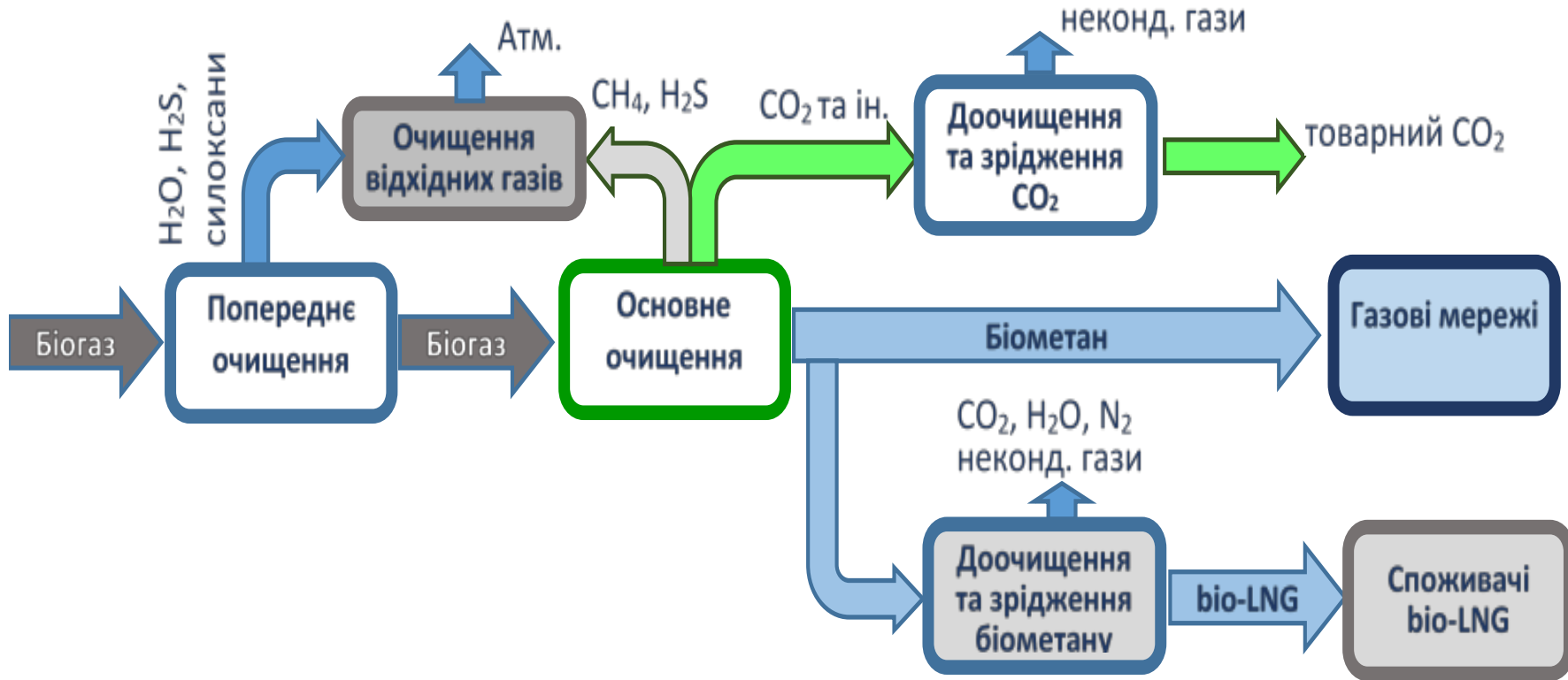
ТЕХНОЛОГІЇ ЗБАГАЧЕННЯ БІОГАЗУ ТА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Крамар В.Г., експерт УАВІО

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

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

Основні матеріальні потоки та супутні продукти процесів очищення біогазу до біометану та його подачі споживачам



Крім CO₂, мають вилучатись:

- **вода (H₂O)**, що сприяє корозії шляхом утворення кислотних сполук, а також може пошкодити обладнання при конденсації чи замерзанні при низьких температурах;
- **сірководень (H₂S)**, 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;
- **силоксани**, що утворюють оксид кремнію і мікрокристалічний кварц при спалюванні, які потім відкладаються на головках циліндрів двигунів, клапанах, свічках запалювання, посилюючи абразивний знос обладнання.
- **аміак (NH₃)**, 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.

Способи видалення небажаних компонентів з біогазу на етапі попередньої обробки та метану з відхідних газів

Компонент	Способи видалення
Вода	<ol style="list-style-type: none">1) З біогазу: конденсація при стисканні та охолодженні2) З біометану: адсорбція силікагелем чи оксидом алюмінію
H₂S	<ol style="list-style-type: none">1) Десульфуризація на місці: осадження сульфідів- додавання рідких сумішей різних солей металів (наприклад, хлориду заліза або сульфату заліза) в біогазову установку.2) Біологічна десульфурація: біологічна очистка- сірководень може бути видалений шляхом окислення хемоавтотрофними мікроорганізмами виду Thiobacillus або Sulfolobus (окремий скруббер).3) Хіміко-окислювальне очищення- поглинання сірководню лужними розчинами.4) Адсорбція на оксидах металів або активованому вугіллі.
Силоксани	<ol style="list-style-type: none">1) Водяний скруббер2) Кислотне очищення3) Охолодження та очищення в шарі активованого вугілля чи молекулярних сит.4) Вакуумний адсорбер змінного тиску чи змінної температури
Аміак	<ol style="list-style-type: none">1) Конденсація парів води та видалення конденсату з розчиненим аміаком.2) Установка промивання та осушення газу, що поєднує висушування з абсорбцією NH₃ і H₂S у воді.3) Установки на основі молекулярних сит.

Способи видалення небажаних компонентів з біогазу на етапі попередньої обробки та метану з відхідних газів (продовження)

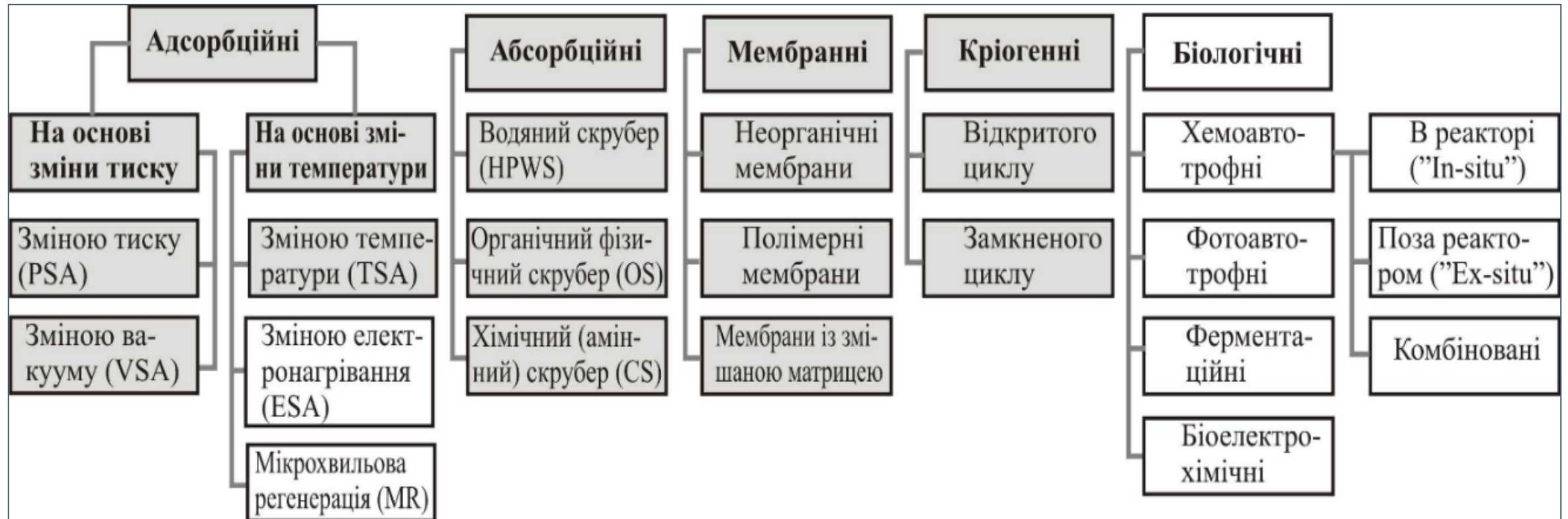
Компонент	Способи видалення
Кисень	1) Каталітичне окислення 2) Хемосорбція
Леткі органічні сполуки (ЛОС)	1) Фільтрація через активоване вугілля 2) Мембранна фільтрація 3) Каталітичне видалення 4) Адсорбер змінної температури
Метан у відхідних газах	1) Регенеративне термічне окислення. 2) Регенеративне каталітичне окислення. 3) Додавання до горючих газів з подальшим спалюванням та виробленням енергії. 4) Криогенна дистиляція

Основні методи збагачення біогазу до біометану

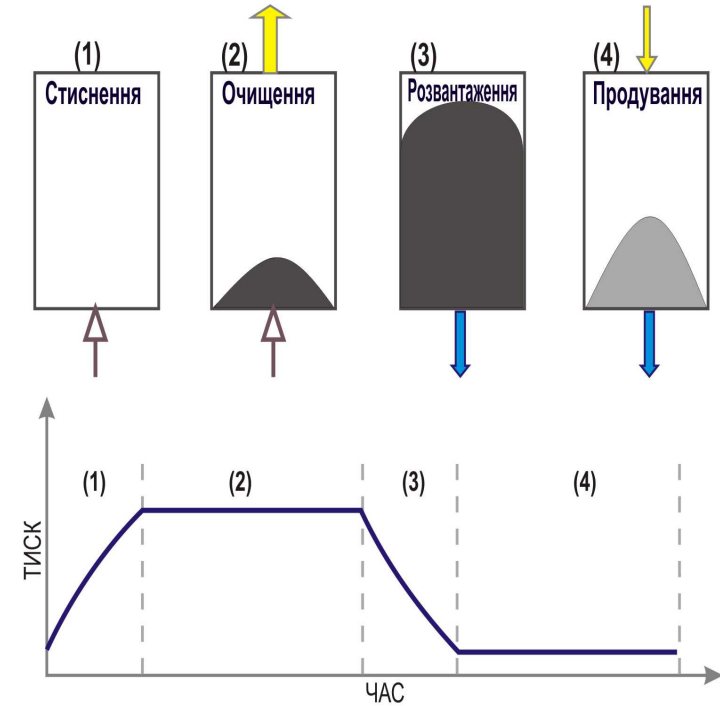
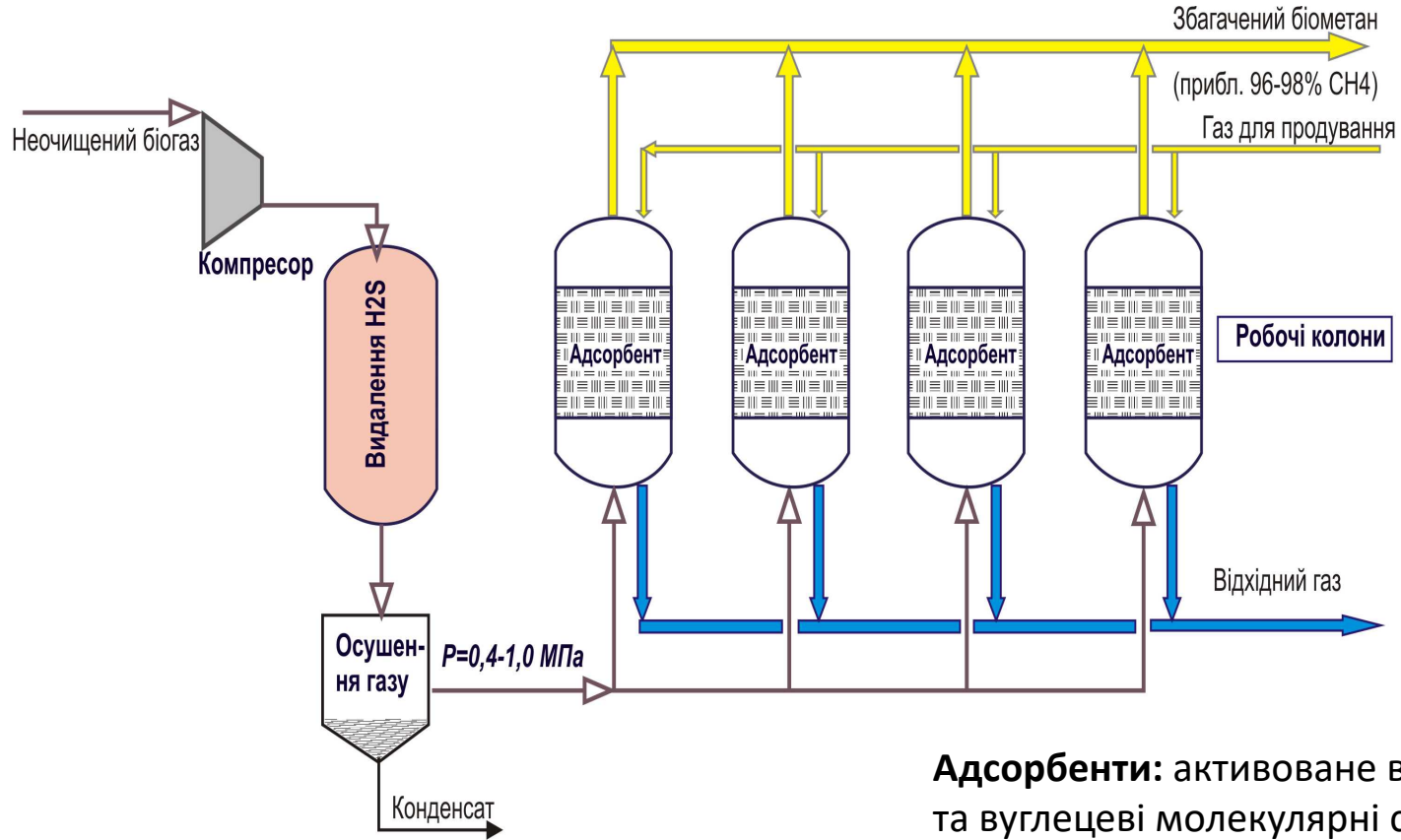
Найбільш розповсюдженими технологіями, що досягли комерційного рівня, є наступні [2, 10, 11]:

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



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



Адсорбенти: активоване вугілля, природні та синтетичні цеоліти, силікагелі та вуглецеві молекулярні сита.

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

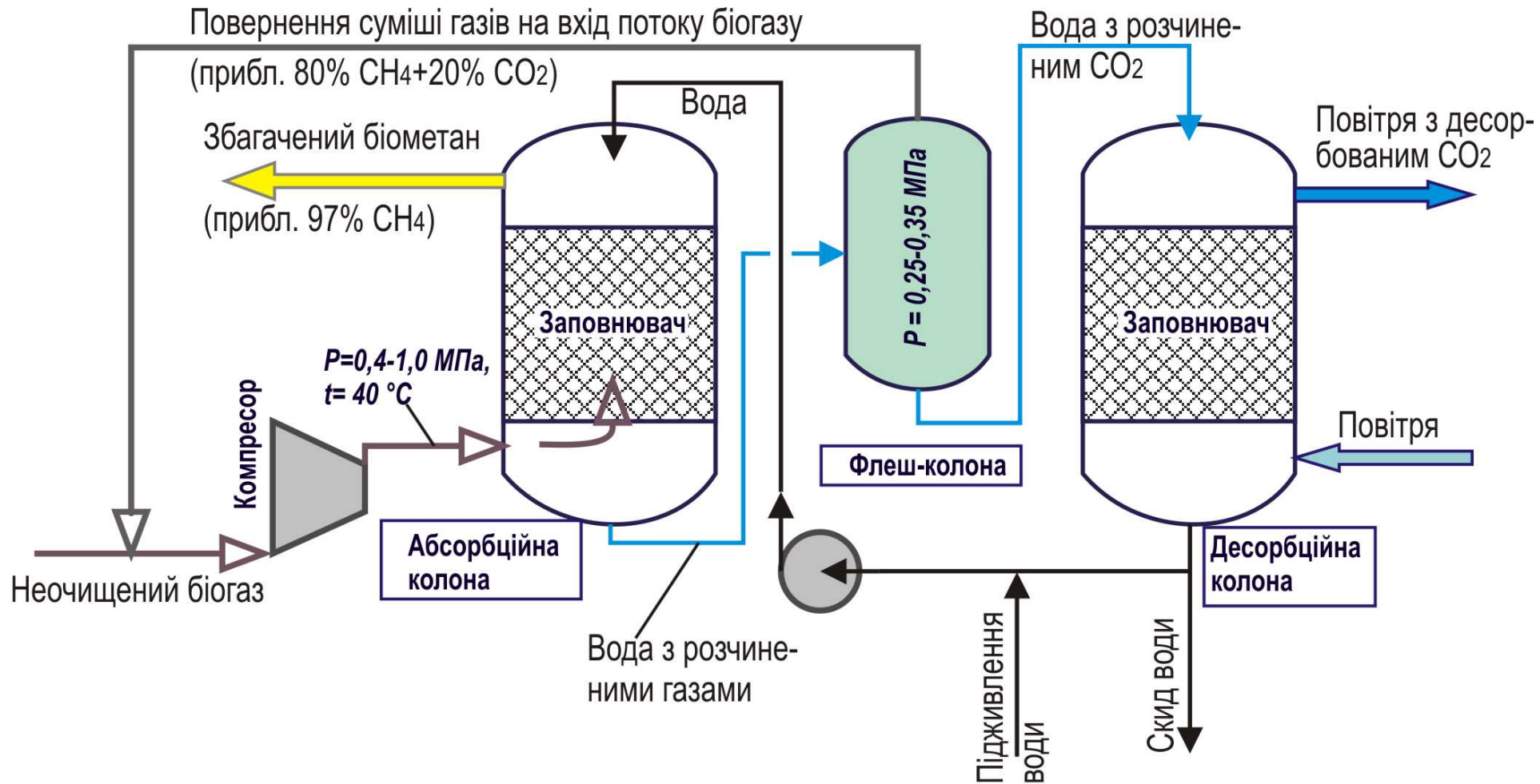
- ❑ адсорбція зі зміною вакууму (VSA), яка відрізняється тим, що процес регенерації адсорбенту відбувається при тиску нижче атмосферного;
- ❑ адсорбція зі зміною температури (TSA), при якій для регенерації адсорбенту через колону пропускається нагрітий газ;
- ❑ адсорбція зі зміною температури електронагріванням (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.



Адсорбція зі зміною тиску (PSA) – приклади діючих установок



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

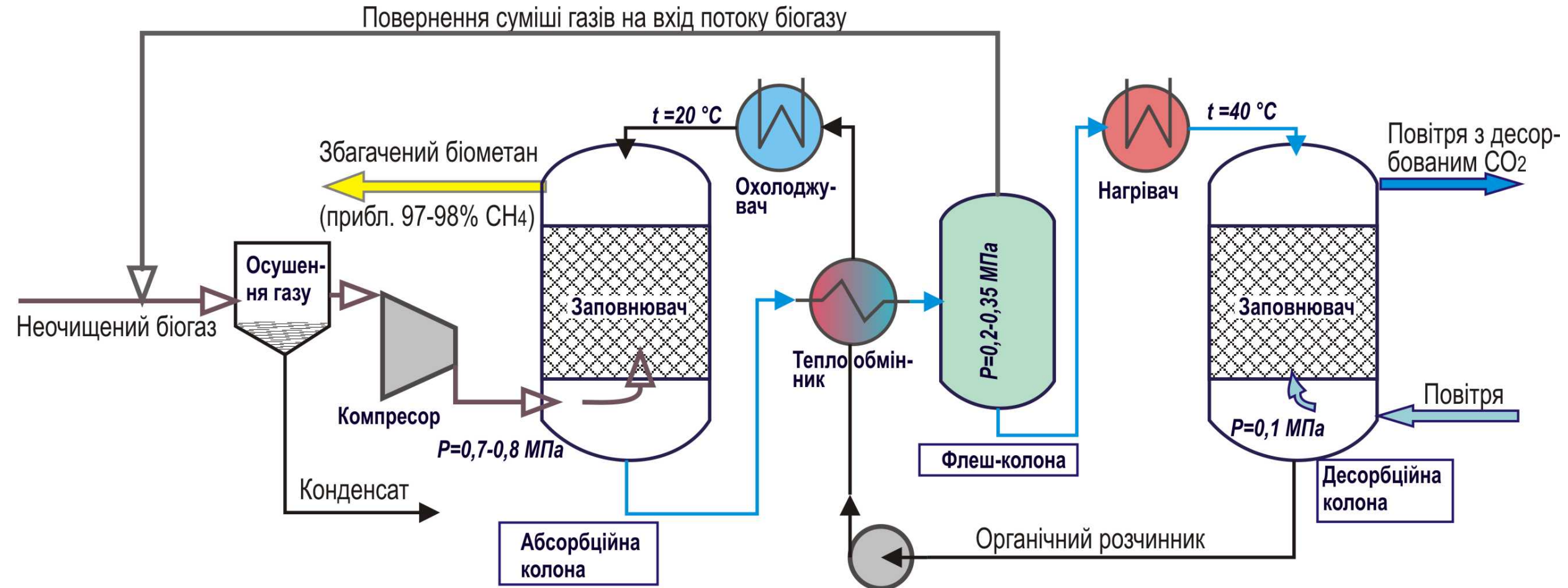


Процес базується на тому, що вуглекислий газ значно (приблизно в 26 разів) краще розчиняється у воді, ніж метан. Збільшення тиску сприяє розчиненню вуглекислого газу. Збільшення температури, навпаки, цьому заважає. Використовується лише вода, без додавання інших хімічних сполук.

Абсорбція водою (водяний скруббер, HPWS) – приклади діючих установок



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

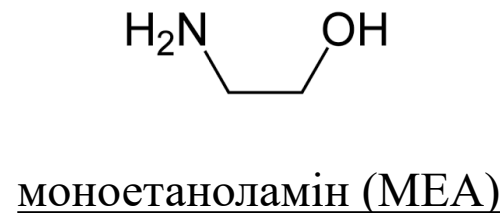
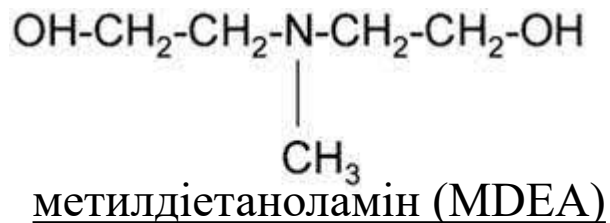
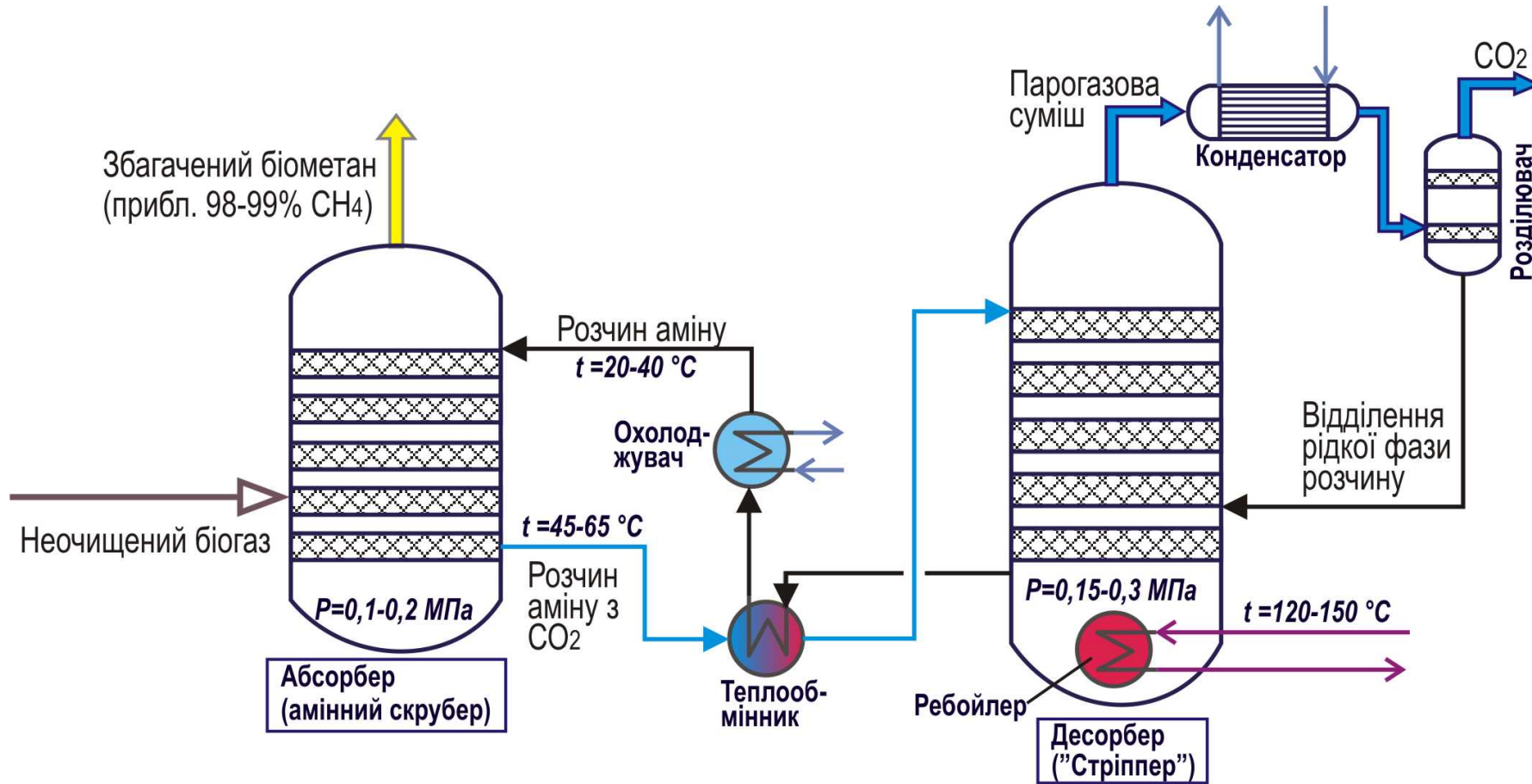


Процес та обладнання схожі на водяний скруббер, але на основі органічних розчинників. Розчинники: Селексол, Геносорб- суміш диметиллових ефірів поліетиленгліколю. Розчинність CO₂ в них більша в кілька разів, ніж у воді. Також використовують метанол, N-метилпіролідон.

Органічний фізичний скруббер (PS) – приклади діючих установок



Хімічна абсорбція (амінний скрубер, CS) [11, 12, 13]



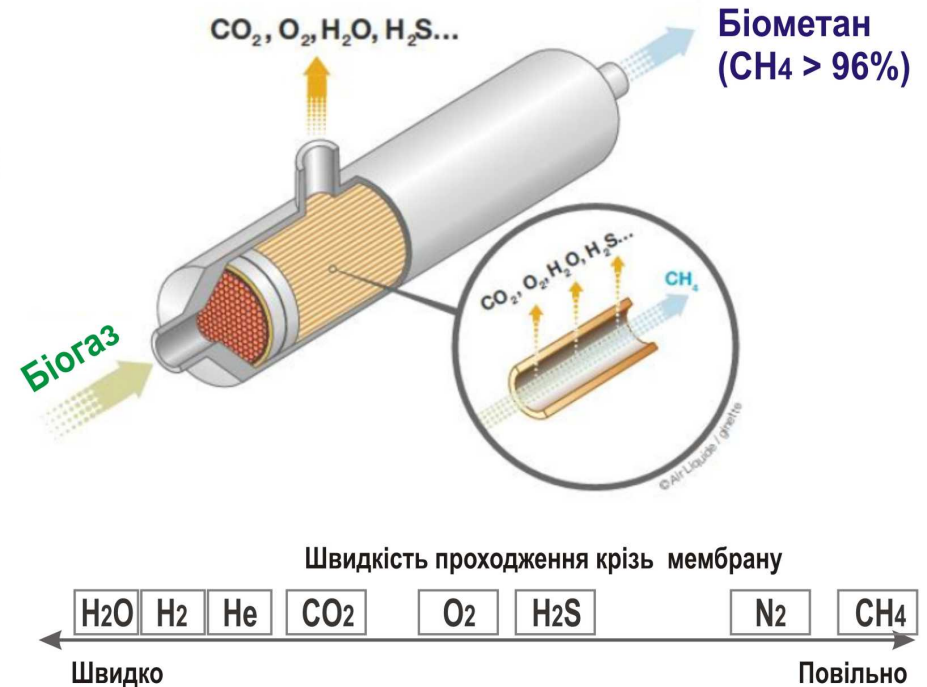
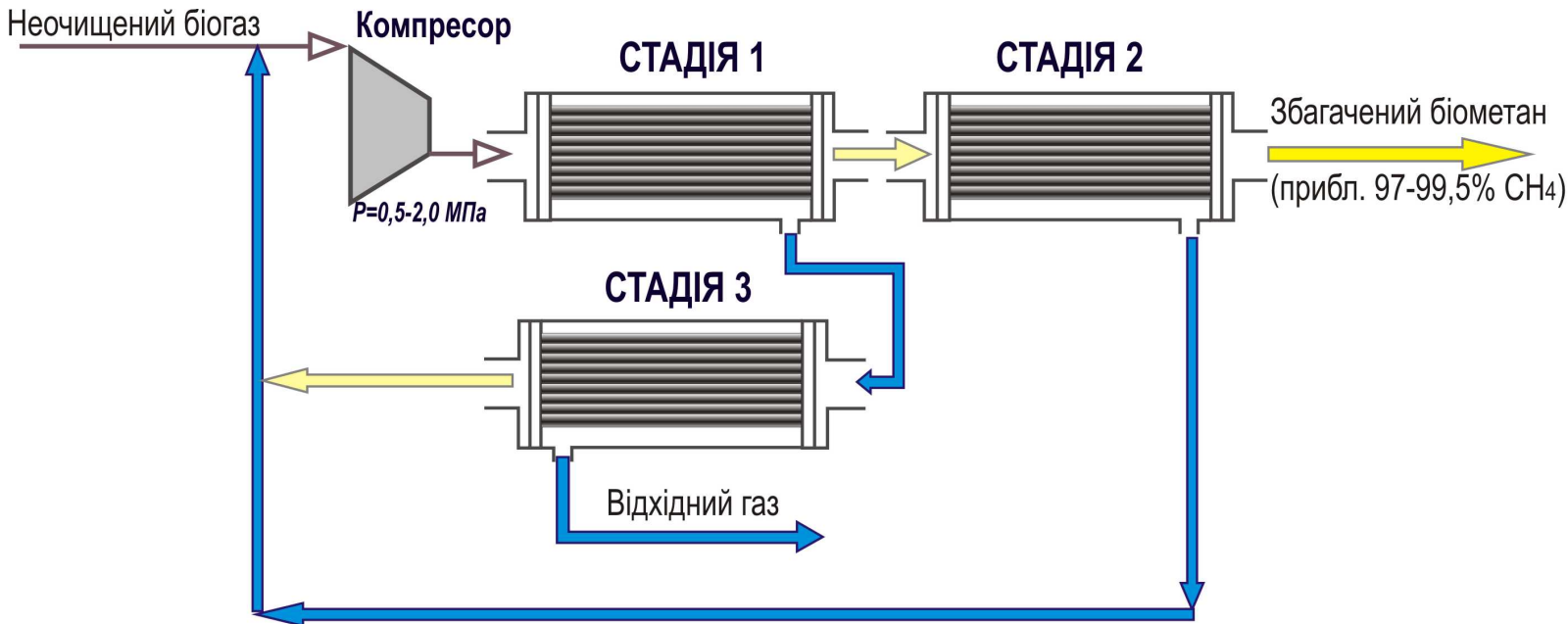
Основна особливість цієї технології полягає у використанні реагенту, який **хімічно** зв'язується з молекулами CO_2 , видаляючи їх з газу. Найчастіше для цього використовують водний розчин амінів. Для видалення вуглекислого газу та сірководню використовують метилдіетаноламін (MDEA), діетиламін (DEA) і моноетаноламін (MEA). Найпоширенішою амінною системою на даний час є суміш MDEA та піперазину (PZ), яку часто називають активованою MDEA (aMDEA).



*Хімічна абсорбція
(амінний
скруббер, CS) –
приклади діючих
установок*



Мембранна сепарація (MS) [11, 12, 13]



Типи мембран: Органічні (полімерні, макромолекулярні), Неорганічні (металічні, керамічні, скляні).

Неорганічні- можуть бути пористі (силікати, цеоліти, керамічні) та непористі (металічні, полікристалічна кераміка).

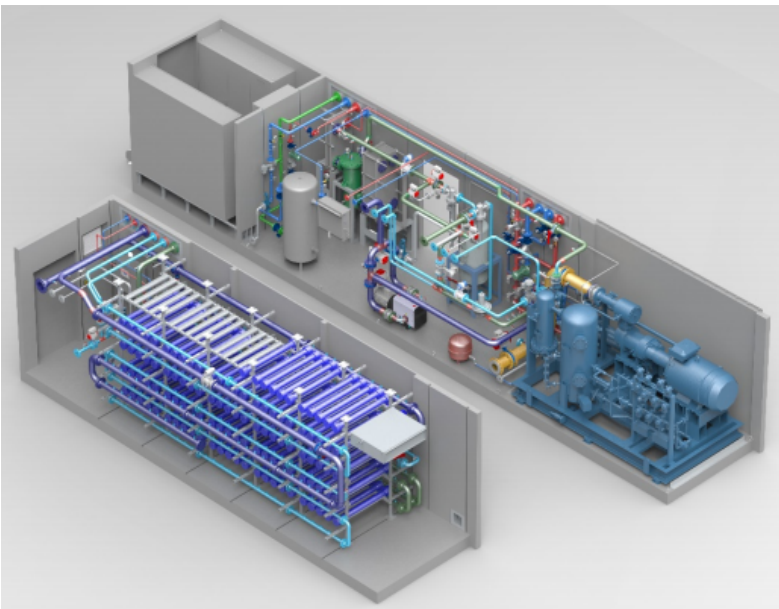
Нанокompозитні мембрани (із змішаною матрицею).

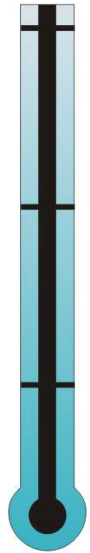
За формою: плоскі, порожнистоволоконні, капілярні, трубчасті.

Відомі марки та виробники мембран: Air Liquide Medal™, SEPURAN® (Evonik), UBE Membranes, MTR, Air products, Airrane, UOP Separex, Natco Cynara, Toray Industries.



*Мембранна сепарація
(MS) – приклади
діючих
установок*





0 °C

-60 °C сірководень (H_2S)

-78 °C двоокис вуглецю (CO_2)

-161 °C метан (CH_4)

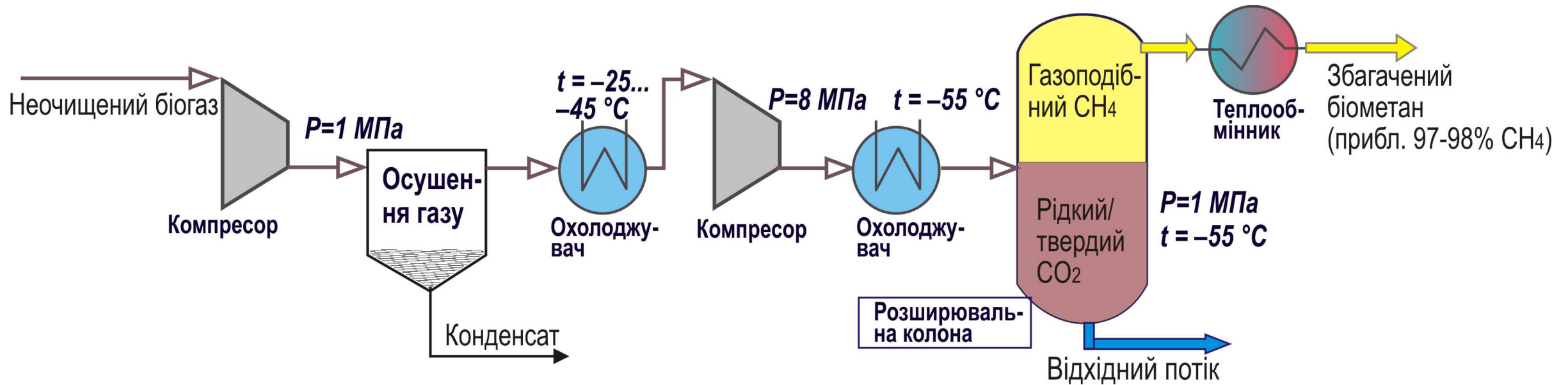
-183 °C кисень (O_2)

-196 °C азот (N_2)

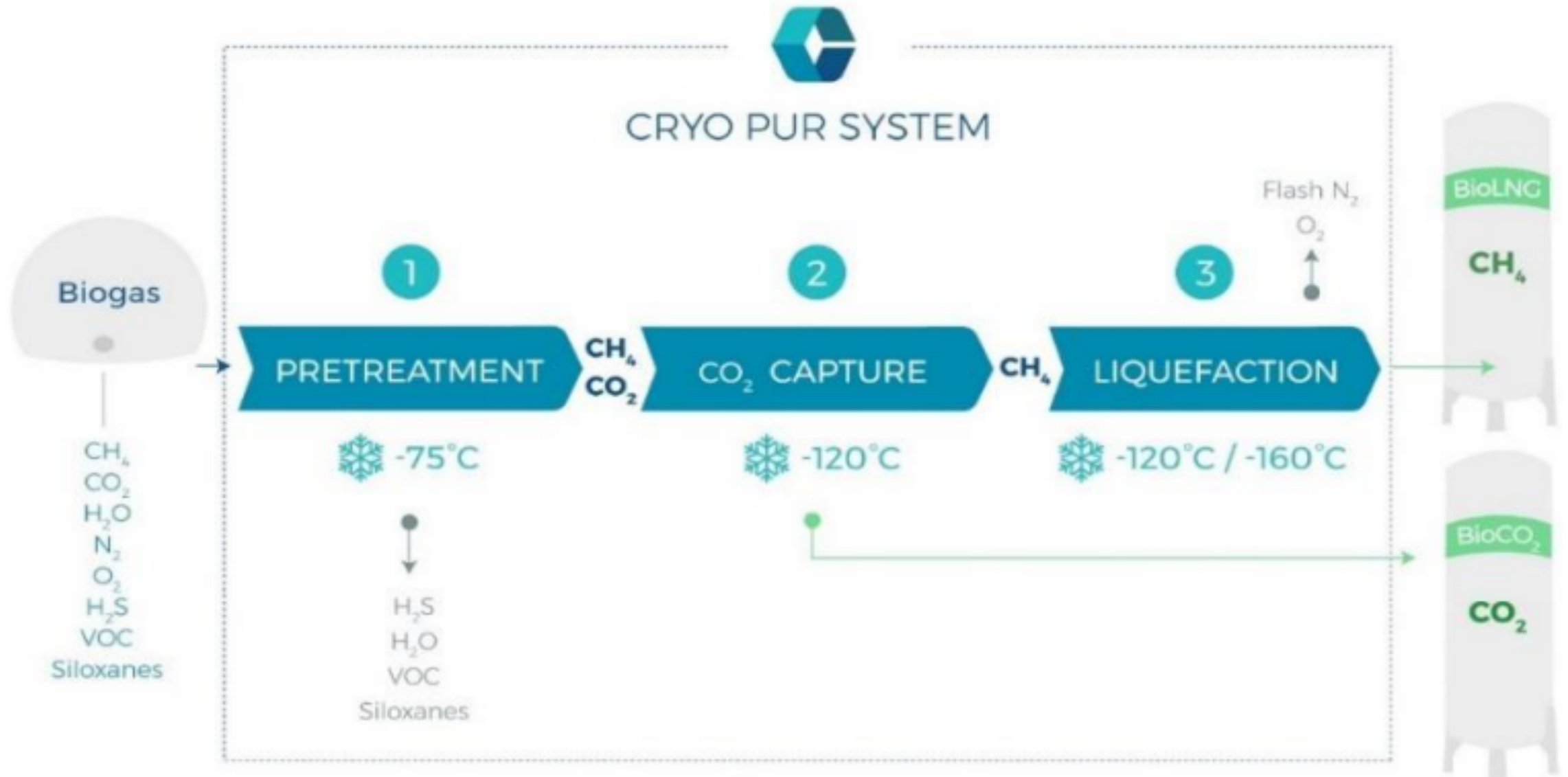
-273 °C абс.нуль

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 °C у чотири етапи, що включають стискання і охолодження.



Комбінований процес збагачення біогазу, зрідження біометану та отримання зрідженого CO₂ від компанії Cryo Pur



*Кріогенна сепарація (CrS) –
прикладі діючих установок*

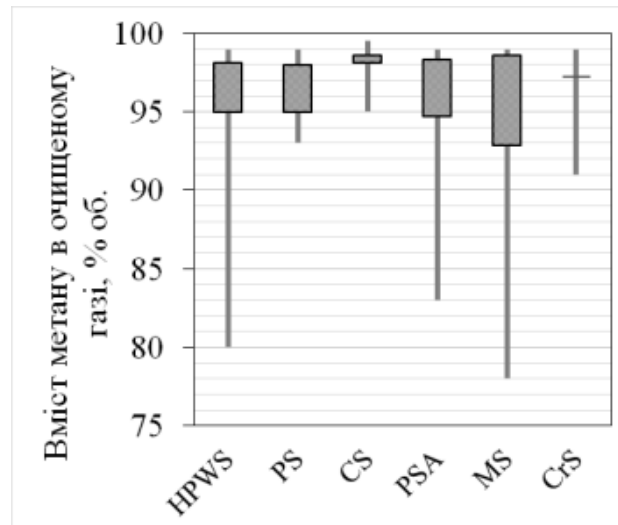


Основні виробничі характеристики технологій збагачення біогазу [20, 21]

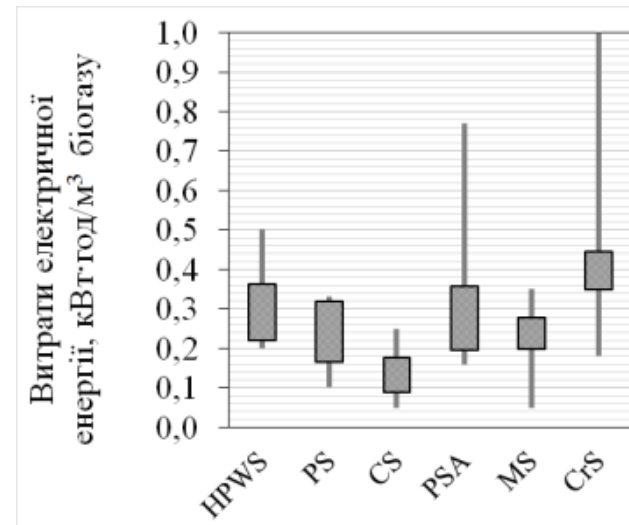
Параметр	PSA	HPWS	PS	CS	MS	CrS
Діапазон продуктивності технології, м ³ /годину· біометану (м ³ /годину біогазу)	300-800 (600-1500)	200-1200 (400-2200)	300-1500 (600-2800)	400-2000 (700-3700)	50-500 (100-900)	н/д
Масштаби підприємств	малі, середні	середні, великі	середні, великі	середні, великі	малі, середні	великі
Питома потреба в площі та висота обладнання,	(м ² площі/м ³ 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 ³ 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 H ₂ S	можливе	так	можливе	ні (забруднювач)	можливе	так
Одночасне вловлювання N ₂ та O ₂	можливе	ні	ні	ні	частково	так

Основні виробничі характеристики технологій збагачення біогазу [20, 21]

Параметр	PSA	HPWS	PS	CS	MS	CrS
Необхідність обробки відхідних газів	так	так	так	ні	так	так
Необхідність у воді	ні	так	ні	так	ні	ні
Потреба у витратних матеріалах	Активоване вугілля (безпечне)	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



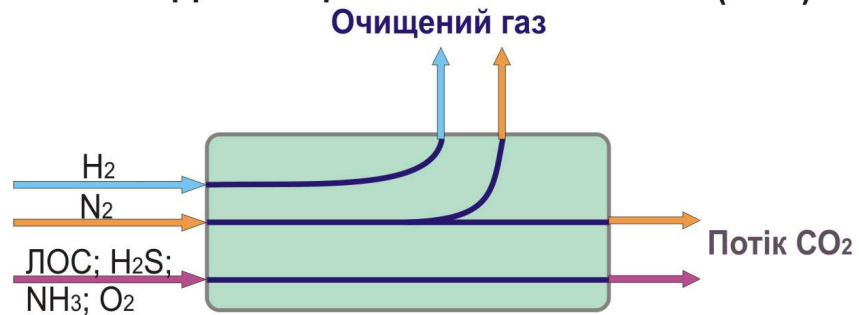
а) ступінь чистоти отриманого біометану



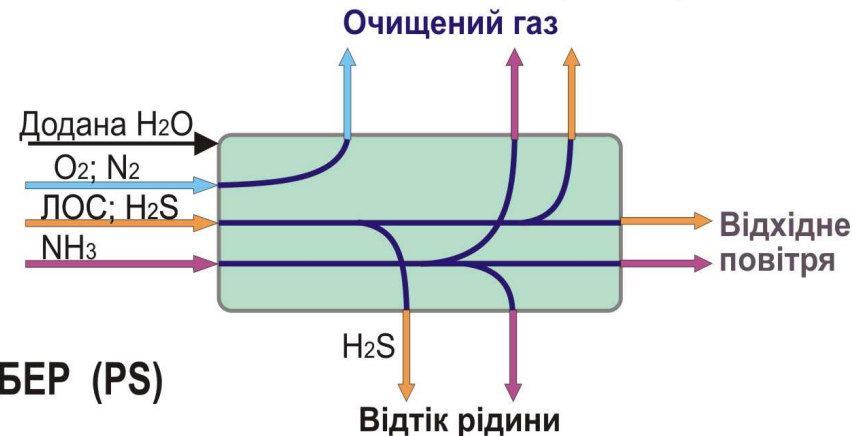
б) питомі витрати електричної енергії

Розподіл потоків основних домішок (крім CO_2)

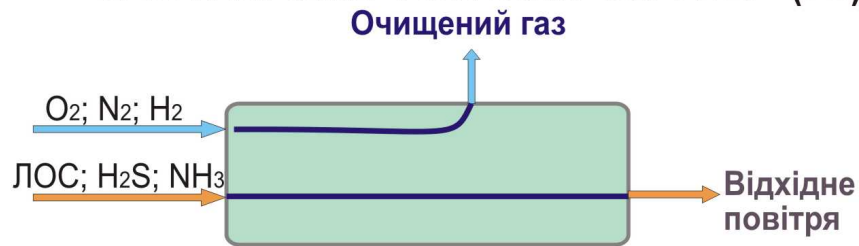
1. АДСОРБЦІЯ ЗІ ЗМІНОЮ ТИСКУ (PSA)



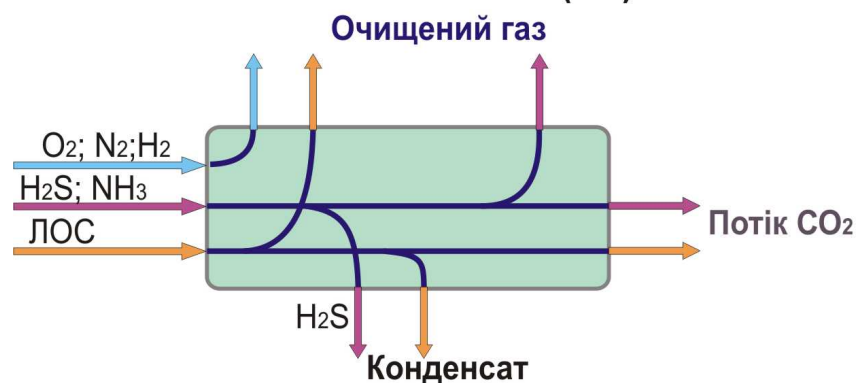
2. ВОДЯНИЙ СКРУБЕР (HPWS)



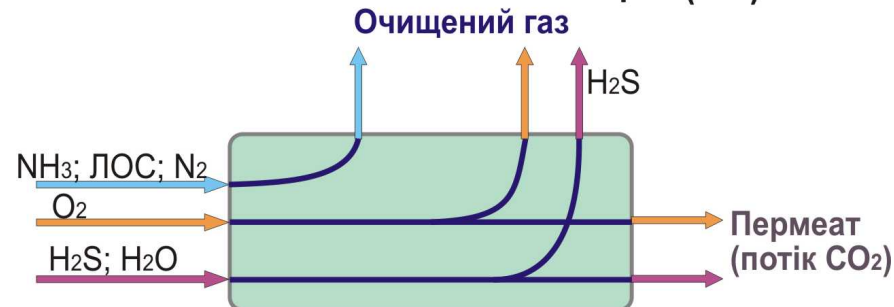
3. ОРГАНІЧНИЙ ФІЗИЧНИЙ СКРУБЕР (PS)



4. АМІННИЙ СКРУБЕР (CS)



5. МЕМБРАННА СЕПАРАЦІЯ (MS)



Вимоги до якості сирого біогазу (допустимі концентрації домішок)

Техно-логія	H ₂ S	O ₂ , N ₂ , H ₂	ЛОС	NH ₃
PSA	Низькі концентрації	Переходять у потік CO ₂ , H ₂ переходить у очищений продукт	Треба видаляти в сирому біогазі	Треба видаляти в сирому біогазі
HPWS	Помірні концентрації; основна частина переходить у відхідне повітря	Переходять у очищений продукт	Помірні концентрації; основна частина видаляється разом з конденсатом і повітрям десорбера	Помірні концентрації; основна частина видаляється з технологічною водою
CS	Помірні концентрації; основна частина передається в потік CO ₂ ; для очищеного продукту може знадобитися додатковий фільтр очистки	Переходять у очищений продукт	Помірні концентрації; основна частина видаляється з конденсатом і потоком CO ₂	Помірні концентрації; основна частина переходить в потік CO ₂
PS	Помірні концентрації; основна частина переходить у відхідне повітря	Переходять у очищений продукт	Помірні концентрації; основна частина переходить у відхідне повітря	Помірні концентрації; основна частина переходить у відхідне повітря
MS	Низькі концентрації; частково переходить у очищений продукт	Переходять у очищений продукт і в потік CO ₂	Треба видаляти в сирому біогазі	Зазвичай видаляється разом з конденсатом при осушуванні сирого біогазу
CrS	Помірні концентрації; видаляється під час першого етапу охолодження	Переходять у очищений продукт	Від помірних до високих концентрацій; видаляється під час першого етапу охолодження	Від помірних до високих концентрацій; видаляється під час першого етапу охолодження

Переваги та недоліки технологій основного очищення біогазу

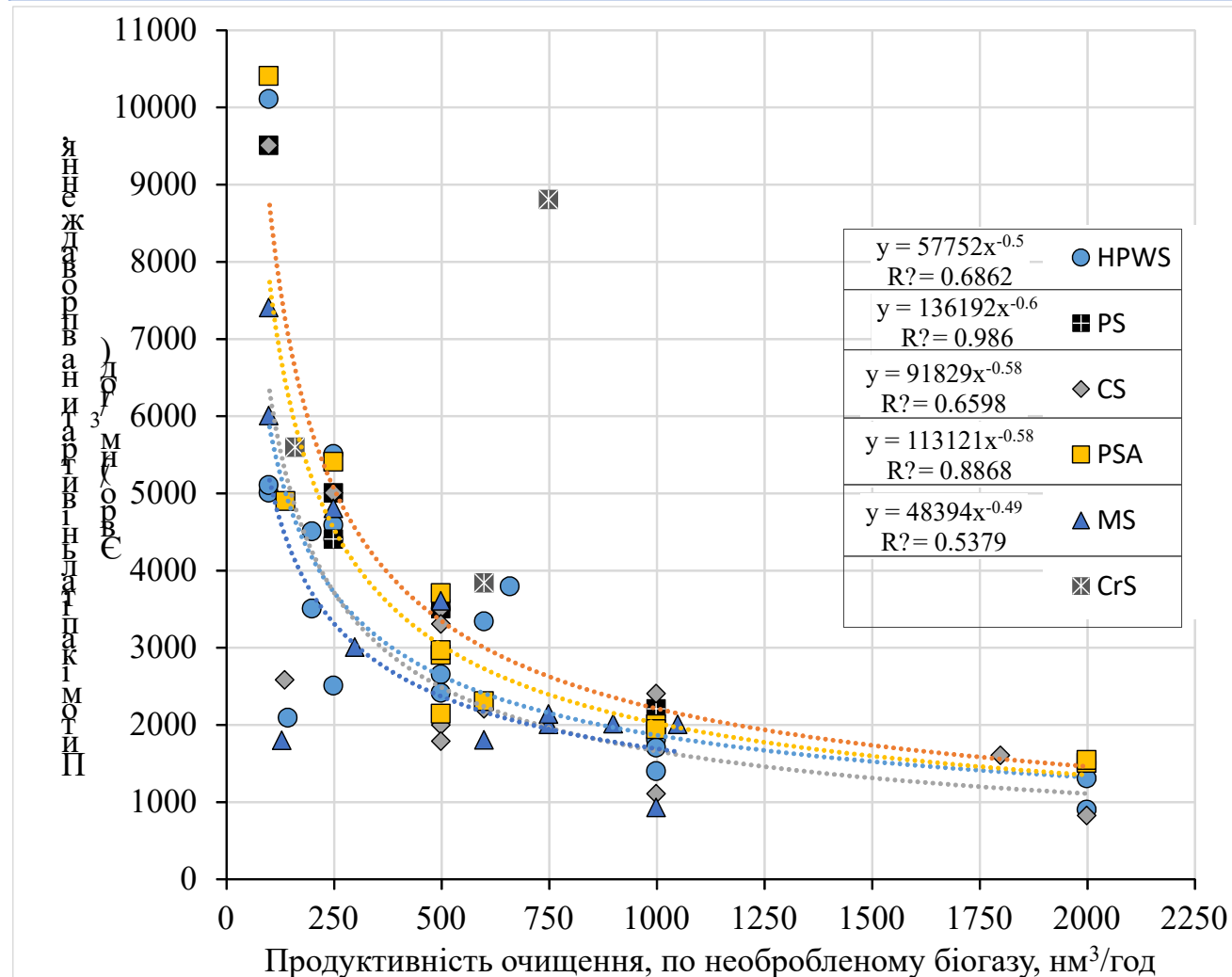
Технологія	Переваги	Недоліки
HPWS	Комбіноване видалення CO ₂ та H ₂ S; низькі втрати метану (<2%); використану воду можна регенерувати; стійкість до домішок; простота управління; відсутність хімікатів.	Низька інтенсивність процесу; можливе засмічення та піноутворення, викликане зростанням мікробної біомаси; можлива корозія, викликана H ₂ S; потрібна велика кількість води навіть за умови її регенерації.
PS	Комбіноване видалення CO ₂ , H ₂ S, HCN, H ₂ O; Низькі втрати CH ₄ ; енергоефективніший процес, ніж у водяному скрубєрі, що вимагає меншої площі розміщення.	Для невеликих продуктивностей спосіб дорогий; додаткова витрата теплової енергії на регенерацію розчинника; розчинник дорогий і вимагає спеціального поводження.
CS	Висока концентрація CH ₄ в біометані за рахунок високої вибірковості поглинання розчинником; дуже низькі втрати CH ₄ (<0,1%); весь H ₂ S видалити за низького тиску; швидший процес, ніж у водяному скрубєрі, і регенерувати.	Для регенерації розчинника необхідна теплота в кількості 0,4-0,8 кВт·год/м ³ біогазу; розчинник дорогий, його не можна зливати в навколишнє середовище; корозія, розкладання розчинника, спінювання, випадання солей.

Переваги та недоліки технологій основного очищення біогазу

Технологія	Переваги	Недоліки
PSA	Комбіноване видалення CO ₂ , N ₂ та O ₂ ; компактна технологія, доступна для невеликих масштабів; швидкий монтаж і запуск; низька потреба в енергії; немає потреби в хімікатах.	Потрібне попереднє видалення H ₂ S і H ₂ O; домішки можуть спричинити забруднення та незручності в роботі; вимагає тонкого настроювання систем регулювання тиску; високі механічні навантаження на обладнання.
MS	Комбіноване видалення CO ₂ , H ₂ S, H ₂ O; масштабування для невеликих установок; послідовним встановленням 2-3 ступенів мембранного очищення можна досягти високої чистоти біометану (>99%); надійна конструкція, не використовуються хімікати; просте обслуговування.	Низька селективність мембран; низький вихід CH ₄ в одностадійному мембранному процесі (для біометану високої чистоти необхідні кілька етапів мембранного очищення); можливі втрати метану (до 10%); розділення необхідна доочистка біометану від H ₂ S.
CrS	Високий ступінь розділення, отримання чистоти, який можна виробляти для використання; низькі додаткові витрати енергії для охолодження; чистий, без додаткових хімікатів.	Високі інвестиційні, експлуатаційні витрати та витрати на подальшого обслуговування; велика потреба в енергії для залишки CO ₂ можуть залишатися в CH ₄ ; виробництва рідкого біометану (bio-LNG); екологічно призводячи до поломок на стадії зрідження метану.

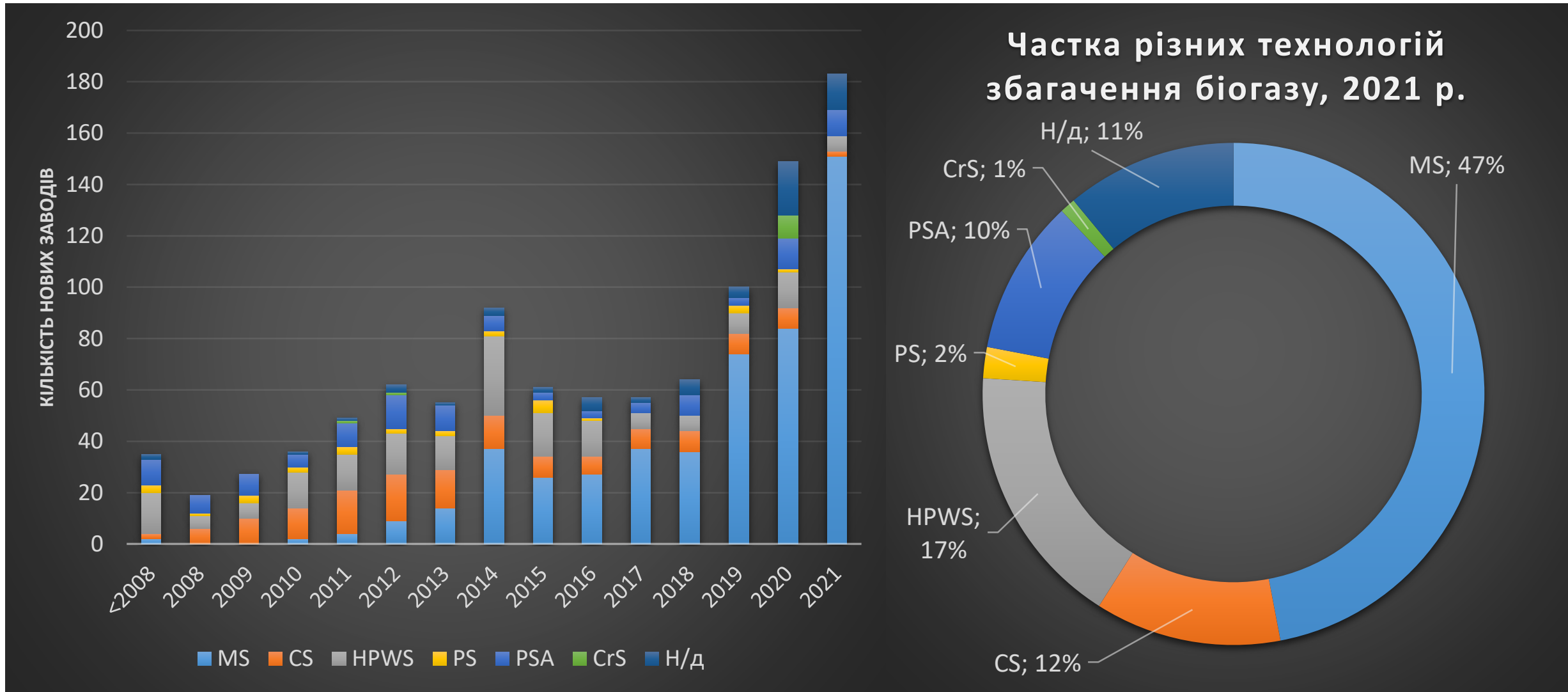
Питомі виробничі витрати для різних технологій, €-цент/м³ біометану [20, 22]

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



Питомі капітальні витрати,
Євро/(м³/год)

Статистика ЄС щодо впровадження різних технологій збагачення біогазу



Мембранні технології зайняли 47% від загального числа установок збагачення біометану в Європі. В 2020 р. цей показник становив 39%

Виробники установок та постачальники технологій збагачення біогазу

Технологія	Назва компанії	Вебсайт
	Gastreatment Services Bv (Gts)	https://www.gtsbv.com
CrS	Ammongas	https://www.ammongas.com
CS	HERA Cleantech	https://heracleantech.com
CS	Wartsila	https://www.wartsila.com
CS, MS	Arol Energy	https://www.arol-energy.com/en/membrane-technology/
CS, PSA, MS	Galileo	https://www.galileoar.com
HPWS	Biosling AB	http://biosling.se
HPWS, PSA	DGE GmbH	https://www.dge-wittenberg.de
HPWS, PSA	FirmGreen	https://firmgreen.com
HPWS, PSA, MS	Greenlane Renewables	https://greenlanerenewables.com
	AB IMPIANTI S.r.l.	https://www.gruppoab.com
MS	AgriKomp	https://agrikomp.com
MS	Air Liquide	https://energies.airliquide.com
MS	Air Products	https://www.airproducts.co.uk
MS	Bright	https://www.bright-rng.com
MS	DMT	https://www.dmt-et.com
MS	EcoProtech	https://ecoprotech.fi
MS	Eneraque	https://eneraque.com
MS	EnviTec Biogas	https://www.envitec-biogas.com

Технологія	Назва компанії	Вебсайт
MS	ESI	https://www.esisolutions.com
MS	FNX	https://fnxlng.com
	Gastechnik Himmel (GTH)	https://gt-himmel.com
MS	Guild associates	https://www.guildassociates.com
MS	Himmel	https://gt-himmel.com
MS	Hitachi Zosen Inova	https://www.hz-inova.com
MS	LATEC	https://latecsrl.it
MS	MEGA	https://www.mega.cz
MS	Nacelle	https://nacellesolutions.com
MS	Pentair	https://foodandbeverage.pentair.com
MS	Prodeval	https://www.prodeval.com
MS	Rovi Energie	https://www.rovi-energie.com
MS	Siga-Tech	http://www.sigatech.pl
	TECNO PROJECT INDUSTRIALE	https://www.tecnoproject.com
MS	Gm Green Methane S.R.L.	https://www.greenmethane.it
	Schwelm	
PS	Anlagentechnik GmbH	https://www.schwelm-at.de
PSA	Carbotech	https://ct-gs.com
PSA	ETW Energietechnik	https://etw-energie.de
PSA	Mahler AGS	https://www.mahler-ag.com
PSA	Xebec	https://xebecinc.com
VSA	Sysadvance	https://sysadvance.com

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 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 перспективною 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](https://doi.org/10.1016/j.eoet.2022.100000). 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.

Література

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.

Література

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.