

Гелетуха Георгій,
Матвеев Юрій,
Кучерук Петро,
Драгнев Семен,
Крамар Володимир,
Пастух Анна

UABIO

Виробництво біометану в Україні:

МОЖЛИВОСТІ ТА ВИКЛИКИ



Видавець:

KVP Project Ukraine
Біоенергетична асоціація України (UABIO)

вул. Марії Капніст, 2-А, оф. 236
03057, м. Київ, Україна
info@uabio.org
www.uabio.org

Редактор:

Biogas Association Partnerships /
Біоенергетична асоціація України (UABIO)

Автори:

Гелету́ха Гео́ргій, Матвеєв Ю́рій,
Кучеру́к Петро, Драгне́в Семен,
Крама́р Володи́мир, Пасту́х Анна

Дизайн:

Катерина Яковлева

Фото:

KVP Project Ukraine,
Johanna Lohr

Права інтелектуальної власності

Усі права інтелектуальної власності на матеріали цієї публікації належать KVP Project Ukraine.

Жодна частина цієї публікації не може бути відтворена, поширена, перекладена чи використана будь-яким способом без попереднього письмового дозволу правовласника, крім випадків, прямо передбачених законодавством України.

Будь-яке неправомірне використання матеріалів є порушенням прав інтелектуальної власності і може стати підставою для цивільної, адміністративної або кримінальної відповідальності відповідно до чинного законодавства України.

Дозвіл на відтворення чи використання матеріалів надається KVP Project Ukraine письмово.

Статус:

10/2025

ВСТУПНЕ СЛОВО

Шановні колеги, партнери та друзі!

Сьогодні в Україні сформовано унікальні можливості: трансформувати свій енергетичний сектор у напрямку сталого розвитку, підвищити енергетичну безпеку та стати надійним постачальником відновлюваної енергії для Європи. Одним із ключових інструментів цієї трансформації є виробництво біометану.

Біометан — це відновлюваний газ, що за своїми характеристиками є аналогом природного газу, але при цьому має суттєві кліматичні та економічні переваги. Він здатен замінити імпортоване викопне паливо, забезпечити стабільне функціонування аграрного сектору та створити нові робочі місця. У світі, де питання декарбонізації та кліматичної нейтральності стають першочерговими, біометан стає не лише енергетичним ресурсом, а й стратегічною можливістю для України.

Разом із тим, шлях розвитку біометану супроводжується низкою викликів: відсутністю довгострокової державної стратегії, потребою у вдосконаленні нормативної бази, недостатнім розвитком інфраструктури. Для подолання цих бар'єрів необхідна тісна співпраця між державою, бізнесом, науковою спільнотою та міжнародними партнерами.

Ця брошура має на меті представити комплексне бачення потенціалу виробництва біометану в Україні — від сировинної бази та технологій до економічних перспектив і можливостей експорту. Ми прагнемо, щоб вона стала практичним інструментом для інвесторів, розробників проєктів, політиків і всіх, хто зацікавлений у розвитку відновлюваної енергетики.

Вірю, що розвиток виробництва біометану стане важливим кроком до енергетичної незалежності та кліматичної нейтральності України, а також інтеграції нашої країни до європейського енергетичного простору.



З найкращими побажаннями,

Георгій Гелету́ха
Голова правління
Біоенергетичної асоціації України

ЗМІСТ

Вступне слово	3	3. Технології виробництва, очищення та збагачення біогазу	28
Зміст	4	3.1	Процес утворення біогазу 29
1. Вступ	6	3.2	Огляд технологій виробництва біогазу та відновлюваного метану 34
1.1	Що таке біометан? 6	3.3	Технології очищення та збагачення біогазу 41
1.2	Основні переваги біометану як відновлюваного джерела енергії 7	3.4	Використання біометану: подача в газові мережі, виробництво стисненого та зрідженого біометану 48
2. Потенціал сировини для виробництва біометану	9	4. Економічний потенціал біометану	55
2.1	Основні джерела походження, види та класифікація сировини, придатної для виробництва біогазу 10	4.1	Економіка біометанових проєктів 56
2.2	Огляд потенціалу виробництва біометану та наявної сировини в Україні 14	4.2	Сфери застосування біометану: виробництво електричної та теплової енергії, експорт, застосування у промисловості 67
2.3	Проміжні культури: потенціал для виробництва біометану 22	4.3	Експортний потенціал українського біометану і його конкурентоспроможність на міжнародних ринках 74
2.4	Сталість виробництва біометану 25	Висновки	77

Перелік скорочень

БР	балансуючий ринок	НAc	оцтова кислота
БАУ	Біоенергетична асоціація України	HPr	пропіонова кислота
Біо-CNG	стиснений біометан	H₂	водень
Біо-LNG	зріджений біометан	HPWS	абсорбція водою, водяний скрубер
ВДР	внутрішньодобовий ринок	MS	мембранна сепарація
ВРХ	велика рогата худоба	OPEX	експлуатаційні витрати
ГТС	газотранспортна система	PS	фізичний скрубер
ГРМ	газорозподільні мережі	PoS	доказ сталості
ГРС	газорозподільчі станції	PSA	адсорбція зі зміною тиску
ДД	двосторонні договори	PFR	поршневий реактор
д-ЛЖК	довголанцюгові жирні кислоти	RED II	Директива Європейського Парламенту і Ради (ЄС) 2018/2001 від 11 грудня 2018 року про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел
КГУ	когенераційна установка	RED III	Директива (ЄС) 2023/2413 Європейського Парламенту та Ради від 18 жовтня 2023 року про внесення змін до Директиви (ЄС) 2018/2001, Регламенту (ЄС) 2018/1999 та Директиви 98/70/ЄС про стимулювання використання енергії з відновлюваних джерел та скасування Директиви Ради (ЄС) 2015/652
ЛЦК	лігно-целюлозні комплекси	UDB	Union Database , база даних Європейського Союзу, яка спрямована на забезпечення відстеження рідкого та газоподібного відновлюваного палива та переробленого вуглецевого палива
МРХ	мала рогата худоба	USD	долари США
нм³	нормальні кубічні метри	% об.	відсоток об'єму (об'ємна частка) — міра концентрації газу або речовини у суміші, яка показує, скільки відсотків об'єму загальної суміші займає певний компонент
oTPB	органічна фракція твердих побутових відходів		
ПГ	парникові гази		
ПП	побічні продукти		
ПcГ	підземні сховища газу		
РДН	ринок «на добу наперед»		
СВ	стічні води		
CoP	суха органічна речовина		
СПАР	синтетичні поверхнево-активні речовини		
ТПВ	тверді побутові відходи		
CAPEX	інвестиційні витрати		
CBAM	механізм прикордонного вуглецевого коригування		
CO₂	вуглекислий газ (двоокис вуглецю)		
CrS	кріогенна сепарація		
CS	хімічна абсорбція		
CSTR	реактор з безперервним перемішуванням		
EU ETS	Європейська система торгівлі викидами		

1.1

Біогаз – це суміш газів, що утворюється в результаті розкладання органічної речовини, основними компонентами якого є метан (CH_4) та вуглекислий газ (CO_2). Біометан, у свою чергу, – це очищений біогаз, з якого видалено вуглекислий газ та домішки.

Біометан очищують до концентрації метану щонайменше 96–98% об., що робить його порівнянним за властивостями з викопним природним газом. Біометан виробляють шляхом анаеробного зброджування (тобто без доступу кисню) органічних матеріалів – залишків сільськогосподарських культур, гною, харчових відходів, осаду стічних вод, або шляхом газифікації твердої біомаси з подальшим метануванням.

На відміну від викопного природного газу, біометан є відновлюваним джерелом енергії, оскільки отримується з біомаси. Високий вміст метану забезпечує подібні до природного газу властивості та енергетичну цінність – теплотворна здатність біометану становить близько 9,5–10 кВт·год/м³.

За умови сталого виробництва, біометан може забезпечувати значно нижчі викиди парникових газів протягом усього життєвого циклу, порівняно з природним газом. У деяких випадках він може бути навіть вуглецево-негативним, завдяки утилізації відходів та запобіганню неконтрольованим викидам метану, що виникають під час їх розкладання.

Що таке біометан?

Сфери застосування біометану.

Біометан є універсальним видом палива, яке може використовуватися в тих самих сферах, що й природний газ:

Біометан є
універсальним
видом палива,
яке може
використовуватися
в тих самих
сферах, що й
природний газ

Опалення та приготування їжі.

Біометан придатний для використання у житлових, комерційних та промислових будівлях для обігріву приміщень та води, а також для приготування їжі. Він може безпосередньо використовуватися в існуючих газових приладах та інфраструктурі.

Паливо для транспорту. Біометан може бути стиснений (біо-CNG) або зріджений (біо-LNG) та використовуватись як паливо для транспортних засобів, включаючи

легкові автомобілі, автобуси, вантажівки та судна, пропонуючи альтернативу бензину та дизельному паливу з нижчими викидами шкідливих забруднюючих речовин та парникових газів.

Виробництво електроенергії.

Біометан може використовуватися для виробництва електроенергії в когенераційних установках або газових турбінах. Потенційно він є диспетчеризованим (керованим та гнучким) відновлюваним джерелом енергії, здатним доповнювати непостійні джерела, такі як сонячна та вітрова енергія. На відміну від отримання сонячної або вітрової енергії, виробництво біометану майже не залежить від погодних умов, що може

забезпечити стабільне постачання електроенергії протягом усього року.

Промислові процеси. Багато промислових процесів, що потребують тепла або пари, можуть використовувати біометан як чистішу альтернативу викопному паливу. Він також може слугувати сировиною в хімічній промисловості.

Закачування в газові мережі. Після очищення до необхідних стандартів, біометан може бути поданий в існуючу газотранспортну систему або газорозподільні мережі та доставлений до кінцевих споживачів за допомогою наявної інфраструктури або може експортуватися.

1.2

Основні переваги біометану як відновлюваного джерела енергії

Виробництво біометану дозволяє отримати низку вагомих переваг, що робить його важливим елементом у переході до більш стійких енергетичних систем. Основні переваги біометану як відновлюваного джерела енергії включають наступне:

Суттєве скорочення викидів парникових газів.

Через використання органічних відходів, які в іншому випадку розкладалися б і виділяли метан (потужний парниковий газ) в атмосферу, виробництво біометану дозволяє значно знизити загальний рівень викидів парникових газів. У деяких випадках, наприклад, при запобіганні викидам метану з полігонів твердих побутових відходів або сільськогосподарських джерел, біометан може мати навіть

негативний вуглецевий баланс. Крім того, заміна викопного природного газу біометаном безпосередньо скорочує вуглецевий слід при виробництві електроенергії, використанні для опалення або транспорту.

Управління відходами та циркулярна економіка.

Виробництво біометану забезпечує ефективне та стале рішення для управління різними потоками органічних відходів, включаючи сільськогосподарські залишки (гній, рештки врожаю), харчові відходи домогосподарств та промисловості, а також осад стічних вод. Це зменшує обсяг відходів, що потрапляють на полігони та звалища, дозволяє зберегти їхній ресурс і мінімізує екологічні проблеми, пов'язані з утилізацією відходів.

У процесі виробництва утворюється дигестат – побічний продукт, багатий на поживні речовини, який можна використовувати як біодобриво або покращувач ґрунтів, замикаючи коло й сприяючи розвитку циркулярної економіки.

Енергетична безпека та незалежність.

Виробництво енергії з місцево доступних ресурсів може підвищити енергетичну безпеку регіону та зменшити його залежність від імпортованого викопного палива, що часто є вразливим до цінових коливань та геополітичної нестабільності. Зазначене локалізоване виробництво здатне зробити внесок у формування більш стійких і надійних енергетичних систем. На внутрішньому українському ринку біометан може сприяти частковому зменшенню імпорту природного газу з країн ЄС, а також частковому заміщенню природного газу власного видобутку.

Універсальність застосування та сумісність з інфраструктурою.

Біометан хімічно подібний до викопного природного газу, що дозволяє використовувати його практично у всіх тих самих сферах. Це включає опалення та охолодження, виробництво електроенергії (в газових турбінах і когенераційних установках), а також як паливо для транспорту (у вигляді стисненого або зрідженого біометану). Важливо, що біометан можна закачувати в наявні газопроводи та використовувати в існуючих приладах і інфраструктурі, що зменшує потребу у створенні нової інфраструктури.

Підтримка сільської економіки та створення робочих місць. Будівництво і експлуатація установок з виробництва біометану може забезпечити нові економічні можливості та створити робочі місця, особливо в сільських районах, де зосереджено значні обсяги сировини. Це сприятиме активізації місцевої економіки та відкриє нові джерела доходу для фермерів і підприємств, що працюють у сфері поводження з відходами.

Покращення якості повітря. Під час використання як транспортного

палива біометан може сприяти зменшенню викидів шкідливих забруднюючих речовин у повітря порівняно з традиційними дизельними та бензиновими автомобілями, що позитивно впливає на якість повітря, особливо в міських районах.

Покращення ґрунту. Дигестат, що є побічним продуктом анаеробного зброджування, є цінним органічним добривом. Його використання в сільському господарстві може покращити структуру ґрунту, здатність утримувати вологу та доступність поживних речовин, що потенційно зменшує потребу в застосуванні синтетичних добрив і підтримує більш сталі методи ведення сільського господарства.

Виробництво і використання біометану є невід'ємним елементом сталого енергетичного майбутнього

Отже, виробництво та використання біометану є багатофункціональним рішенням, яке одночасно відповідає на виклики зміни клімату, ефективного управління відходами, підвищення енергетичної безпеки та стимулювання економічного розвитку, що робить його невід'ємним елементом сталого енергетичного майбутнього.

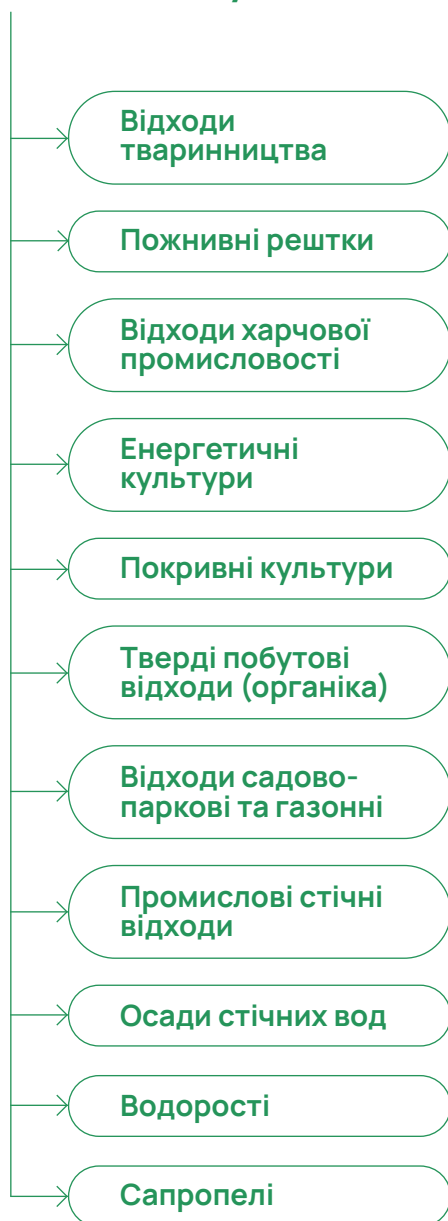


Потенціал
сировини для
виробництва
біометану

2.1

Основні джерела походження, види та класифікація сировини, придатної для виробництва біогазу

Сировина для біогазу



Для виробництва біогазу можуть використовуватися найрізноманітніші види сировини, побічних продуктів та відходів. Основні вимоги до такої сировини полягають у наступному:

вона повинна походити з відновлюваної біомаси та/або належати до сировини, побічних продуктів та відходів рослинного, тваринного або антропогенного походження;

сировина повинна містити в собі достатню частку органічної речовини, що піддається анаеробному зброджуванню;

та не повинна містити речовин-інгібіторів (тобто сполук, що гальмують або зупиняють біологічні процеси, зокрема зброджування) в концентраціях, за яких унеможлиблюється протікання процесу анаеробного зброджування.

Як показано на **рис. 1**, сировину для виробництва біогазу можна умовно поділити принаймні на **11 основних категорій за джерелом походження**.

Усі наведені категорії сировини використовуються на практиці, однак основний потенціал зосереджено на сировині аграрного походження — з секторів рослинництва та тваринництва.

Рис. 1. Основні категорії джерел походження сировини для виробництва біогазу

В агропромисловому комплексі України генеруються або можуть генеруватись п'ять окремих категорій сировини, придатної для виробництва біогазу, як показано в таблиці 1. Наведений перелік створює суттєву сировинну базу, яка дає змогу не лише виробляти значні обсяги біогазу (див. розділ 2.2), а й комбінувати або замінювати різні види сировини залежно від технологічних потреб та інших факторів впливу.

Таблиця 1. Категорії видів аграрної сировини, придатної для виробництва біогазу

Примітка: *жирним шрифтом виділено види сировини для біогазу, при використанні яких застосовується подвійний залік (по енерговмісту) у виконання цілей ЄС по частці ВДЕ на транспорті, які перелічені в явному вигляді в Додатку IX Директиви ЄС RED II¹.

№	Категорія	Об'єкти збору сировини	Приклади видів сировини
#1	Гнойові відходи тваринництва	ферми ВРХ (молочні ферми) свиноферми птахофабрики ферми МРХ, інші ферми	гній підстилковий (*) гноївка рідка послід
#2	Пожнивні рештки сільсько-господарських культур	підприємства рослинництва	солома колосових стебла та початки кукурудзи стебла та кошики соняшнику солома ріпаку солома сої бадилля цукрових буряків бадилля інших культур
#3	Побічні продукти та відходи харчової переробної промисловості	цукрові заводи спиртові заводи пивні заводи крохмале-патокові виробництва борошномельні та круп'яні заводи елеватори (зернохосовища) олійно-екстракційні заводи м'ясопереробні заводи забійні цехи консервні заводи виноробні підприємства інші виробництва	жом цукрових буряків меляса дробина пивна післяспиртова барда вичавки та відходи фруктові вичавки та відходи овочеві вичавки виноградні винний осад жмих/шрот та фуз олійні лушпиння соняшнику зернові відходи 1-3 категорій побічні продукти тваринного походження, згідно закону ² тваринні жири категорії 1 і 2 , згідно регламенту ³
#4	Енергетичні культури	підприємства рослинництва	кукурудза на силос сорго на силос сильфій пронизанолистий цукровий буряк міскантус , інші
#5	Покривні та проміжні культури	підприємства рослинництва	вика жито озиме тритикале озиме ріпа / редька бобові конюшина, інші

¹ Директива (ЄС) 2018/2001: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=EN>

² Закон України «Про побічні продукти тваринного походження, не призначені для споживання людиною»: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/287-19#Text>

³ Регламент ЄС № 1069/2009: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=cel-lex:32009R1069>

Усі зазначені вище види сировини, придатні для виробництва біогазу, можна умовно класифікувати наступним чином, як показано **в таблиці 2**.

Таблиця 2. Класифікація видів сировини для виробництва біогазу та біометану

Визначення класифікатора	Класифікація	Приклади сировини
За гідравлічними властивостями	Придатні до перекачування трубопровідними системами без додавання вологи	Гноївка свиней, барда
	Не придатні до перекачування трубопровідними системами без додавання вологи	Силос, солома, оТПВ
За кормовою та харчовою цінністю	Використовуються як корм для тварин та/або риб	Жом, шрот, макуха, барда зернова
	Використовуються як сировина для виробництва харчів та/або напоїв	Меляса, висівки, сироватка
	Придатні як корм чи сировина для харчів/напоїв, але втратили свої споживчі властивості	Кисла барда, забруднений жом
	Не придатні як корм чи сировина для харчів/напоїв	Лушпиння, гній, стебла кукурудзи
За вмістом та характером домішок	Умовно чисті види сировини	Жом, шрот, макуха, барда, меляса
	Забруднені твердими домішками (пісок, каміння, пил, метали, пір'я тощо)	Послід, солома, стебла, листя
	Біологічно забруднені патогенами, вірусами, грибами	Осади СВ, епізоотичний гній
	Біологічно забруднені насінням бур'янів	Гній ВРХ, солома, стебла
	Хімічно забруднені СПАР, антибіотиками, важкими металами, токсинами	Епізоотичний гній, міське листя, виробничі СВ, осади СВ
За хімічним складом та фізичними властивостями	Карбон-насичені (C:N > 40) – містять забагато вуглецю і недостатньо азоту для нормального зброджування	Солома, лушпиння, жири
	Нітроген-насичені (C:N < 10) – містять занадто багато азоту, що може заважати утворенню біогазу	Послід, шрот, барда зернова
	Кислі (pH < 6) – надто кисле середовище, що гальмує роботу бактерій	Жом кислий, барда зернова
	Лігно-целюлозні	Солома, лушпиння
	В'язкі	Фуз олійний, меляса

Визначення
класифікатора

Класифікація

Приклади
сировини

**За потребою
в попередній
обробці**

- Не потребують підготовки
- Потребують видалення твердих включень
- Потребують гомогенізації (перед зброджуванням сировину потрібно подрібнити та перемішати)
- Потребують руйнування ЛЦК – містять волокна, які потрібно попередньо обробити для ефективного зброджування
- Потребують попереднього розігріву
- Потребують силосування для тривалого зберігання

- Гноївка рідка, барда, жом
- Послід, жом з жомових ям
- Гній та послід на підстилці з соломи
- Солома, лушпиння, опале листя
- Фуз олійний, меляса
- Кукурудза, вологе кукурудзиння, жом, зелена рослинна біомаса

**За режимом
утворення**

- З рівномірним режимом утворення протягом року
- З нерівномірним режимом утворення протягом року
- Сезонні

- Барда, послід, жири
- Гній ВРХ, дробина пивна
- Жом, пожнивні рештки, силос кукурудзи, покривні та проміжні культури

**За категорією
біогазу та
біометану,
виробленого
з них**

- Для виробництва конвенційного біогазу та біометану
- Для виробництва передового біогазу та біометану

- Силос кукурудзи, дробина, сироватка
- Гній, послід, солома, лушпиння

Розуміння
складу та
властивостей
сировини
дозволяє
оптимально
підібрати
раціон і режим
її подачі в
біореактори

Серед важливих характеристик сировини (при розгляді її як сировини для виробництва біогазу) варто також враховувати вміст сухих речовин, зольність, концентрацію та співвідношення основних макро- і мікроелементів (зокрема C, N, P, Mg, Ca, K, S, Fe, Co, Cu, Ni, Mn, Mo, Se, W, V, Zn), а також температуру.

Розуміння складу та властивостей сировини дозволяє оптимально підібрати раціон і режим її подачі в біореактори, визначити потребу в додаванні комплементарних видів сировини, спеціальних хімічних речовин або макро- і мікронутрієнтів. Це також дає змогу обґрунтовано обрати методи й обладнання для попередньої обробки сировини, способів її зберігання, а також оцінити варіанти подальшого використання або утилізації дигестату, що утворюється в процесі зброджування.

2.2

Огляд потенціалу виробництва біометану та наявної сировини в Україні

Біометан можна потенційно виробляти з різноманітних органічних матеріалів, використовуючи різні технології. Тип сировини впливає на вибір технології, оскільки кожен процес має свої вимоги до вхідних матеріалів. Загалом, виділяють **п'ять основних технологічних шляхів виробництва біометану**, зокрема:

- 1 Виробництво біометану з «сирого» біогазу, отриманого шляхом анаеробного зброджування різних видів органічної сировини.
- 2 Виробництво біометану з «сирого» біогазу, отриманого з полігонів твердих побутових відходів.
- 3 Виробництво синтетичного біометану шляхом термічної газифікації твердої або вологої органічної сировини.
- 4 Виробництво біометану з «сирого» біогазу, отриманого шляхом «темного» бродіння.
- 5 Виробництво біометану (е-метану) з відновлюваних водню (H_2) та вуглекислого газу (CO_2) за допомогою біологічних або каталітичних процесів метанування.

Із п'яти зазначених технологічних шляхів наразі на комерційному рівні доступні лише перші три. Попри те, що в Україні вже досить активно використовується технологія збору біогазу з полігонів твердих побутових відходів, у майбутньому очікується поступовий перехід до механіко-біологічної обробки твердих побутових відходів, у складі якої буде інтегровано виробництво біогазу.

Із п'яти зазначених технологічних шляхів наразі на комерційному рівні доступні лише перші три

Далі розглянуто потенціал біометану, отриманого **за двома технологічними шляхами:**

1. біометан, вироблений в результаті анаеробного зброджування

2. біометан, отриманий шляхом термічної газифікації



Типи сировини, що розглядаються для виробництва біометану шляхом анаеробного зброджування, охоплюють наступні:

Гній великої рогатої худоби;

Гній свиней;

Послід курячий;

Гній малої рогатої худоби (вівці, кози);

Силос кукурудзи;

Покривні та проміжні культури;

Пожнивні рештки;

Побічні продукти та відходи харчової промисловості;

Осади стічних вод з міських очисних споруд;

Органічна фракція твердих побутових відходів.

Типи сировини, що розглядаються для виробництва біометану шляхом термічної газифікації або піролізу, включають деревну біомасу — зокрема енергетичні деревні культури, відходи деревообробки (тріску, тирсу), побічні продукти лісозаготівлі тощо.

Оцінений потенціал не враховує низку інших типів сировини, таких як водорості, промислові стічні води, окремі побічні продукти та відходи харчової промисловості, сапропелі, і тому може вважатися певною мірою консервативним.

Оцінений потенціал біометану розподілено на рівні областей України. Території, які станом на 2021 рік перебували під окупацією росії, не враховувалися в розрахунках через відсутність достовірних статистичних даних. Основою для оцінки потенціалу біометану з побічних продуктів і відходів різних галузей промисловості слугували офіційні державні (регіональні) статистичні дані щодо обсягів виробництва або чисельності поголів'я тварин у кожній області та районі станом на 2021 рік (останній репрезентативний рік за наявністю повних даних по Україні)⁴.

⁴ Geletukha, G., Kucheruk, P., Matveev, Y. Prospects and Potential for Biomethane Production in Ukraine. Ecological Engineering & Environmental Technology, 23(4), 67-80: <https://doi.org/10.12912/27197050/149995>

Національний рівень

Оцінений потенціал біометану з найбільш перспективних типів сировини, згаданих вище, становить 21,8 млрд $\text{нм}^3 \text{CH}_4$ на рік (див. таблицю 3 та рисунок 2).

Таблиця 3. Потенціал виробництва біометану в Україні

№	Вид біогазу	Потенціал біометану, млрд $\text{нм}^3 \text{CH}_4$ /рік	Частка потенціалу до загального, %
#1	Біогаз з поживних решток	5,21	23,9 %
#2	Біогаз з гною та посліду	0,88	4,0 %
#3	Біогаз з побічних продуктів харчової промисловості	0,78	3,6 %
#4	Біогаз з твердих побутових відходів та очисних споруд	0,55	2,5 %
#5	Біогаз з енергетичних культур (силосу кукурудзи, вирощеного на 1 млн га)	3,75	17,1 %
#6	Біогаз з проміжних та покривних культур (20% орних земель)	9,79	44,9 %
#7	Біогаз з біомаси, отриманий шляхом термічної газифікації (10% деревної сировини)	0,89	4,1 %
усього		21,8	100 %

Осади
стічних вод
та оТПВ

0,55

Побічні продукти
харчової
промисловості

0,78

Гній,
послід

0,88

Пожнивні
рештки

5,21

Енергетичні
культури

3,75

Термічна
газифікація
деревної біомаси

0,89

Покривні / проміжні
культури

9,79

Рис. 2. Розподіл потенціалу
біометану за видами сировини

Значна частина потенціалу виробництва біометану припадає на проміжні та покривні культури (майже 45%). Ще майже 24% можуть бути забезпечені за рахунок пожнивних решток, а 17% — із силосу кукурудзи, вирощеної на площі близько 1 млн га. Відходи тваринництва здатні забезпечити лише близько 4% потенціалу, що зумовлено суттєвим і тривалим скороченням поголів'я тварин — насамперед великої рогатої худоби та свиней — в Україні з 1990 року. Внесок побічних продуктів і відходів харчової промисловості оцінюється на рівні 3,6%, тоді як побутові відходи (органічна фракція ТПВ та осади стічних вод) разом можуть додати ще близько 2,5% до загального потенціалу.

У тваринництві найбільшу частку потенціалу виробництва біометану забезпечує курячий послід — 55%, далі йдуть гній свиней — 29% та гній великої рогатої худоби — 16%. Серед пожнивних решток основний потенціал припадає на кукурудзиння (48%) і солому пшениці (27%), які разом становлять близько 75% (див. **рисунок 3**).

Найбільша частка потенціалу серед побічних продуктів харчової промисловості припадає на виробництво соняшникової олії та цукру. Загалом побічні продукти переробки олійних культур забезпечують близько 48% потенціалу цього сектору, причому макуха (шрот) становить лише 24%. Ще 36% припадає на біометан, отриманий з жому цукрових буряків.

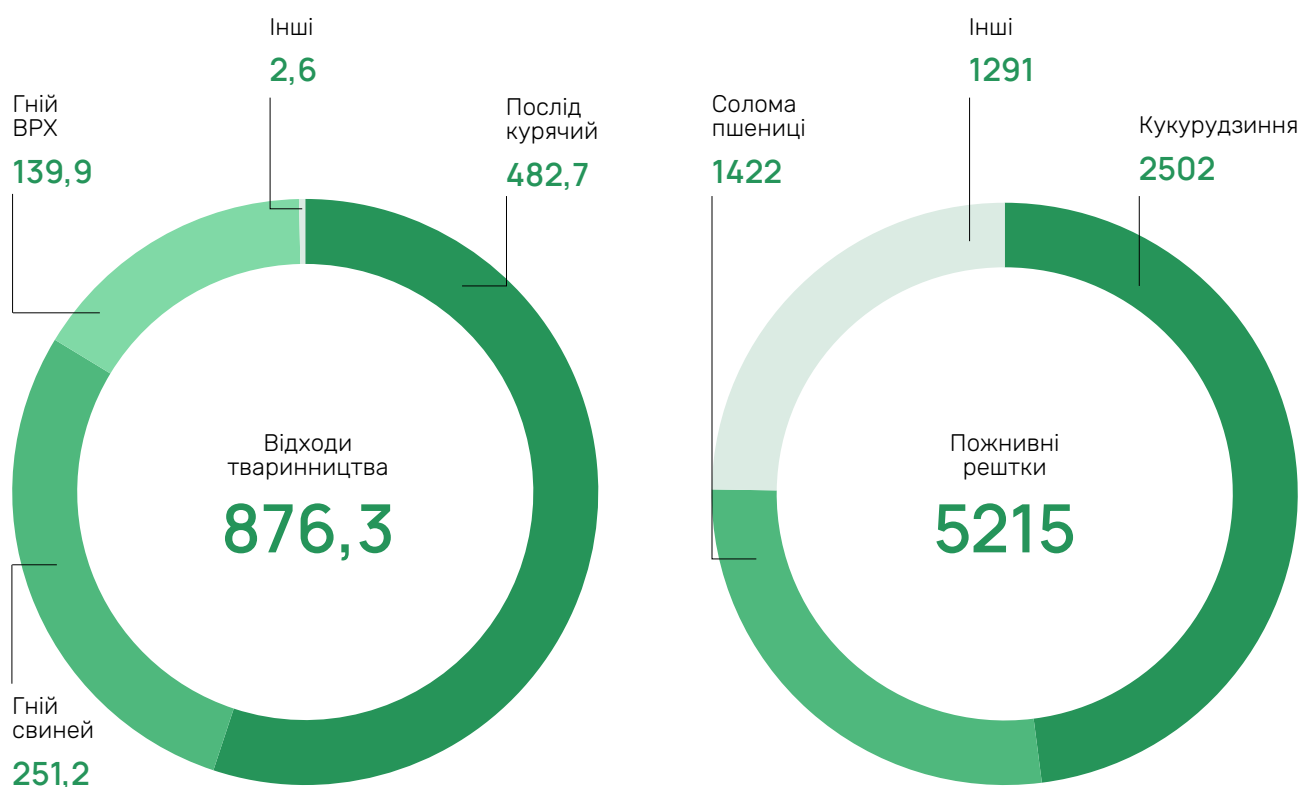


Рис. 3. Потенціал біометану за видами відходів тваринництва та пожнивних решток, млн $\text{nm}^3 \text{CH}_4$ на рік



Регіональний рівень

Потенціал виробництва біометану в розрізі регіонів України наведено на **рисунку 4 та в таблиці 4.**

На регіональному рівні майже половина загального потенціалу виробництва біометану зосереджена у Вінницькій, Київській, Дніпропетровській, Полтавській та Кіровоградській областях. Найвищий потенціал оцінено для Вінницької області, а найнижчий – для Закарпатської. Загальний діапазон потенціалу за регіонами становить від 0,14 до 1,96 млрд $\text{nm}^3 \text{CH}_4$ на рік, при середньому значенні 0,91 млрд $\text{nm}^3 \text{CH}_4$ /рік.

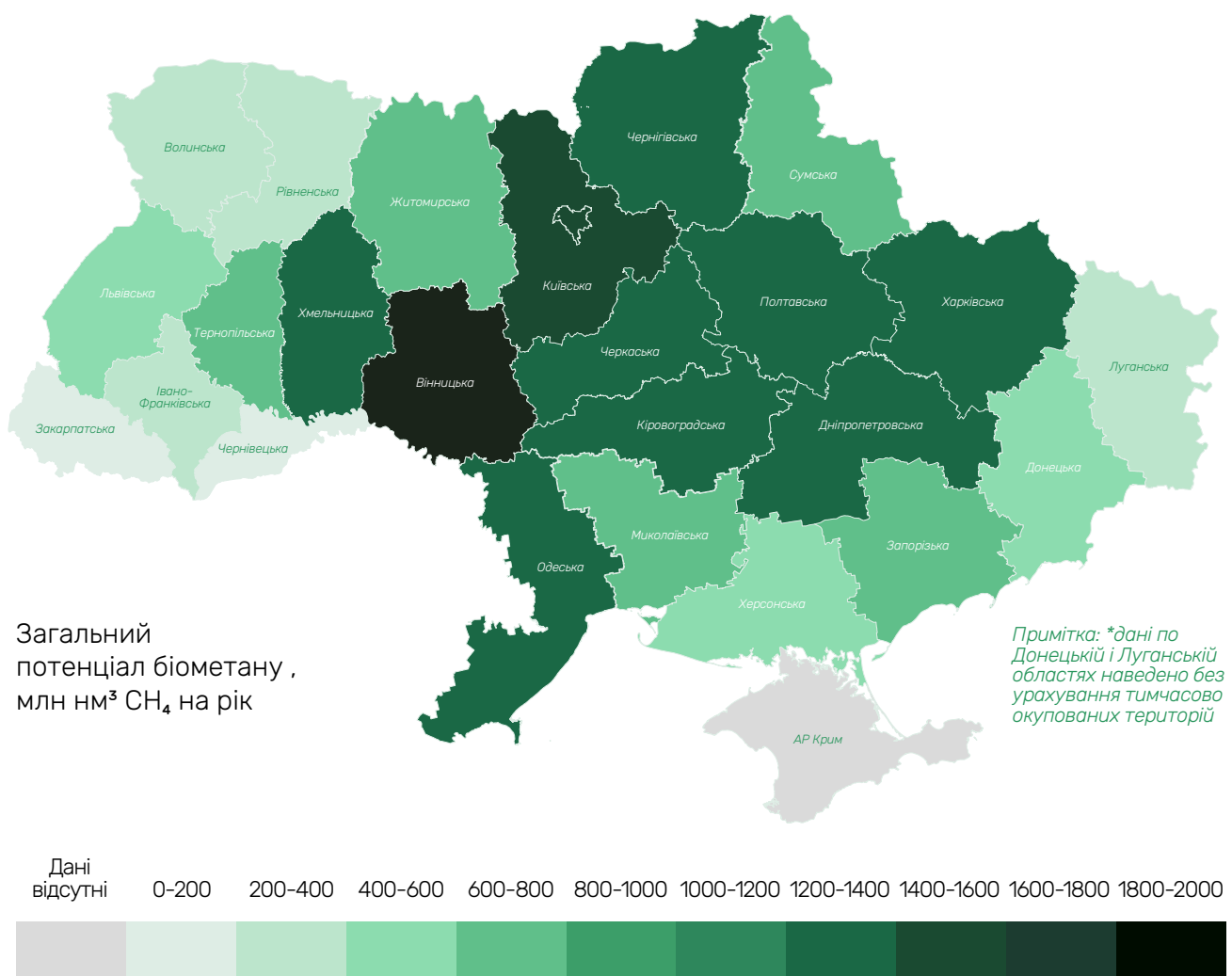


Рис. 4. Регіональний розподіл потенціалу виробництва біометану в Україні

Таблиця 4. Загальний потенціал виробництва біометану в Україні за областями, млн м³/рік

Область України	Поживні рештки	ПП харчової пром.	Гній, послід	оТПВ, осаді СВ	Силос кукурудзи	Покривні культури	Терм. газифікація деревної біомаси	Всього
Вінницька	447,1	149,5	109,6	20,8	391,8	801,6	35,2	1 955,6
Волинська	96,7	32,7	14,2	13,5	49,6	257,6	39,9	504,3
Дніпропетровська	241,8	92,0	21,8	46,4	82,5	842,6	23,0	1 350,1
Донецька	102,8	38,9	13,8	27,8	7,6	323,2	16,6	530,8
Житомирська	232,4	12,6	29,5	16,8	218,9	256,8	143,4	910,5
Закарпатська	10,4	2,7	0,0	17,6	11,4	50,9	49,1	142,1
Запорізька	187,3	11,9	33,4	23,7	24,6	585,7	22,1	888,6
Івано-Франківська	60,7	22,9	2,2	19,6	53,3	141,7	47,7	348,1
Київська	320,2	100,2	54,0	80,6	306,4	543,3	81,5	1 486,3
Кіровоградська	291,0	13,4	66,1	11,6	204,6	670,6	18,0	1 275,2
Луганська	80,5	3,2	9,4	8,5	10,1	125,6	23,7	261,0
Львівська	132,8	49,6	32,2	37,3	73,2	400,6	46,3	771,9
Миколаївська	188,0	6,4	40,0	14,1	33,6	511,7	15,8	809,6
Одеська	240,5	7,8	49,1	34,8	56,6	817,8	29,3	1 235,9
Полтавська	377,6	43,6	65,3	19,7	384,6	396,5	21,5	1 308,8
Рівненська	113,5	13,5	26,5	15,3	87,5	207,7	61,0	525,0
Сумська	289,3	17,7	3,8	13,3	306,2	296,3	36,7	963,2
Тернопільська	227,8	31,0	55,3	14,1	166,8	375,7	10,4	881,2
Харківська	259,6	25,7	36,6	45,0	106,4	754,3	31,1	1 258,7
Херсонська	172,6	13,8	11,3	14,2	41,3	278,2	15,2	546,5
Хмельницька	369,6	41,4	67,1	17,6	302,5	377,9	28,3	1 204,4
Черкаська	331,4	117,3	27,8	15,0	337,3	404,0	23,2	1 256,0
Чернівецька	27,5	6,4	0,0	12,4	16,5	103,1	27,0	192,8
Чернігівська	414,0	22,1	11,7	12,6	473,1	269,5	40,4	1 243,5

2.3

Проміжні культури: потенціал для виробництва біометану

Покривні та проміжні культури – це рослини, які вирощують у періоди, коли основні сільськогосподарські культури не ростуть у сівозміні. Вони мають великий потенціал як сировина для виробництва енергії. Ці культури швидко ростуть, зазвичай не потребують особливо родючого ґрунту, не конкурують з основними культурами, які використовують для виробництва продуктів харчування, а також добре підходять для силосування – це дозволяє зберігати їх тривалий час. Саме ці властивості роблять їх перспективними для використання в енергетичному секторі⁵.

Покривні та проміжні культури мають великий потенціал як сировина для виробництва енергії

Традиційно в Україні проміжні та покривні культури вирощують для використання як зелене добриво (сидерати) та для виробництва кормів. Проте розширення площ таких культур і

їх залучення до виробництва біометану, з поверненням поживних речовин у ґрунт разом із дигестатом, відкриває нові можливості для розвитку сталої біоенергетики та сільського господарства. Використання проміжних і покривних культур для виробництва біометану – це новий напрям, який потребує детального вивчення можливостей і умов для його успішного впровадження в Україні. Використання покривних культур активно розвивається і у низці європейських країн, зокрема в Італії, Франції та Великій Британії. Близько 47% потенціалу виробництва біогазу та біометану у європейських країнах у 2050 році може бути реалізовано саме завдяки застосуванню покривних культур⁶.

В Україні накопичено значний досвід вирощування проміжних культур для кормів. Цей досвід можна успішно використати і для вирощування сировини для виробництва біогазу та біометану. Правильний підбір культур, які чергуються у сівозміні, у поєднанні з сучасними методами обробки ґрунту, внесенням добрив та активним задіянням часу між основними посівами, дозволяє ефективно використовувати землю. Це не лише дає додатковий урожай, а й покращує родючість і фізичні властивості ґрунту.

Щоб ефективно вирощувати проміжні та покривні культури, важливо враховувати не лише біологічну сумісність з іншими культурами в сівозміні, але й вільні періоди між основними посівами, коли поля не зайняті. Саме в ці проміжки – за умови сприятливих агрокліматичних умов – можна вирощувати додаткові культури, які підуть на виробництво енергії.

⁵ Терміни «проміжні культури» та «покривні культури» в цій публікації вживаються як близькі поняття щодо сільськогосподарських культур, які вирощуються в інтервалі часу, вільного від вирощування основних культур сівозміни, для різних цілей, включаючи, захист поверхні ґрунту від ерозії та поглинання надлишків мінеральних добрив, а урожай їх біомаси може бути зібраний для подальшого використання як сировини для виробництва біогазу та біометану.

⁶ Biomethane production potentials in the EU. Gas for Climate Report, July 2022: <https://gasforclimate2050.eu/news-item/new-study-on-biomethane-production-potentials-in-the-eu/>

В Україні для вирощування біомаси з подальшим виробництвом біогазу або біометану вже сьогодні можна використовувати різні проміжні культури. У поточному році це можуть бути зернові (які висівають після ранньозібраних культур), кукурудза (за умови використання ранньостиглих сортів і сприятливої погоди), сорго та вика. Для отримання біомаси вже на початку наступного року добре підходять озимі проміжні культури. Серед них: зелене жито (наприклад, сорти KWS Пропауер, KWS Магніфіко), тритикале (сорт Велетень), озима пшениця та озимий ячмінь (на ранніх етапах росту). Крім згаданих культур, розглядаються й інші перспективні варіанти. Один із них – амарант, який вирізняється посухостійкістю, витривалістю та здатністю швидко нарощувати велику кількість зеленої маси. Саме тому він вважається багатообіцяючою культурою для виробництва біогазу та біометану.

Використання покривних і проміжних культур є перспективним шляхом для суттєвого збільшення обсягів виробництва біометану в Україні. **За попередніми оцінками, з таких культур в Україні можна щороку виробляти близько 9,79 мільярда кубічних метрів метану** (за іншими оцінками близько 9,2 мільярда кубічних метрів метану). Ця оцінка є консервативною і базується на припущенні, що під вирощування покривних та проміжних культур буде відведено лише 20% посівних площ. При цьому враховано середню врожайність таких культур – 5 тон сухої речовини з гектара, а також типовий вихід біогазу – 570 м³ з однієї тони сухої речовини⁷. Оцінений можливий обсяг виробництва біометану з покривних та проміжних культур в Україні є найбільшою складовою загального потенціалу виробництва біометану з різних видів сировини та становить близько 45%.



Біоенергетична асоціація України провела оцінку потенціалу використання проміжних культур для виробництва біометану на регіональному рівні з урахуванням кліматичних особливостей. Базові посівні площі проміжних культур прийнято на рівні 20% від посівних площ сільськогосподарських культур під урожай 2021 року. Ці площі умовно поділено порівну: 50% під озимі проміжні культури, та 50% під післяжнивні посіви. На основі регіональних кліматичних даних проведено переоцінку можливих площ для вирощування озимих і післяжнивних культур у розрізі областей. Визначено також потенційну врожайність зеленої маси (у тонах сухої речовини) для виробництва біометану. Для Одеської та Донецької областей, враховуючи недостатню кількість опадів у період вирощування озимих проміжних культур (до 240 мм з середини серпня до квітня), прийнято, що озимі будуть сіятись лише на 5% посівних площ. У зв'язку з дефіцитом вологи, вирощування післяжнивних культур не було розглянуто у таких регіонах як Донецька, Житомирська, Миколаївська, Одеська, Херсонська області. Крім того, через низький рівень вологозабезпечення вирощування проміжних культур не враховано для Автономної Республіки Крим.

⁷ Детальніше про методику оцінки потенціалу виробництва біометану з покривних та проміжних культур в Україні: Гелетуха Г., Железна Т., Драгнев С., Кучерук П., Крамар В. Виробництво передового біометану з проміжних і покривних культур. Аналітична записка №1, травень 2025 р. С. 57: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2025/05/Analytical-Note-1.pdf>

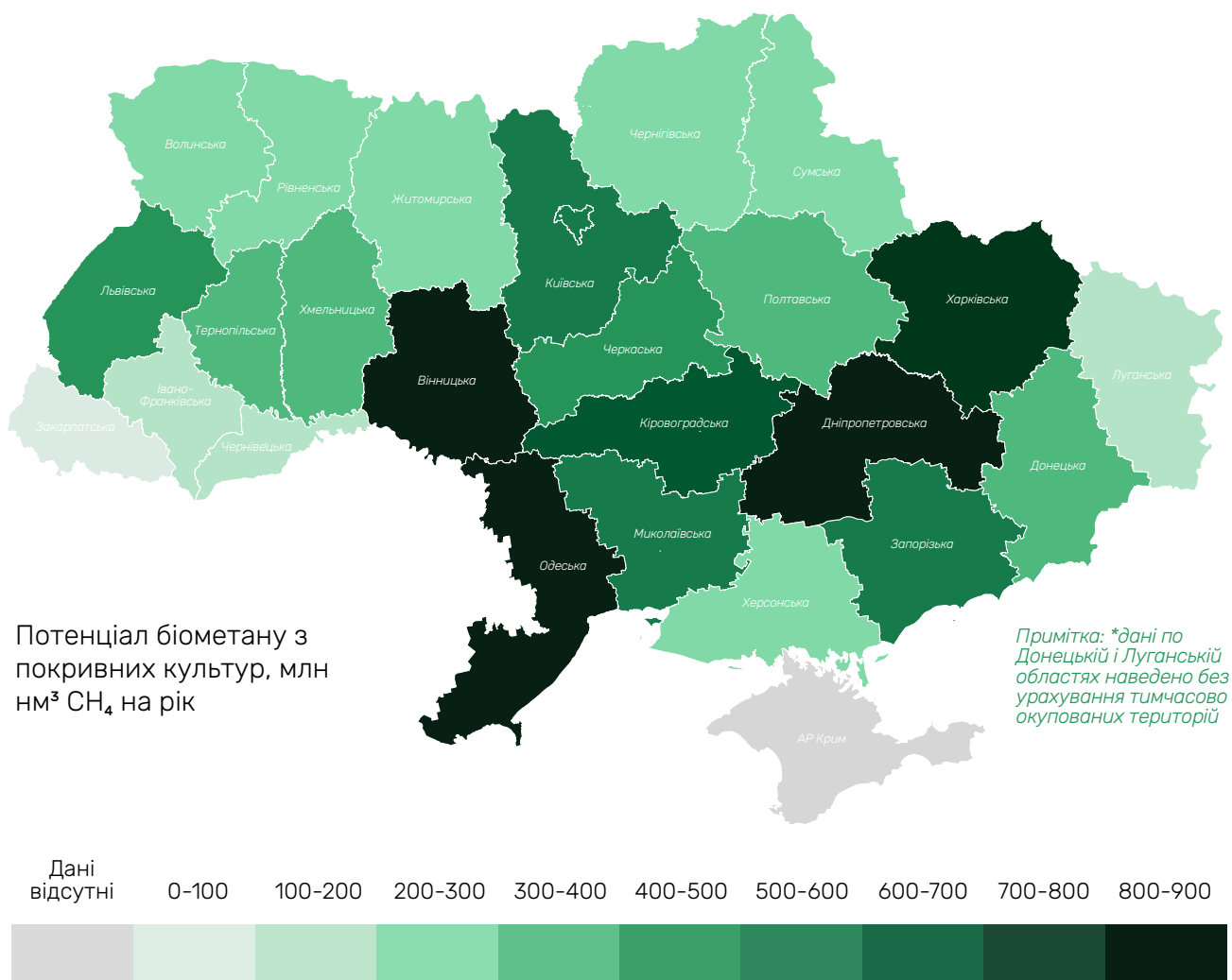


Рис. 5. Регіональний розподіл потенціалу виробництва біометану з покривних культур за областями України

Карта розподілу потенціалу виробництва біометану з покривних культур за областями України представлена **на рисунку 5**.

Найбільший за обсягом потенціал зосереджено в областях із великими посівними площами: Харківська, Дніпропетровська та Вінницька. Водночас вищий питомий вихід біометану (на гектар) очікується в регіонах із більшою кількістю опадів: Івано-Франківська, Львівська, Рівненська, Тернопільська, Хмельницька та Чернівецька області. Слід враховувати, що для окремих територій областей застосовано єдиний набір кліматичних даних без детального урахування місцевих відмінностей. З огляду на це, наведені результати мають орієнтовний характер. Для більш точного обґрунтування впровадження проєктів

з вирощування проміжних культур та виробництва біометану з них необхідно використовувати деталізовані локальні кліматичні дані.

Отже, покривні та проміжні культури є перспективною сировиною для сталого виробництва біометану в Україні, оскільки вони не конкурують з продовольчими культурами, добре ростуть у вільні від основних посівів періоди та покращують родючість ґрунту. Їх використання може значно збільшити потенціал виробництва біометану. Регіональні кліматичні особливості впливають на можливі площі посівів і врожайність, що потребує оптимізації вирощування та ефективного їх використання.

2.4

Сталість виробництва біометану

Розвиток українського ринку біометану є важливим кроком до енергетичної незалежності та сталої економіки. Втім, на сьогодні найбільші можливості для використання цього відновлюваного палива пов'язані передусім із його експортом до країн Європейського Союзу, де попит на чисту енергію стабільно зростає. Сталість є фундаментальним критерієм розвитку сектору виробництва біометану в Європейському Союзі та відіграє ключову роль в інтеграції українського біометану до європейського ринку. Вона визначає не лише екологічну безпеку виробництва, але й відповідність законодавству ЄС щодо альтернативних видів палива. У європейському контексті це означає дотримання вимог Директив ЄС 2018/2001 (RED II) та оновленої Директиви ЄС 2023/2413 (RED III), які встановлюють екологічні та соціальні критерії для виробництва біометану. Відповідність вимогам зазначених Директив відкриває можливість для визнання українського біометану як сталого палива на рівні ЄС, що має критичне значення для експорту.

Критерії сталості біометану згідно з Директивами ЄС RED II та RED III – це набір вимог, яким повинні відповідати біопалива (включаючи біометан), щоб враховуватися до цілей ЄС по відновлюваним джерелам енергії й отримати право на участь у механізмах підтримки відновлюваної енергії (наприклад, квоти, премії):

- 1. Скорочення обсягів викидів парникових газів.** Біометан має забезпечувати мінімум 65% зниження викидів парникових газів у порівнянні з викопним паливом (для установок, побудованих після 2021 року). Це враховує весь життєвий цикл – від збору сировини до подачі біометану в мережу.
- 2. Вимоги до землекористування.** Заборонено виробництво біометану з сировини, вирощеної на землях із високою екологічною цінністю, зокрема: первісні ліси, торфовища, болота; землі з високими запасами вуглецю; охоронювані природні території.
- 3. Простежуваність і прозорість.** Необхідне документальне підтвердження походження сировини, місця її вирощування або утворення, та контроль усього ланцюга постачання.
- 4. Сертифікація сталості.** Виробництво сталого біометану має бути підтверджене через незалежний аудит відповідно до схвалених Європейською Комісією добровільних схем сертифікації (ISCC EU, REDcert тощо).

Наприклад, сертифікація сталості біометану за схемою ISCC EU⁸ передбачає кілька етапів, кожен з яких вимагає послідовного виконання певних вимог. Після успішного проходження аудиту та отримання сертифіката виробник біометану отримує право купувати й продавати сертифікований сталий матеріал згідно з вимогами ISCC EU, а також використовувати логотип і відповідні позначення сертифікації у своїй діяльності.

В контексті дотримання вимог Директив ЄС RED II та RED III, **важливим є перелік сировини, що передбачений у Частині А Додатку IX**. Біометан, вироблений з цієї сировини, вважається передовим (advanced).

Використання сировини для виробництва передового біопалива має ключове значення для забезпечення сталості та екологічної безпеки виробництва біометану. Такі види сировини не конкурують з виробництвом продуктів харчування або кормів, не спричиняють вирубування лісів чи розширення сільськогосподарських угідь, що допомагає зберегти біорізноманіття та запобігти деградації ґрунтів, їх використання сприяє ефективному видаленню відходів та побічних продуктів, які інакше забруднювали б довкілля. Крім того, від використання цієї сировини залежить ціна біометану. Вона включає вартість природного газу, виражену в енергетичних одиницях, а також премію, розмір якої залежить від вуглецевого сліду виробленого біометану. Саме величина премії визначається типом сировини, що використовується для виробництва біометану, та її відповідністю вимогам Додатку IX Директиви ЄС RED II.

В Україні нормативною основою для забезпечення сталості біометану виступає **Закон України «Про альтернативні види палива»**⁹,

⁸ ISCC EU – International Sustainability and Carbon Certification: <https://www.iscc-system.org>

⁹ Закон України «Про альтернативні види палива»: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1391-14#Text>

Використання сировини для виробництва передового біопалива має ключове значення для забезпечення сталості та екологічної безпеки виробництва біометану

який визначає правові засади для виробництва біометану. Згідно з цим Законом, підтвердженням відновлюваного походження біометану виступає гарантія походження, що видається на основі даних реєстру біометану. **Реєстр біометану** – це електронна система, яка фіксує обсяги біометану, поданого до газотранспортної або газорозподільної мережі, або виробленого у стисненому або зрідженому вигляді.

За загальним правилом, **гарантія походження** також є ключовим документом для митного оформлення біометану під час експорту. Однак, наразі реєстр біометану офіційно не функціонує. Затримка пов'язана з необхідністю інтеграції реєстру з базою даних ЄС UDB (Union Database), що дозволить Європейському Союзу визнавати українські гарантії походження. Поки ця інтеграція не завершена, гарантії походження не можуть бути видані.



Тимчасово, до визнання в ЄС українських гарантій походження, експорт біометану трубопровідним транспортом здійснюється на основі документів, що підтверджують сталість виробництва. Виробник біометану має бути підключений до газотранспортної або газорозподільної системи. На об'єкті має бути встановлено: автоматичний потоковий вимірювальний прилад (автоматичний хроматограф) та вузол обліку газу. При поданні документів на митне оформлення, крім митних декларацій необхідно надати: сертифікат відповідності критеріям сталості (щодо виробника), та доказ сталості (PoS – Proof of Sustainability) – підтвердження сталості для відповідного обсягу біометану.

Ці **тимчасові вимоги** діятимуть до того часу, **поки Україна офіційно не приєднається до європейської системи простежуваності відновлюваних газів – бази даних UDB**, і ЄС не почне визнавати українські гарантії походження біометану.

Таким чином, виробництво біометану вимагає від оператора установки ретельного підбору сировини для забезпечення його сталості. Наявність доказу сталості є обов'язковою умовою

Сталість виробництва біометану є ключовою умовою для інтеграції

експорту, оскільки лише біометан, що відповідає вимогам ЄС щодо відновлюваної енергії, користуватиметься попитом на європейському ринку.

Сталість виробництва біометану є ключовою умовою для інтеграції українського біометану на європейський ринок. Відповідність цим вимогам гарантує зниження викидів парникових газів, уникнення негативного впливу на навколишнє середовище. В Україні нормативна база та тимчасові механізми підтримують цей процес і створюють основу для успішного експорту біометану до ЄС, що сприяє сталому розвитку галузі та підвищенню її конкурентоспроможності.

Виробництво біометану в Україні:
можливості та виклики

3

Технології
виробництва,
очищення та
збагачення біогазу

3.1

Процес утворення біогазу

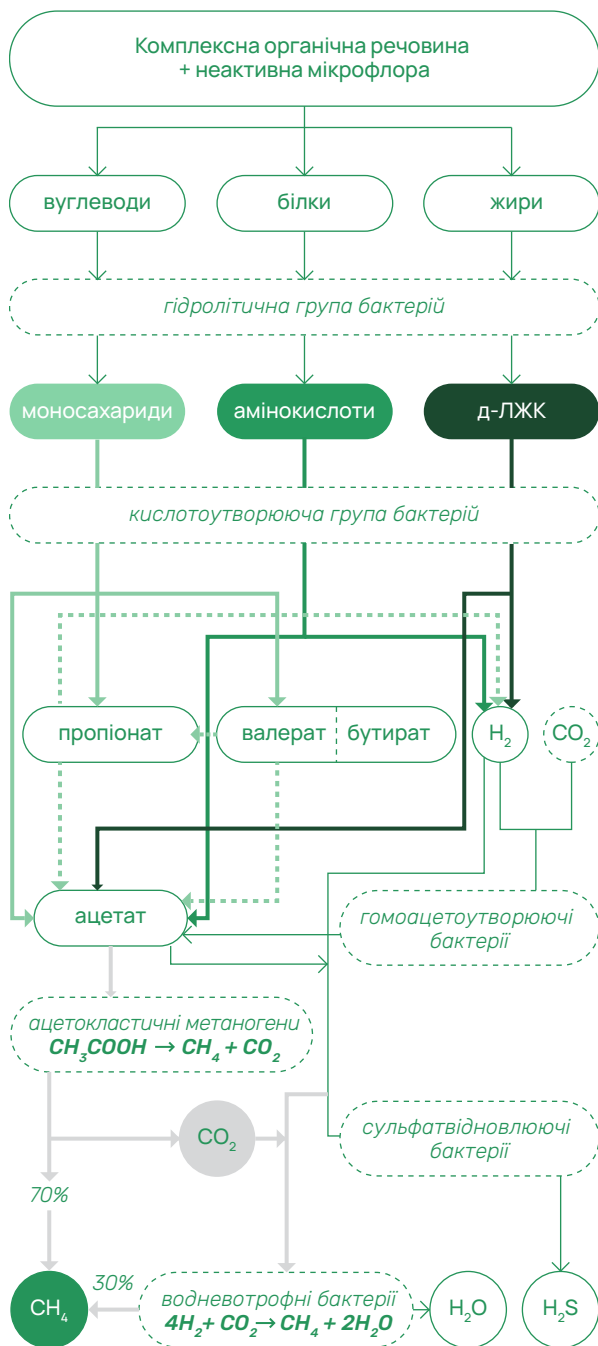


Рис. 6. Схема перетворення комплексної органічної речовини в біогаз в процесі метанового бродіння

Утворення біогазу з комплексної органічної речовини відбувається в результаті життєдіяльності (метаболізму) **п'яти основних груп бактерій**¹⁰:

- гідролітичних**, що розщеплюють складну органічну речовину на моносахариди, амінокислоти та довголанцюгові жирні кислоти (д-ЛЖК);
- кислотоутворюючих**, що трансформують складні органічні сполуки до оцтової (HAc) та пропіонової (HPr) коротколанцюгових жирних кислот, двоокису вуглецю (CO_2) та водню (H_2);
- ацетогенних**, що конвертують HPr до HAc та H_2 ;
- ацетокластичних метаногенів**, що конвертують HAc в CO_2 і CH_4 ;
- водневотрофічних метаногенів**, що конвертують H_2 та CO_2 в CH_4 і воду.

Окрему групу становлять **сульфатвідновлювальні** бактерії, які відповідають за утворення сірководню (H_2S) у біогазі. Близько 70% загального обсягу метану утворюється ацетокластичним трофічним шляхом метаногенезу, тоді як решта – водневотрофічним шляхом (див. рисунок 6).

¹⁰ SW Sötemann, NE Ristow, MC Wentzel, GA Ekama. A Steady state model for anaerobic digestion of sewage sludge. – Water SA, Vol. 31, No. 4, October 2005.

У проточному біореакторі-метантенку всі етапи перетворення сировини відбуваються одночасно й паралельно. При цьому кожен із процесів має свою швидкість і коефіцієнт перетворення маси. Для забезпечення стабільної роботи реактора важливо, щоб швидкості перетворення органічних речовин на кожному етапі були узгодженими – тобто не призводили до накопичення проміжних продуктів, які при певних концентраціях можуть гальмувати загальний процес утворення біогазу. Інакше кажучи, швидкість утворення проміжного продукту має відповідати швидкості його подальшого споживання або перетворення наступною групою мікроорганізмів.

На практиці досягти ідеальної збалансованості всіх етапів зброджування вдається рідко, тому проміжні кислоти можуть накопичуватися в реакторі. Основне правило ефективного анаеробного зброджування полягає в тому, щоб не допустити перевищення граничної концентрації цих кислот (що визначається як їхня сума в оцтовому еквіваленті), що регулюється комбінацією наступних **основних параметрів впливу**:

1. обсягами подачі сировини (органічним навантаженням біореактора, кг СОР/м³/добу);
2. гідравлічним навантаженням (доба⁻¹);
3. збалансованістю вмісту в сировинній суміші макро- та мікроелементів;
4. буферною здатністю зброджуваної суміші (лужністю).

Гідравлічне навантаження біореактора, що є оберненою величиною до середнього часу перебування сировини в реакторі, є одним із важливих параметрів впливу. Це особливо актуально при використанні дуже розбавлених субстратів, таких як, наприклад, рідка свиняча гноївка.

При встановленні гідравлічного навантаження важливо враховувати, що різні групи бактерій та архей

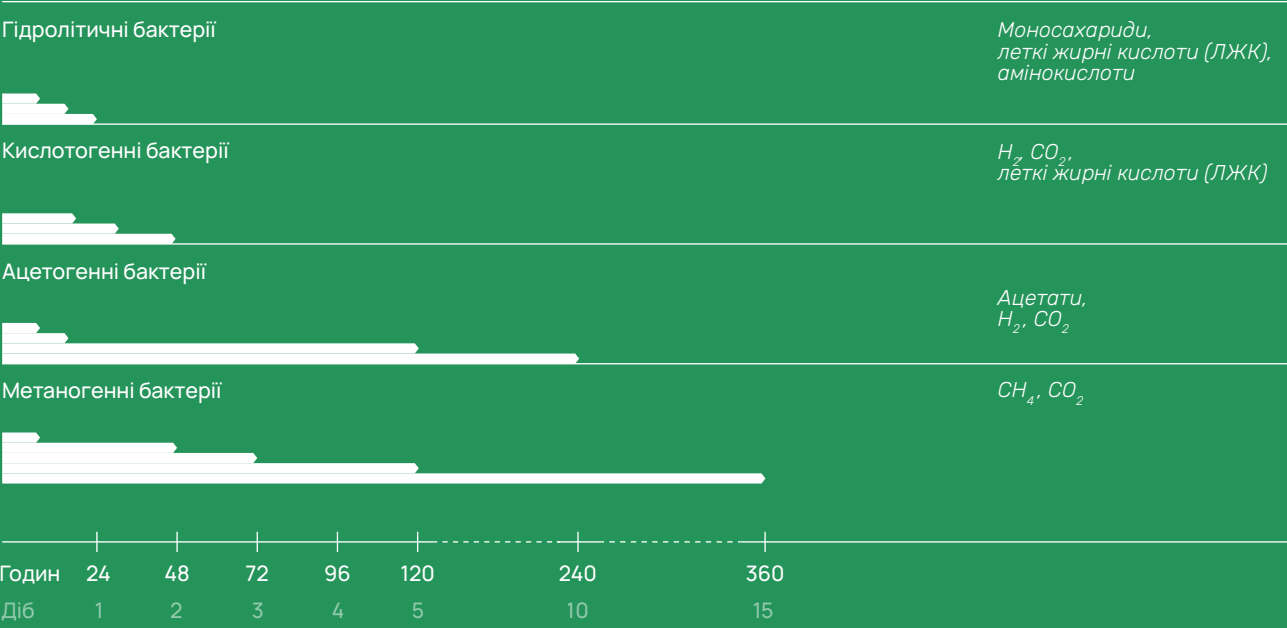
Для забезпечення стабільної роботи реактора важливо, щоб швидкості перетворення органічних речовин на кожному етапі були узгодженими

(мікроорганізми, подібні до бактерій, але з унікальною структурою клітин і здатністю виживати в екстремальних умовах) у біореакторі мають різні швидкості росту. Найповільніше ростуть бактерії та археї, які відповідають за останній етап перетворення органічної речовини – метаногени (**див. рис. 7**). Саме ці бактерії й археї найбільше потребують забезпечення умов постійного утримання в реакторі, особливо в ситуаціях, коли їх метаболізм може пригнічуватися дією різних інгібуючих (таких, що уповільнюють або блокують біологічні процеси) факторів впливу.

Технологічний процес виробництва біогазу також може протікати у дві окремі стадії, де на першій стадії домінують процеси гідролізу та кислотогенезу, а на другій стадії – ацетогенезу та метаногенезу. Оптимальні умови протікання цих стадій є різними, як показано в **таблиці 5**.

Рис. 7. Швидкості росту окремих груп анаеробних бактерій

Адаптовано з джерела: Eder, Schulz, 2006



Таблиця 5. Оптимальні умови протікання процесів при розділенні процесу на дві стадії

№	Параметр	Стадія гідролізу / кислотогенезу	Стадія метаногенезу
#1	Температура, °C	25-35	32-42 (мезофільний) 50-58 (термофільний)
#2	pH	5,2-6,3	6,7-7,5
#3	C:N	10-45	20-30
#4	Вміст СР в реакторі, %	< 40	< 30
#5	Редокс (окисно- відновний) потенціал, мВ	+ 400 ... -300	< -250
#6	C:N:P:S	500 : 15 : 5 : 3	600 : 15 : 5 : 3
#7	Мікроелементи	Конкретні вимоги відсутні	Ключові: Ni, Co, Mo, Se

На загальну швидкість утворення біогазу в процесі метанового бродіння впливають наступні **основні фактори**:

1. температура протікання процесу;
2. органічне навантаження біореактора;
3. гідравлічне навантаження біореактора.

Існує **три основних температурних режими протікання процесу метанового бродіння**, а саме:

Термофільний (50-60°C)

Термофільний режим здатен забезпечити найвищу швидкість утворення біогазу, а також більш повну біологічну стабілізацію утвореного дигестату. Водночас цей режим є більш чутливим процесом, особливо якщо сировина містить більш високі концентрації нітрогену та органічних речовин, що легко гідролізуються.

При підвищеному вмісті нітрогену в умовах більш високих температур частка аміачної його форми збільшується, у порівнянні з амонійною формою. Аміачна форма азоту є більш токсичною для метанових бактерій вже при досить малих концентраціях (від 0,5 гNH₃/л). Надто швидкий гідроліз може призвести до накопичення д-ЛЖК, що також може спричинити інгібування процесу метаногенезу.

Слід звернути увагу, що згідно Закону України «Про пестициди та агрохімікати»¹¹ в разі розміщення на ринку утвореного в процесі виробництва біогазу дигестату, він повинен відповідати вимогам, встановленим Регламентом (ЄС) 2019/1009 Європейського Парламенту та Ради від 5 червня 2019 року про встановлення правил розміщення добрив на ринку ЄС ¹².

Однією з вимог цього Регламенту є забезпечення належного рівня біологічної безпеки дигестату. Для досягнення цієї мети може бути достатнім використання термофільного анаеробного зброджування при 55°C протягом принаймні 24 годин з подальшим гідравлічним часом утримання щонайменше 20 діб.

Таким чином, якщо передбачається комерціалізація дигестату, доцільним рішенням може стати доброджування (фінішний етап) сировини в окремому реакторі при температурі 55°C. Такий підхід практично не впливає на швидкість утворення біогазу, але дозволяє досягти вимог щодо безпеки, не порушуючи стабільності самого процесу метанового бродіння.

Мезофільний - термотолерантний (32-45°C)

Це найпоширеніший температурний режим зброджування, особливо при використанні аграрної сировини. Такий режим дозволяє відносно легко підтримувати стабільний мікробіологічний склад (біоценоз) та забезпечує достатні швидкості виходу біогазу при прийнятному часі утримання сировини в біореакторі.

Психрофільний (<25°C)

Психрофільний температурний режим зазвичай не потребує додаткового джерела тепла для нагріву, оскільки процеси зброджування відбуваються при температурі навколишнього середовища. Водночас такий режим вимагає тривалого часу утримання сировини в реакторі, а обсяг і склад утвореного біогазу можуть суттєво коливатися.

Зазвичай цей режим зустрічається при довготривалому зберіганні гною в лагунах, які роблять герметичними (із верхнім перекриттям), щоб запобігти викидам метану в атмосферу. Однак для промислового виробництва біогазу психрофільний режим вважається неефективним і майже не використовується.

Температура процесу зброджування впливає не лише на швидкість утворення біогазу, але й на інші важливі аспекти, зокрема: витрати теплової енергії, якість та біологічну безпеку утвореного

¹¹ Закон України «Про пестициди та агрохімікати»: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/86/95-%D0%B2%D1%80#Text>

¹² Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj/eng>

дигестату, концентрацію аміаку, в'язкість суміші, розчинність газів, склад біогазу, а також рН середовища (див. рис. 8).

Для забезпечення ефективного процесу виробництва біогазу необхідно контролювати низку ключових параметрів, зокрема: рН середовища, співвідношення загального вмісту кислот до лужності (FOS:TAC¹³), загальний вміст кислот (ЛЖК), концентрацію амонійного азоту та аміаку, електропровідність, а також вміст окремих кислот (див. таблицю 6).

¹³ FOS:TAC — показник, що характеризує баланс між леткими жирними кислотами (FOS) та буферною ємністю середовища (TAC), що використовується для оцінки стабільності анаеробного процесу.

Температура процесу

Рис. 8. Вплив температури на різні аспекти технології виробництва біогазу



Примітка: плюс (+) вказує на пряму залежність показника від збільшення температури, мінус (-) – на обернену залежність.

Таблиця 6. Параметри контролю технологічного процесу виробництва біогазу

Параметр контролю	Розм.	Допустимий рівень показника – процес стабільний	Понаднормовий рівень показника – потребує уваги	Критичний рівень показника – потребує дії
рН	[-]	7,5 – 8,1	7,1 – 7,4	< 7,1; > 8,3
FOS : TAC	[-]	0,2 – 0,5	0,5 – 1,0	> 1,0
СР	[%]	3 – 9	< 3	> 12
NH ₄ -N	[г/л]	< 4,0	4,0 – 5,5	> 5,5
NH ₃ -N	[мг/л]	< 500	500 – 800	> 800
Оцтова кислота	[мг/л]	0 – 1 000	1 000 – 3 000	> 3 000
Пропіонова кислота	[мг/л]	0 – 250	250 – 1 000	> 1 000
д-ЛЖК	[мг/л]	0 – 50	50 – 300	> 300
Загальний ЛЖК	[мг/л]	0 – 1 500	1 500 – 4 500	> 4 500
Пропіонова к-та : Оцтова к-та	[-]	0 – 0,2	0,3 – 1,0	> 1,0
Електропровідність	[мС/см]	< 30	30 – 40	> 40

3.2

Огляд технологій виробництва біогазу та відновлюваного метану

Сучасне виробництво біометану у найбільших обсягах здійснюється шляхом очищення біогазу, що утворюється в результаті **анаеробного зброджування** різноманітних органічних матеріалів. Такі технології переважно застосовуються в аграрному секторі, а також у комунальному господарстві, харчовій та целюлозно-паперовій промисловості.

У меншому обсязі біометан виробляється з біогазу, зібраного **під час організованої дегазації полігонів твердих побутових відходів**. У таких умовах виділення біогазу зазвичай відбувається природним чином, без застосування додаткового технічного впливу. У розвинених країнах практика захоронення ТПВ поступово витісняється механіко-біологічною обробкою, яка може включати окремий блок з виробництва біогазу з органічної фракції відходів. Очікується, що подібні підходи будуть впроваджені й в Україні.

У світі також розвивається напрямок виробництва біометану шляхом **термічної газифікації біомаси з подальшим метануванням синтез-газу**. За прогнозом Gas for Climate ¹⁴, вже у 2030 році частка такого біометану в загальному обсязі його виробництва в ЄС перевищуватиме 7%, а до 2050 року може сягнути майже 40%. Основною сировиною для цього технологічного напрямку є тверда біомаса, переважно деревні рослини та відходи. У технології термічної газифікації деревна біомаса спочатку розкладається за

високої температури (між 700–800 °C) та високого тиску в середовищі з обмеженою кількістю кисню. У таких умовах вона перетворюється на суміш газів, основними компонентами якої є окис вуглецю (CO), водень (H₂) та метан (CH₄) – цю газову суміш іноді називають синтез-газом.

Щоб отримати чистий потік біометану, синтез-газ спочатку проходить очищення від кислотних та корозійно-активних домішок. Далі в процесі метанування за участі каталізатора здійснюється реакція між воднем і окисом вуглецю або вуглекислим газом (CO₂) з утворенням метану. На завершальному етапі з отриманого газу видаляються залишкові CO₂ та вода, що дозволяє отримати якісний біометан.

Термічна газифікація дає змогу значно розширити перелік сировини, придатної для виробництва біометану, включаючи тверду біомасу з високим вмістом лігніну (наприклад, деревні залишки). Зі зростанням рівня технологічного розвитку гідротермічної газифікації ¹⁵ відкриваються додаткові можливості для переробки вологих видів сировини та відходів, зокрема органічної фракції твердих побутових відходів. Це дозволяє ще більше розширити сировинну базу для виробництва біометану цим методом.

Нові перспективи у сфері виробництва біогазу та біометану відкриваються завдяки розвитку новітніх технологій.

¹⁴ Gas for Climate (2019). The optimal role for gas in a net-zero emissions energy system. Navigant. https://gas-forclimate2050.eu/sdm_downloads/2019-gas-for-climate-study/ <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj/eng>

¹⁵ Hydrothermal biomass gasification: <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2008.10.009>



Зокрема, на стадії досліджень і початкової комерціалізації перебувають **технології виробництва так званого е-метану**. Його отримують у процесі метанування — тобто каталітичного або біологічного синтезу метану (CH_4) з використанням відновлюваного CO_2 (вилученого після збагачення біогазу) та водню (H_2), який виробляється шляхом електролізу води. Для цього застосовується відновлювана електроенергія, зокрема з вітрових або сонячних електростанцій.

Метан може утворюватися у біологічному процесі так званого «темного» бродіння, під час якого, поряд із метаном, утворюється також значна кількість газоподібного водню (H_2). Щоб отриманий газ відповідав вимогам до біометану, придатного для подачі в газотранспортну мережу або використання як транспортне біопаливо (наприклад, bio-LNG або bio-CNG), необхідно застосовувати технології очищення та збагачення метану. Альтернативно можуть використовуватися технології синтезу, зокрема біологічне метанування водню (H_2) із використанням вуглекислого газу (CO_2), що утворюється під час збагачення біогазу.

На ранніх стадіях розвитку перебувають також **технології секвестрації CO_2 за допомогою мікроводоростей**, які здатні поглинати вуглекислий газ у процесі фотосинтезу з подальшим використанням біомаси водоростей для виробництва біогазу шляхом анаеробного зброджування.

Всі технології анаеробного зброджування ґрунтуються на спільних принципах і

закономірностях біологічного процесу, однак можуть відрізнятися за низкою параметрів — такими як кількість стадій, періодичність роботи, температурний режим, конструктивні особливості біореактора, наявність окремого вузла підготовки сировини тощо.

Ключовим фактором, що визначає технології виробництва біогазу, є тип і склад використовуваної сировини

Ключовим фактором, що визначає необхідність або доцільність застосування тієї чи іншої технології виробництва біогазу, є тип і склад використовуваної сировини. У будь-якій технологічній схемі виробництва біогазу центральним елементом є біореактор. Анаеробні біореактори, що використовуються для цього процесу, можна класифікувати за різними ознаками — як це представлено **в таблиці 7**.

Таблиця 7. Класифікація анаеробних біореакторів для виробництва біогазу

Визначення класифікатора	Класифікація	Визначення класифікатора	Класифікація
За сферою застосування	Побутові Для очистки стічних вод Для переробки гетерогенної сировини	За режимом роботи	Проточного типу Квазі-проточного типу Періодичної дії Квазі-періодичної дії
За продуктивністю	Пасивного типу Низько- та середньо навантажувані Високонавантажувані	За матеріалом несучих конструкцій	Бетонні Металеві Пластикові та інші
За геометрією	Горизонтального типу Вертикального типу	За типом реакційного середовища	Вологого типу Сухого типу
За гідравлічним режимом	Повного змішування З поступальним рухом субстрату З циркулюючим рухом субстрату	За наявністю in-situ газгольдера	З газгольдером Без газгольдера

Таблиця 8. Типи, конструкції та особливості біореакторів для виробництва біогазу

В таблиці 8 наведено приклади основних типів біореакторів, що переважно використовуються для переробки сировини, побічних продуктів та відходів тваринного і рослинного походження.

Тип та конструкція біореактора

Ключові особливості, переваги та недоліки

Горизонтальний біореактор типу CSTR з гнучким газгольдером

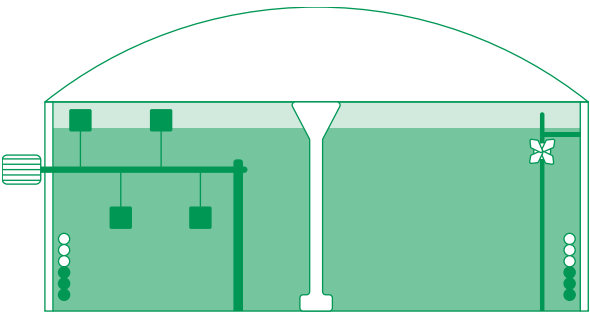


Рис. 9. Горизонтальний біореактор типу CSTR з гнучким газгольдером

- Найбільш поширені типи реакторів для біогазових станцій з використанням сировини аграрного походження
- Можливість накопичення/усереднення біогазу
- Можливість попередньої десульфуризації біогазу
- Більший можливий діаметр і об'єм реактора
- Менша герметичність, що призводить до викидів CH_4
- Біологічна десульфуризація біогазу може обмежувати подальше використання біогазу для виробництва біометану
- Необхідність розгерметизації реактора (деконструкція газгольдера) для проведення операцій із заміни внутрішнього обладнання та очистки ферментера

Горизонтальний біореактор типу CSTR з монолітним перекриттям

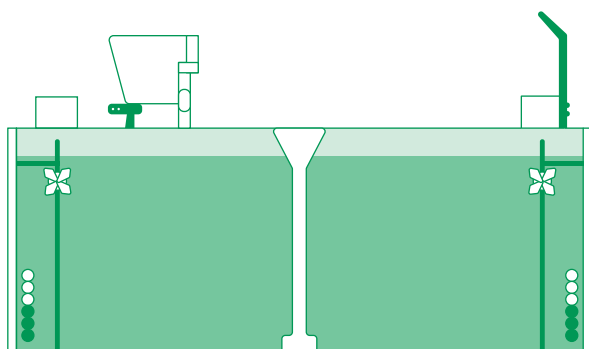


Рис. 10. Горизонтальний біореактор типу CSTR з монолітним перекриттям

- Контрольоване середовище
- Здатні підтримувати певний тиск біогазу
- Простіше обслуговування системи перемішування
- Якісна теплоізоляція, що призводить до менших втрат тепла
- Захист від дії вітру
- Обмежені в діаметрі через несучу здатність прольотів (по ширині)
- Немає вбудованого газгольдера
- Складність внутрішнього ремонту та очистки ферментера
- Бетон не є абсолютно газонепроникним
- Складність фіксації витоків газу

Вертикальний біореактор типу CSTR з центральним осьовим міксером

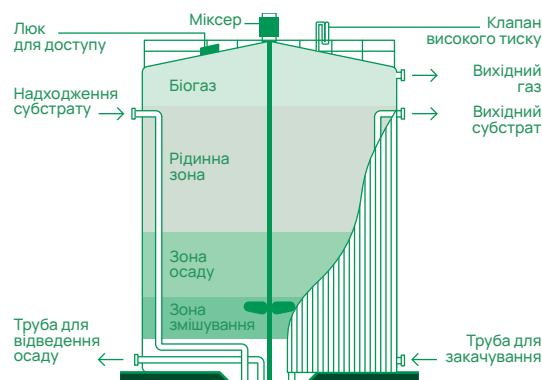


Рис. 11. Вертикальний біореактор типу CSTR з центральним осьовим міксером

- Дуже якісно теплоізовані, що означає малі тепловтрати та рівномірну температуру
- Мінімальні втрати біогазу крізь перекриття
- Більш рівномірне змішування сировини
- Не сприйнятливі до погодних умов
- Деталі, що спрацюються розташовані за межами реактора, що забезпечує простоту технічних оглядів та ремонтів
- Менша необхідна площа під реактор
- Більш ефективні при боротьбі з піноутворенням
- Можливий байпас ефект
- Складність очистки дна від осаду
- Відсутність газгольдера
- Зняття міксера можливе лише спецтехнікою

Горизонтальний біореактор типу PFR з гнучким газгольдером



Рис. 12. Горизонтальний біореактор типу PFR з гнучким газгольдером

- Можуть працювати при високих концентраціях сухої речовини (15-35% CP)
- Можливість використання для досить гетерогенної та волокнистої сировини (часто використовують для переробки силосу кукурудзи або оТПВ)
- Як правило використовується як перша стадія перед подачею в CSTR реактор
- Більша середня швидкість виходу біогазу
- Дешевше будівництво за рахунок прямокутної форми
- Можливе утворення застійних зон в нижніх кутах прямокутного реактора і зменшення ефективного об'єму реактора в процесі експлуатації
- Складність очищення днища від накопиченого осаду
- Складність заміни міксера чи його елементів всередині реактора

Секційний біореактор типу PFR з іммобілізованою мікрофлорою

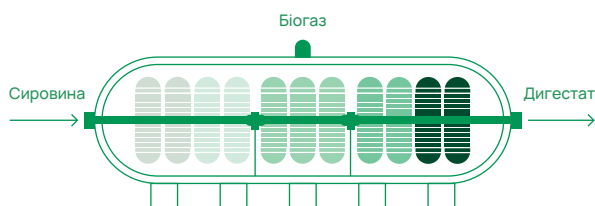


Рис. 13. Секційний біореактор типу PFR з іммобілізованою мікрофлорою

- Суттєво менша тривалість процесу (8 діб)
- Більш повний розпад органіки
- Зменшене енергоспоживання
- Можливість розміщувати в приміщенні
- Можливість масштабування за рахунок модульної конструкції
- Відсутність будівельних робіт за рахунок поставки префабрикованих реакторів
- Потребує ретельної підготовки сировини (гомогенізації)
- Більш складна система

Реактор пасивного типу (лагуна)

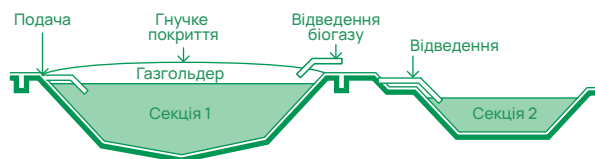


Рис. 14. Реактор пасивного типу (лагуна)

- Дешевизна та простота технології
- Простота проектування
- Низька швидкість виходу біогазу
- Висока нерівномірність виходу та складу біогазу
- Значна необхідна площа під реактором
- Складно забезпечити герметичність покриття
- Не пристосовані до зон з високим рівнем ґрунтових вод
- Важко виявити зону витікання (субстрату) при пошкодженні ізолюючого покриття
- Перемішування можливо шляхом впорскування газу, у зв'язку з чим відкладення можуть заважати
- Відсутність обігріву, ізоляція тільки зі сторони землі, а отже технологія не пристосована для країн з холодним кліматом

Реактори періодичної дії

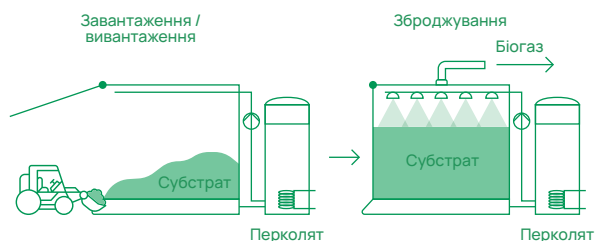


Рис. 15. Реактор періодичної дії гаражного типу

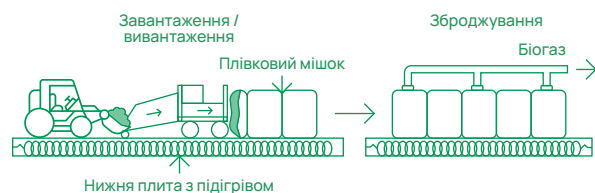


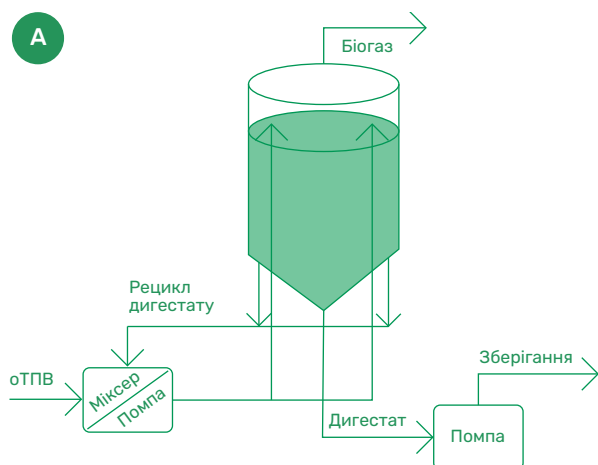
Рис. 16. Реактор періодичної дії тунельного типу

- Придатні для зброджування штабельованих твердих типів сировини
- Менш чутливі до домішок в сировині
- Менш чутливі до параметрів середовища
- Менше споживають електричної енергії
- Мінімальний вихід рідкої фракції дигестату
- Потребують попереднього змішування свіжої сировини зі збродженою масою
- Викиди метану при завантаженні сировини
- Нестабільний склад та обсяг біогазу

Для переробки органічної фракції твердих побутових відходів іноді використовують реактори типу DRANCO, VALORGA, COMPOGAS та інші (**рис. 17**). Ключовою особливістю цих біореакторів є відсутність міксерів усередині, що дозволяє переробляти сировину гетерогенного складу з можливим вмістом твердих або волокнистих включень, що властиво для органічної фракції твердих побутових відходів.

Особливістю реакторів типу VALORGA є використання системи перемішування біогазом під тиском, що забезпечує ще кращу гомогенізацію відходів у процесі збродження.

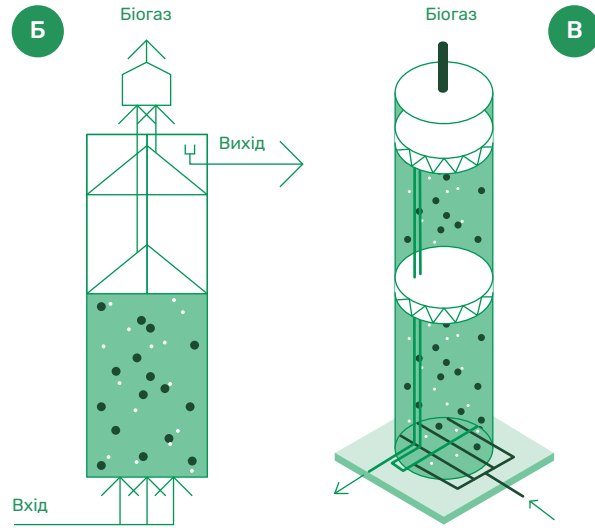
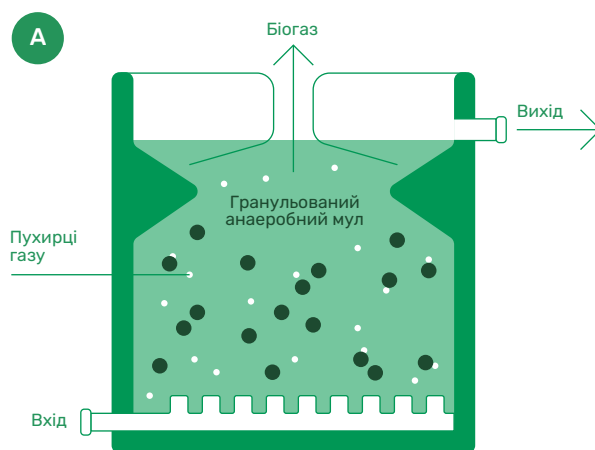
Рис. 17. Приклади технологій з високонавантажуваними біореакторами «сухого» типу:
а) – схема з реактором DRANCO;
б) схема з реактором VALORGA



Для анаеробної очистки стічних вод із виробництвом біогазу застосовуються біореактори, конструкція яких дозволяє утримувати мікрофлору в зоні реакції без істотного вимивання. Це, як правило, досягається завдяки використанню спеціального гранульованого мулу, що має високу гідравлічну крупність, а також внутрішнім конструктивним елементами реактора, які забезпечують утримання гранул при розрахунковій швидкості потоку стічної води.

Прикладами таких реакторів є установки типу UASB (upflow anaerobic sludge bed reactor), IC-реактор (internal circulating reactor), EGSB (expanded granular sludge bed reactor) та інші (**див. рис. 18**).

Рис. 18. Реактори для анаеробної очистки стічних вод з виробництвом біогазу:
а) реактор типу UASB;
б) реактор типу IC;
в) реактор типу EGSB



На **рис. 19** показано основні принципи вибору типу біореактора та технологічного режиму зброджування відповідно до виду використовуваної сировини. Гетерогенні види сировини – зокрема підстилковий гній, енергетичні або покривні культури, соломка тощо – зазвичай зброджуються у системах проточного типу з використанням біореакторів типу CSTR.

Рис. 19. Принцип вибору типу системи зброджування та типу анаеробного біореактора за типом використовуваної сировини

Тип реакційного середовища	Вологий	Вологий	Сухий	Сухий
Режим роботи	Проточний	Проточний	Проточний	Періодичний
Сфера застосування	Очистка промислових стічних вод	Переробка гетерогенної сировини	Переробка гетерогенної сировини	Переробка гетерогенної сировини
Промислові типи реакторів	UASB, EGSB, ECSB, IC...	CSTR (горизонт. та верт. типів), PFR, реактори циркуляційного типу	DRANCO, COMPOGAS, VALORGA	Гаражного або тунельного типу
Допустимий вміст СР у реакторі	< 1...3%	< 10...13%	< 35... 40 %	30...60%
Органічне навантаження	8-14 кгХПК/м³/добу (UASB) 15-30 кгХПК/м³/добу (EGSB)	2-4 кгСОР/м³/добу (типів) до 10-12 кгСОР/м³/добу (високонавантажувані)	4-5 гСОР/м³/добу (COMPOGAS) 10-15 гСОР/м³/добу (DRANCO, VALORGA)	Не нормується
Види сировини	Високо-концентровані виробничі стічні води з ХПК > 1 г/л	Агросировина (гній, поживні рештки, енергетичні культури), побічні продукти харчової промисловості, осади стічних вод	Органічна фракція твердих побутових відходів, відходи садово-паркового господарства	Органічна фракція твердих побутових відходів, відходи садово-паркового господарства

Отже, виробництво біометану сьогодні переважно здійснюється шляхом очищення біогазу, отриманого в результаті анаеробного зброджування органічних матеріалів, що застосовується в аграрному секторі, комунальному господарстві та промисловості. У меншому обсязі біометан виробляється з біогазу, зібраного при дегазації полігонів ТПВ. Перспективним напрямом є термічна газифікація твердої біомаси з подальшим метануванням синтез-газу, з прогнозованим зростанням частки такого біометану в ЕС до

40% до 2050 року. Розвиваються технології отримання е-метану на основі відновлюваного водню та СО₂, вилученого після збагачення біогазу. Також на ранніх стадіях знаходяться рішення із застосуванням мікроводоростей для секвестрації СО₂. Усі технології зброджування реалізуються в анаеробних біореакторах, що класифікуються за низкою технічних ознак: сферою застосування, режимом роботи, продуктивністю, типом середовища тощо. Вибір типу біореактора та технологічного режиму зброджування визначається властивостями сировини.

3.3

Технології очищення та збагачення біогазу

Як зазначалося вище, біометан – це очищений біогаз, з якого видалено вуглекислий газ та домішки. Як видно з даних **таблиці 9**, найбільшою відмінністю складу біогазу від складу природного газу або біометану є високий вміст вуглекислого газу.

Очищення та збагачення біогазу умовно поділяють на два етапи. Перший – це процеси попереднього очищення, під час яких вилучають воду, сірководень та інші домішки¹⁶. Другий – процеси збагачення, основною метою яких є видалення вуглекислого газу. Водночас відхідні гази після збагачення часто також потребують додаткового очищення від залишків сірководню або метану для їх безпечного випуску в навколишнє середовище.

Таблиця 9. Порівняння типового складу біогазу та вимог до складу природного газу та біометану для можливості подачі в газові мережі

Склад та інші характеристики	«Усереднений» біогаз, отриманий анаеробним зброджуванням	Вимоги кодексів газових мереж (ГТС, ГРМ) України
Метан (CH ₄), % об.	50-75	> 90
Вуглекислий газ (CO ₂), % об.	25-45	< 2
Вода (H ₂ O), % об.	2-7	-
Азот (N ₂), % об.	1-5	< 5
Кисень (O ₂), % об.	<2	< 0,2 (ГТС); < 1 (ГРМ)
Водень (H ₂), % об.	0-3	-
Сірководень (H ₂ S)	0,1-0,5 %	< 6 мг/м ³
Амоній (NH ₃), ppm	<1	-
Моноксид вуглецю (CO), % об.	0-0,3 %	-
Нижча теплота згоряння, МДж/нм ³	17,9-26,9	32,66-34,54 (при 25°C/20 °C)

¹⁶ Крамар В. Г. Технології збагачення біогазу та їх характеристики. Теплофізика та теплоенергетика, 2023, т. 45, №1. <https://ihe.nas.gov.ua/index.php/journal/article/view/525/449>



Основною метою збагачення біогазу є видалення вуглекислого газу для отримання біометану з високим вмістом метану

Основною метою збагачення біогазу є видалення вуглекислого газу для отримання біометану з високим вмістом метану. Залежно від фізичних принципів, на яких базуються відповідні технології, процеси збагачення умовно поділяють на адсорбційні, абсорбційні, мембранні, криогенні та біологічні.

Серед них найпоширенішими і такими, що вже **досягли комерційного рівня застосування, є такі технології:**

1. Адсорбція зі зміною тиску (*pressure swing adsorption, PSA*).
2. Абсорбція водою (*водяний скруббер, high pressure water scrubber, HPWS*).
3. Фізична абсорбція органічними сорбентами (*органічний фізичний скруббер, physical scrubber, PS*).
4. Хімічна абсорбція (*амінний скруббер, chemical scrubber, CS*).
5. Мембранна сепарація (*membrane separation, MS*).
6. Криогенна сепарація (*cryogenic separation, CrS*).

Адсорбція зі зміною тиску (PSA)

Адсорбція зі зміною тиску (PSA) — це періодичний процес, що передбачає використання кількох колон, заповнених адсорбентом, які працюють паралельно під тиском 0,4–1,0 МПа (рис. 20). Як адсорбенти зазвичай застосовують активоване вугілля або молекулярні сита.

Процес очищення ґрунтується на розділенні молекул газу за їх молекулярною масою та розміром. Під час проходження газу через колону CO_2 , H_2O , O_2 і N_2 поглинаються адсорбентом, тоді як метан накопичується у верхній частині колони під нижчим тиском. Цей процес є оборотним: під час циклу регенерації, який відбувається за зниження тиску (або, у деяких варіантах, при зміні температури), вуглекислий газ та інші адсорбовані сполуки вивільняються з матеріалу.

Коли адсорбент в одній колоні насичується, потік необробленого газу перемикається на іншу колону, де адсорбент уже відновлено. Під час регенерації тиск знижується у

кілька стадій, при цьому газ, що вийшли з адсорбенту, утворюють окремий відхідний потік. Частину очищеного метану використовують для продувки колон та їх підготовки до нового циклу.

Оскільки адсорбент необоротно поглинає сірководень, цей газ вважається токсичною домішкою для процесу PSA і має бути видалений на етапі попередньої підготовки газу. Суттєвим недоліком цього процесу є також необхідність додаткового очищення відхідних газів для запобігання їх викидам у навколишнє середовище.

Серед різновидів технології PSA виділяють адсорбцію зі зміною вакууму, де регенерація адсорбенту здійснюється при тиску нижче атмосферного; адсорбцію зі зміною температури, коли для відновлення сорбційних властивостей через колону пропускають нагрітий газ; а також адсорбцію з електронагріванням, при якій підвищення температури адсорбенту відбувається завдяки вбудованим електронагрівальним елементам тощо.

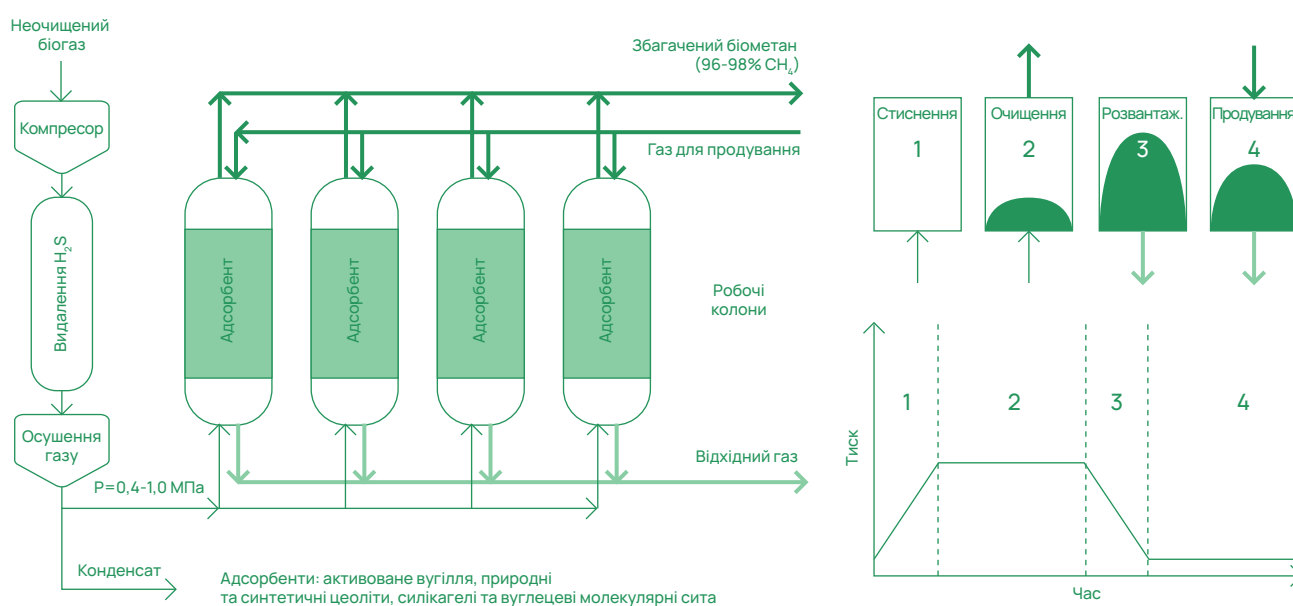


Рис. 20. Адсорбція зі зміною тиску

Абсорбція водою (водяний скруббер, HPWS)

Скрубер – це апарат, призначений для очищення газу шляхом його контакту з рідиною, у якій розчиняються або затримуються небажані газові компоненти. У випадку очищення біогазу за допомогою водяного скруббера цей процес базується на властивості вуглекислого газу значно краще розчинятися у воді, ніж метану, причому цей ефект посилюється за високого тиску.

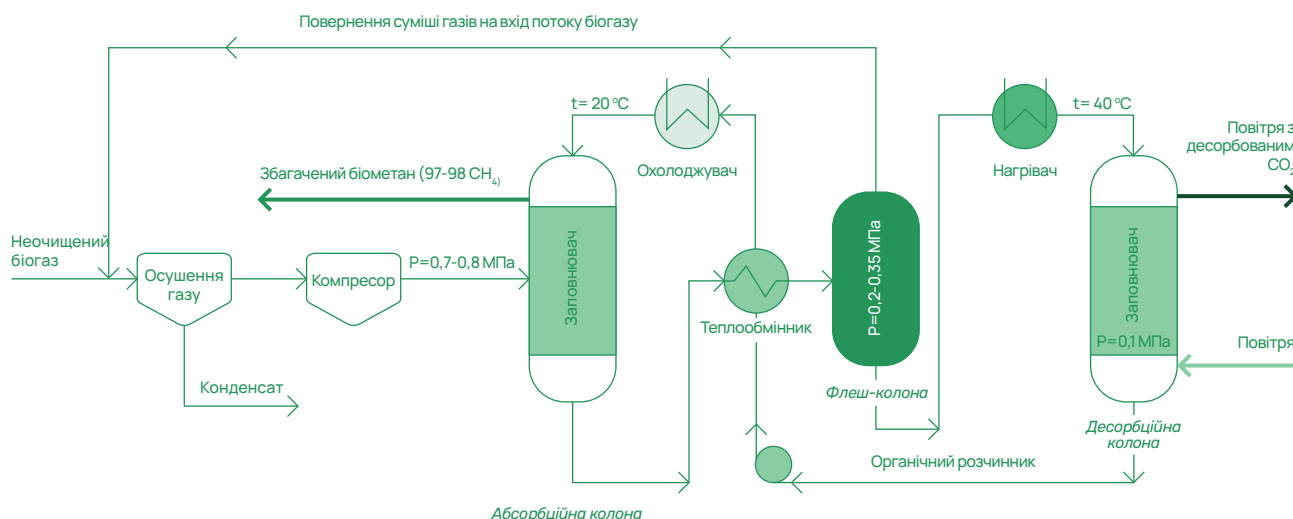
Типова установка складається з трьох основних елементів: абсорбційної колони, флеш-колони та десорбційної колони. В абсорбційній колоні, заповненій шаром пористого інертного матеріалу, необроблений газ подається під тиском 0,6–1,0 МПа і рухається назустріч потоку води. У результаті цього контакту вуглекислий газ і низка інших домішок розчиняються у воді. Далі вода надходить у флеш-колону, де тиск знижується до 0,25–0,35 МПа. За таких умов із води виділяється частина розчинених газів, які повертаються на вхід потоку необробленого газу. Близько 80% обсягу цих газів становить метан. Після цього вода потрапляє в десорбційну колону, де в шарі пористого інертного матеріалу вона продувається повітрям при ще нижчому тиску, звільняючись від вуглекислого газу та сірководню. Після очищення вода знову надходить в абсорбційну колону для повторного використання у циклі.

Фізична абсорбція органічними сорбентами (органічний фізичний скруббер, PS)

У цьому методі вуглекислий газ із біогазу поглинається спеціальними органічними розчинниками, які здатні вибірково вловлювати CO_2 без вступу в хімічні реакції (рис. 21). Розчинність CO_2 в органічних розчинниках у кілька разів вища, ніж у воді. За своєю конструкцією установка схожа на водяний скруббер, проте має кілька важливих відмінностей. Процес абсорбції відбувається за нижчого тиску – близько 0,7–0,8 МПа. Крім того, перед подачею в десорбційну колону органічний розчинник підігрівають до температури 40–80 °С, використовуючи скидне тепло від допоміжних установок, наприклад компресорів чи систем термічного окислення відхідних газів.

Завдяки високій здатності органічних розчинників поглинати CO_2 їх потрібно значно менше, ніж води, що знижує витрати на перекачування та циркуляцію в системі. Такий процес також дозволяє ефективно видаляти слідові кількості інших компонентів, як-от N_2 , H_2S , O_2 та H_2O . Водночас для оптимального вилучення сірководню зазвичай рекомендується додаткове попереднє очищення газу.

Рис. 21. Органічний фізичний скруббер



Хімічна абсорбція (амінний скруббер, CS)

Основна особливість цієї технології полягає у використанні спеціального реагенту, який хімічно зв'язується з молекулами CO_2 та видаляє їх з газового потоку (рис. 22). Найчастіше для цього застосовують водні розчини амінів, що здатні ефективно поглинати як вуглекислий газ, так і сірководень.

Установка складається з двох основних колон — абсорбера та десорбера. Необроблений біогаз подається в абсорбційну колону під тиском 0,1–0,2 МПа, тоді як водний розчин аміну надходить зверху і рухається назустріч газовому потоку. У процесі хімічної взаємодії температура розчину підвищується від 20–40 °C до 45–65 °C через екзотермічний характер реакції з CO_2 . При цьому здатність амінового розчину до поглинання вуглекислого газу також зростає завдяки більш високій швидкості хімічних реакцій.

Насичений CO_2 і H_2S розчин аміну виходить знизу абсорбційної колони, проходить через теплообмінник і надходить у десорбер. Тут під дією тепла, яке подається від нагрівача у нижній частині колони, температура підвищується до 120–150 °C, а тиск — до 0,15–0,3 МПа. У таких умовах хімічні зв'язки між молекулами CO_2 та аміну розриваються, що дозволяє регенерувати розчин для повторного використання.

Основним недоліком цього способу є значна кількість тепла, необхідна для регенерації розчину аміну, що впливає на енергетичну ефективність процесу.

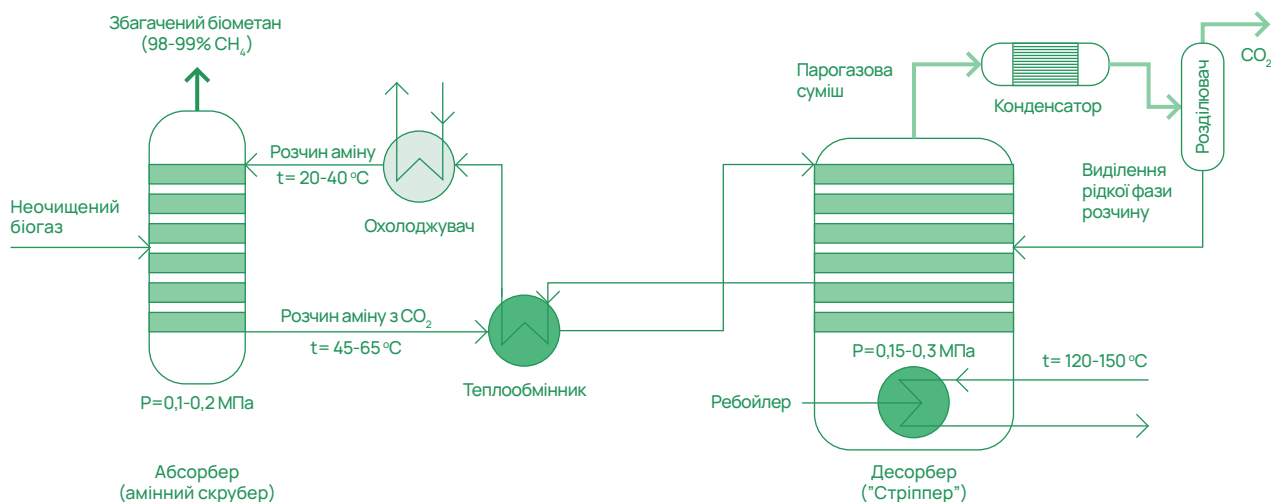
Кріогенна сепарація (CrS)

Принцип кріогенного збагачення біогазу ґрунтується на тому, що різні компоненти газової суміші мають різні температури та тиски конденсації (зрідження). Це дає змогу послідовно відокремлювати їх шляхом глибокого охолодження та стискання.

Очищення біогазу відбувається при тиску близько 8 МПа і температурах до –170 °C у кілька етапів, що включають як стискання, так і охолодження. На першому етапі з біогазу вилучають силосани, H_2S , вологу та галогени. Далі газ стискають до 1 МПа і пропускають через теплообмінник, де він охолоджується до –25 °C. На наступному етапі температура знижується до –55 °C, унаслідок чого вуглекислий газ конденсується у рідкий стан. На фінальному етапі газ охолоджується до –85 °C, де CO_2 твердне та ефективно відділяється від газу.

У результаті кріогенної сепарації, окрім біометану високої чистоти, отримують також чистий CO_2 , який може використовуватися в промисловості або приносити додатковий дохід. Ця технологія особливо добре підходить для виробництва рідкого біометану, який зручно транспортувати та зберігати. Водночас основним недоліком кріогенного способу є його висока вартість у порівнянні з іншими методами очищення та збагачення біогазу, що пов'язано з необхідністю використання складного і дорогого низькотемпературного обладнання.

Рис. 22. Амінний скруббер





Мембранна сепарація (MS)

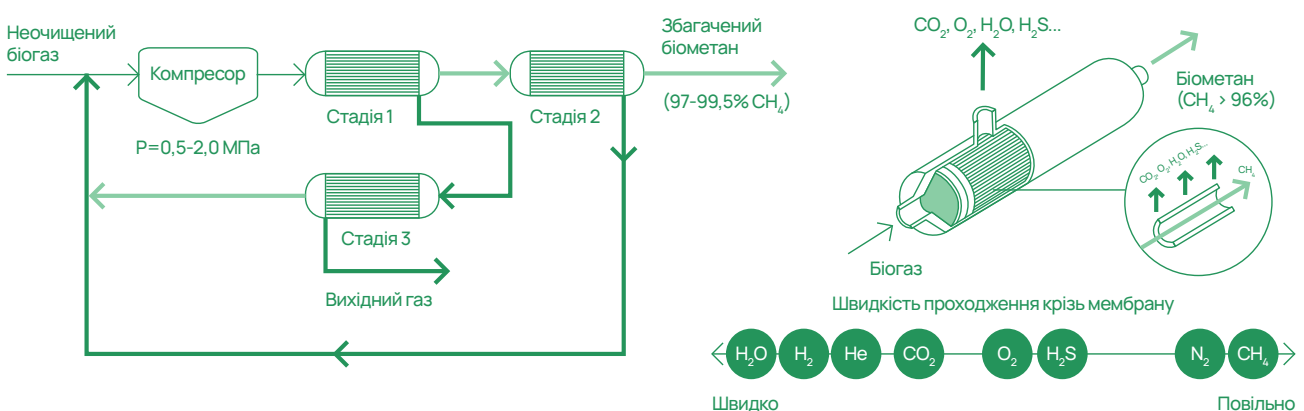
Мембранна сепарація — це технологія очищення біогазу, яка ґрунтується на використанні спеціальних мембран, здатних розділяти компоненти газу на молекулярному рівні. Мембрана — це щільний фільтр, який пропускає одні молекули швидше за інші, завдяки їхній різній проникності через пористу структуру або здатності розчинятися і проникати через щільний непористий мембранний матеріал.

У процесі очищення біогаз стискають до тиску 0,6–2,5 МПа і подають до мембранного сепаратора, де відбувається відділення вуглекислого газу (**рис. 23**). Очищений біометан виходить на стороні високого тиску, тоді як домішки, зокрема CO_2 , виводяться через сторону низького тиску.

Для очищення біогазу застосовують мембрани з полімерних або неорганічних матеріалів. Найбільш поширеними є полімерні мембрани — вони дешевші, прості у виготовленні й достатньо стабільні за умов високого тиску. Сучасні багатоступеневі мембранні системи здатні забезпечувати вміст метану понад 96%, що відповідає вимогам для подачі в газотранспортну мережу або використання як палива.

Мембранна сепарація є порівняно простою у впровадженні технологією, яка не вимагає складного обслуговування. Водночас, перед подачею на мембрани необхідно обов'язково видалити з біогазу такі домішки, як водяна пара та сірководень, щоб запобігти їхньому негативному впливу на мембранний матеріал.

Рис. 23. Мембранна сепарація



У **таблиці 10** наведено узагальнені дані щодо капітальних і виробничих витрат на впровадження різних технологій збагачення біогазу. З аналізу цих даних видно, що на питомі витрати значно сильніше впливає масштаб впровадження — тобто продуктивність установки, — ніж сама обрана технологія.

Досвід впровадження різних технологій збагачення біогазу в Європі демонструє помітну тенденцію до зростання частки мембранної сепарації у нових проєктах після 2014 року, що стало особливо вираженим із 2019 року. Станом на кінець 2023 року мембранна сепарація вже займала найбільшу частку ринку в Європі — 57%, тоді як на другому місці опинилися технології PSA та аміні скрубери із приблизно однаковими показниками — по 13%.

Зазначений розвиток пов'язаний із помітним покращенням експлуатаційних характеристик мембранних установок, що стало можливим завдяки розробленню нових типів високоселективних мембран. Крім того, важливими перевагами цієї технології є її компактність, можливість легко масштабуватися для різних потужностей, відсутність потреби у хімічних реагентах, невелика кількість рухомих частин, а також простота експлуатації та обслуговування. Сукупність цих факторів робить мембранну сепарацію однією з найпривабливіших технологій для впровадження на практиці.

В Україні вже працюють декілька біометанових заводів, усі з яких використовують мембранну технологію збагачення біогазу. Крім того, ще кілька підприємств перебувають на завершальному етапі підготовки до запуску. Серед них частина впроваджує мембранну технологію, а інші орієнтуються на використання амінного скрубера.

Слід також зазначити, що важливим питанням для забезпечення якості біометану, придатного для подачі в газотранспортні та розподільчі мережі України, є досягнення необхідної теплоти згоряння¹⁷. Це, своєю чергою, вимагає, щоб система збагачення забезпечувала вміст метану у біометані не нижче ніж 97,5–97,8% об., що також суттєво впливає на вибір технології очищення та доочистки.

Отже, технології очищення біогазу є ключовим етапом для отримання біометану з високим вмістом метану та відповідною якістю для подачі в газові мережі. Основні методи включають адсорбцію, абсорбцію, мембранну та криогенну сепарації, кожен з яких має свої переваги та обмеження щодо ефективності, вартості та масштабованості. Мембранна сепарація сьогодні є найбільш популярною технологією завдяки простоті, екологічності та можливості адаптації під різні обсяги виробництва. Вибір конкретної технології залежить від якості вихідного біогазу, вимог до кінцевого продукту та економічних аспектів проєкту.

Таблиця 10. Індикативні питомі витрати для різних технологій збагачення біогазу

Метод збагачення біогазу	Питомі капітальні витрати, €/м³ біометану/год					Питомі виробничі витрати, €-цент/м³ біометану		
Продуктивність по біометану, м³ на годину:	100	250	500	1000	2000	100	250	500
PSA	7700	4500	3000	2000	1300	12,8	10,1	9,2
HPWS	5900	3700	2600	1900	1300	14,0	10,3	9,1
PS	8800	5100	3400	2200	1500	13,8	10,2	9,0
CS	6300	3700	2500	1700	1100	14,4	12,0	11,2
MS	5200	3300	2400	1700	1200	10,8-15,8	7,7-11,6	6,5-10,1
CrS		4900	4000	3300		40,0	40,0	40,0

¹⁷ Вища теплота згоряння (25 °C/20 °C): мінімум 36,20 МДж/м³ (10,06 кВт*год/м³)

3.4

Використання біометану: подача в газові мережі, виробництво стисненого та зрідженого біометану

Якщо вироблений біометан не використано локально, то для подальшого використання його необхідно або подавати безпосередньо в газові мережі, або транспортувати до споживачів іншим способом — наприклад, автомобільним чи залізничним транспортом у стисненому (Bio-CNG) чи зрідженому (Bio-LNG) вигляді.

Система газових мереж України створює широкі можливості для доставки природного газу та біометану споживачам. Україна має розвинену газову інфраструктуру, яка включає газотранспортну систему (ГТС), газорозподільні мережі (ГРМ), підземні сховища газу (ПСГ), газовидобувні підприємства та всі необхідні об'єкти, такі як компресорні й газорозподільчі станції тощо.

Система газових мереж України створює широкі можливості для доставки природного газу та біометану споживачам

За даними Оператора ГТС України, загальна протяжність газопроводів становить 33,4 тис. км, а кількість газорозподільчих станцій (ГРС) сягає 1390 одиниць, що забезпечує надійне транспортування газу по всій країні.

Система магістральних газопроводів України є однією з найбільших у Європі та за протяжністю поступається лише газотранспортній системі Німеччини. Більшість магістральних газопроводів, що входять до складу української ГТС, мають діаметр понад 500 мм, а найбільші — понад 1000 мм, завдяки чому вони здатні транспортувати від 4,5 до 30 млрд м³ природного газу на рік. Тиск у газотранспортній системі підтримується на рівні 7,0–7,5 МПа в основних магістралях та близько 3,0 МПа у відгалуженнях, що ведуть до газорозподільчих станцій. Створення та підтримка необхідного тиску забезпечується численними компресорними станціями, розташованими вздовж основних ліній магістральних трубопроводів.

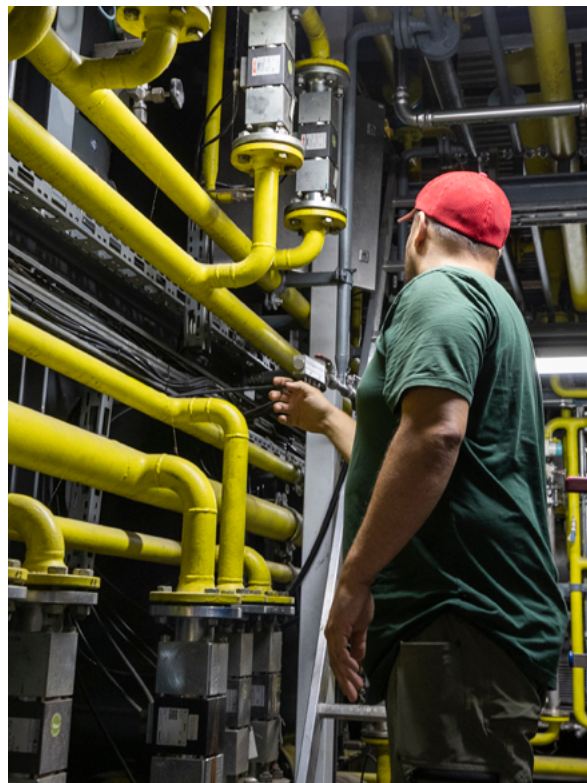
Основним призначенням ГРС є зниження тиску природного газу, що надходить із ГТС, до рівня, який є безпечним і придатним для ГРМ, через які газ отримує переважна більшість споживачів. Тиск у магістральних газопроводах зазвичай коливається в межах 4,5–7,5 МПа, залежно від конкретної ділянки трубопроводу, що значно перевищує стандартний діапазон тиску в ГРМ. Тому на газорозподільних станціях його, як правило, знижують до 0,25–0,35 МПа для подачі у розподільчі

мережі. В окремих випадках, коли до ГРС підключаються великі промислові споживачі, тиск можуть регулювати на рівні 0,6–1,2 МПа, але таких станцій не більше 10% від загальної кількості. Крім регулювання тиску, на газорозподільних станціях також здійснюється одоризація газу (додавання запахових речовин для виявлення витоків) і його облік.

Газорозподільні мережі — це технологічний комплекс, що об'єднує організаційно та технологічно пов'язані між собою об'єкти, призначені для розподілу природного газу від ГРС безпосередньо до споживачів. Робочий тиск у таких мережах зазвичай не перевищує 1,2 МПа.

Природний газ надходить до ГРМ у точках фізичного з'єднання з ГТС, із суміжних газорозподільних систем, а також від мереж газовидобувних підприємств, виробників біометану чи інших видів газу з альтернативних джерел, установки яких підключені до ГРМ. Для з'єднання між газопроводами різного тиску в межах газорозподільної мережі використовують спеціальні газорозподільні пункти.

Загальна протяжність газорозподільних мереж, що перебувають в управлінні операторів ГРМ в Україні, становить близько 309 тис. км. Переважно такі мережі організовані на регіональному рівні: у межах кожної області діє один оператор ГРМ, який відповідає за експлуатацію та обслуговування локальної газорозподільної системи. Останнім часом спостерігається активний процес об'єднання операторів ГРМ під управлінням НАК «Нафтогаз України», і нині більшість із приблизно 44 операторів ГРМ входять до Групи Нафтогаз.



Вибір точки приєднання біометанового заводу до газових мереж визначається передусім двома ключовими факторами: 1) фізичним розташуванням заводу щодо найближчих газових мереж, 2) можливістю цих мереж приймати увесь обсяг виробленого біометану рівномірним графіком упродовж року.

Саме другий фактор часто стає вирішальним. Це пояснюється тим, що споживання газу в Україні має виражену сезонність: у опалювальний сезон, який триває в середньому з середини жовтня до середини квітня, використання газу значно зростає. Навпаки, в літній період споживання різко падає — середня літня інтенсивність становить лише 18–30% від середньорічної, або 15–20% від зимової.

Вибір точки приєднання біометанового заводу до газових мереж визначається передусім двома ключовими факторами:

Фізичним розташуванням заводу щодо найближчих газових мереж

Можливістю цих мереж приймати увесь обсяг виробленого біометану рівномірним графіком упродовж року

Ця нерівномірність особливо відчутна в регіонах, де немає потужних промислових підприємств, здатних більш рівномірно споживати газ упродовж року. Більшість біометанових заводів не розраховані на значні коливання продуктивності, оскільки це суттєво впливає на їх економічну ефективність. Навіть якщо припустити, що через обмеження з боку ГРМ завод працюватиме взимку на 100% планової потужності, а влітку лише на 25–30%, це означатиме роботу на зниженій продуктивності більшу частину року, що негативно позначатиметься на окупності проекту.

При підключенні біометанового заводу до ГТС існує значно більша ймовірність, що мережа зможе приймати весь вироблений біометан рівномірно впродовж року. Це є важливою перевагою такого варіанту. Разом з тим, ГТС працює під значно вищим тиском, ніж ГРМ, що потребує додаткових витрат на стиснення біометану для його подачі в систему. Також у випадку приєднання до ГТС діють суворіші вимоги до якості біометану, зокрема до максимально допустимого вмісту кисню. Порівняння умов приєднання біометанового заводу до ГТС та ГРМ наведено у **таблиці 11**.

Таблиця 11. Основні вимоги по приєднанню до ГРМ та ГТС

Вимоги	ГРМ	ГТС
Тиск на вході до мережі	0,2-1,2 МПа	базові: 5,5/7,5 МПа (на деяких ділянках < 5,5 МПа)
<i>Вимоги до фізико-хімічних показників природного газу:</i>		
Вміст кисню до набуття чинності Технічного регламенту природного газу	1,0	0,2
Вміст кисню після набуття чинності Технічного регламенту природного газу, мол.%	від 0,02 до 1,0 в залежності від місця підключення	від 0,02 до 1,0 в залежності від місця підключення
Інші умови	Згідно глави 1 розділу III Кодексу ГТС	Згідно глави 1 розділу III Кодексу ГТС
<i>Необхідне обладнання для приєднання:</i>		
Телеметрія. Пункт вимірювання витрат газу на межі розмежування мереж у складі: – вузол обліку газу; – потоковий хроматограф; – потоковий вимірювач температури точки роси по воді та вуглеводням	Так	Так
Вузол одоризації	Так	В окремих випадках, залежно від місця підключення
Вузол регулювання тиску Вузол переключень	Так	Ні
Вузол підключення (у складі кульового крану та запірного клапану)	Ні	Так
Необхідність забезпечувати високий вхідний тиск до мережі	Ні	Так
Компресор високого тиску	Ні	Так
Можливі обсяги подачі біометану в мережу залежать від обсягу локального попиту	Так	В окремих випадках, залежно від місця підключення

Вимоги до якісних показників біометану, що подається в газові мережі, а також порядок приєднання виробників біометану до цих мереж визначаються Кодексом газотранспортної системи та Кодексом газорозподільних систем.

Для підключення до мереж заявник повинен звернутися до оператора відповідної газової мережі із запитом на приєднання. У деяких випадках доцільно одночасно звернутися як до оператора ГТС, так і до оператора ГРМ, щоб визначити оптимальні технічні умови для майбутнього приєднання.

Особливим варіантом приєднання біометанового заводу до ГРМ є **концепція використання реверсних компресорів**, передбачена Кодексами ГТС та ГРМ. Суть цієї схеми полягає в тому, що біометановий завод підключається до ГРМ, яка у свою чергу з'єднана з газотранспортною системою через спеціально встановлений реверсний компресор. Такий компресор здатний у разі потреби перекачувати надлишок газу з ГРМ у ГТС. Якщо ж у газорозподільній мережі спостерігається нестача газу, компресор зупиняється, і газ надходить із ГТС до ГРМ у звичайному режимі.

Завдяки цьому для біометанового заводу забезпечується можливість

приєднання до газорозподільної мережі з гарантованою подачею всього обсягу виробленого біометану в систему, навіть за умов змінного споживання газу в ГРМ.

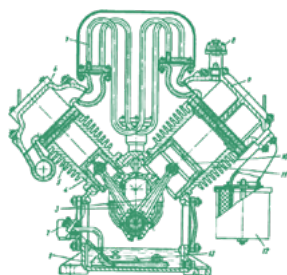
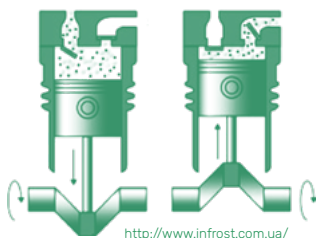
Для створення необхідного тиску, щоб подавати біометан у газову мережу, використовують компресори різних типів (**рис. 24**).

Для подачі біометану в газорозподільну мережу зазвичай застосовують гвинтові або роторно-пластинчасті компресори, які є дешевшими порівняно з поршневими. Проте вартість компресорної станції передусім визначається не типом компресора, а необхідним кінцевим тиском газу, що безпосередньо впливає й на потрібну електричну потужність. Саме електрична потужність компресора часто є основним фактором, що визначає його вартість.

Поршневі компресори дозволяють досягати значно вищих тисків при відносно невеликій продуктивності й зазвичай використовуються для подачі біометану в газотранспортну систему, де робочий тиск може сягати 7,5 МПа. Водночас у деяких випадках для подачі біометану в ГРМ додатковий компресор узагалі не потрібен. Це можливо, наприклад, при використанні мембранної технології збагачення, яка потребує

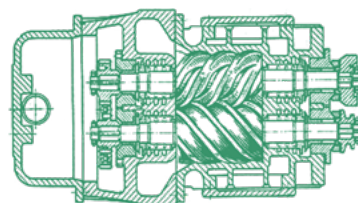
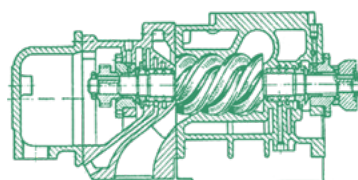
Рис. 24. Основні типи компресорів для стиснення біометану

Поршневі компресори,
діапазон тисків – до 600 бар

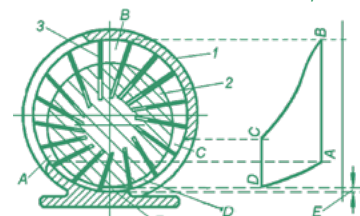


<https://naurok.com.ua/>

Гвинтові компресори,
діапазон тисків – до 20 бар



Роторно-пластинчасті компресори,
діапазон тисків – до 10 бар



Відцентрові компресори,
діапазон тисків – до 205 бар
для 4-8 ступінчастих

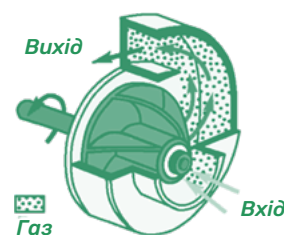
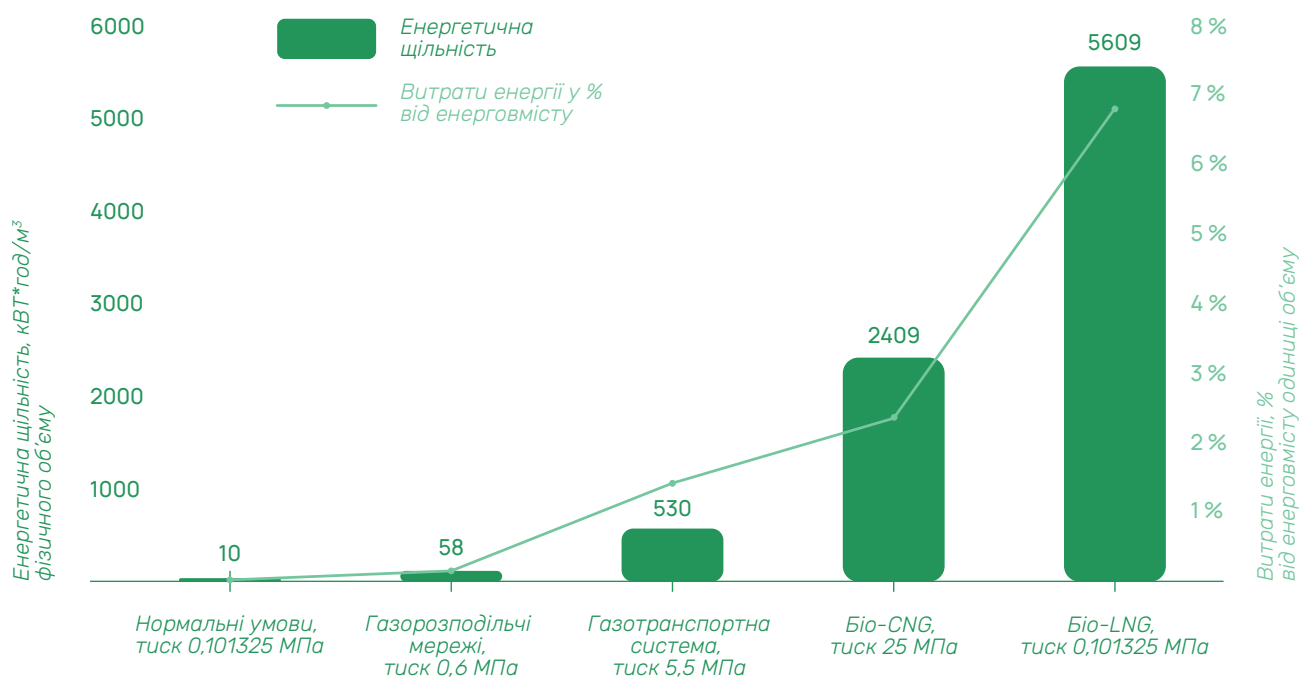


Рис. 25. Енергетична щільність та витрати енергії, необхідної для стиснення та зрідження біометану



попереднього високого тиску біогазу й забезпечує на виході тиск біометану на рівні 1,0–1,4 МПа, достатній для безпосередньої подачі в газову мережу.

Суттєвою статтею витрат при приєднанні виробників біометану до газових мереж є вартість прокладання з'єднувальних трубопроводів. При використанні пластикових труб із внутрішнім діаметром 100 мм ця вартість орієнтовно становить 50 тис. євро за кілометр, а для сталевих труб – близько 70 тис. євро за кілометр.

Іншими способами доставки біометану споживачам є його транспортування у стисненому або зрідженому стані, що здійснюється не трубопровідним, а звичайним наземним або морським транспортом у спеціалізованих контейнерах. Стиснення чи зрідження біометану виконується з метою зменшення його об'єму та підвищення енергетичної щільності. Водночас, це супроводжується додатковими витратами енергії на обробку – стиснення або зрідження, які становлять певний відсоток від енергії, що міститься в біометані (рис. 25).

Як видно з наведених даних, виробництво біо-CNG та біо-LNG дозволяє суттєво підвищити енергетичну щільність, що сприяє більш ефективному їх перевезенню наземним та морським транспортом.

Біо-CNG виробляють шляхом стиснення біометану до тиску 25–30 МПа, переважно за допомогою поршневих компресорів. Його використовують як транспортне паливо для наземного транспорту, зокрема вантажівок, автобусів, легкових автомобілів, а також тракторів та інших машин із двигунами внутрішнього згоряння. Стиснений газ заправляють у спеціальні балони, які об'єднують у контейнери по 8–12 балонів та перевозять вантажним транспортом до автозаправних станцій. Там балони підключають до систем заправки або ж заправляють автотранспорт безпосередньо на місці виробництва біо-CNG. Аналогічно до природного газу, біо-CNG заправляють у відповідні паливні балони, встановлені на автомобілях, під тиском 20–25 МПа. Густина стисненого газу становить 140–190 кг/м³.

Біо-LNG, на відміну від біо-CNG, отримують у рідкій формі шляхом охолодження біометану, попередньо додатково видаливши з нього небажані складові, які могли залишатися після процесу збагачення. Для охолодження використовують холодильні машини, що працюють за холодильними циклами Брайтона, Ренкіна, Лінде або Стірлінга. Також для виробництва біо-LNG застосовують простіший спосіб — охолодження в теплообміннику за допомогою зрідженого азоту, який має нижчу температуру, ніж температура зрідження метану. При цьому азот випаровується, а біометан переходить у рідкий стан. В залежності від масштабу установки, питомі витрати електроенергії при застосуванні холодильних машин становлять від 0,6 до 1,7 кВт·год на кілограм біометану. Біометан, як і природний газ, зріджується при атмосферному тиску за температури мінус 162 °С. Якщо тиск збільшується, необхідна температура зрідження може бути вищою. При атмосферному тиску та температурі мінус 162 °С густина зрідженого біометану становить 426–430 кг/м³.



На відміну від біо-CNG, біо-LNG завдяки вищій енергетичній щільності може ефективно транспортуватися на значно більші відстані. Саме тому його використовують для міжнародної торгівлі, доставляючи до інших країн як наземним, так і морським транспортом у спеціальних кріоконтейнерах. На відміну від балонів для біо-CNG, ці контейнери не працюють під високим тиском, проте мають підтримувати низьку температуру, близьку до температури зрідження біометану. Як паливо біо-LNG застосовують для вантажних автомобілів та морського транспорту. Крім того, біо-LNG, подібно до зрідженого природного газу, може бути повернений у газоподібний стан і подаватися в мережі природного газу, що є поширеною практикою при його імпорті з інших країн.

Для постачання біометану у вигляді біо-CNG як транспортного палива власник біометанового заводу може розглядати наступні варіанти:

1. Подача виробленого біометану в мережі природного газу та організація заправної станції у зручному місці, куди газ подаватиметься з газової мережі, де його стискатимуть до 20–25 МПа і подаватимуть для заправки автотранспорту.
2. Аналогічний варіант, але з будівництвом власного газопроводу до місця розміщення заправної станції.
3. Організація так званої «материнської станції» безпосередньо на заводі з виробництва біометану, де газ стискатимуть до 25–30 МПа та у вигляді біо-CNG перевозитимуть автотранспортом у спеціальних балонах до місця розташування «дочірньої станції», де балони під'єднуватимуть до системи заправки автотранспорту. Порожні балони автотранспортом повертатимуться назад на завод. Цей варіант застосовується у разі відсутності можливості або недоцільності приєднання до газових мереж чи будівництва власного газопроводу.



В Україні існують широкі можливості для використання біометану завдяки розгалуженій системі газових мереж

Схема постачання біометану споживачам в Україні та за її межами у формі біо-LNG передбачає його зрідження на біометановому заводі, після чого біо-LNG транспортують спеціальними кріостернами до місць споживання. Це можуть бути автозаправні станції LNG або LNG-термінали, звідки біо-LNG надходить для подальшого використання.

Таким чином, в Україні існують широкі можливості для використання біометану завдяки розгалуженій системі газових мереж, що дозволяє подавати його як до газорозподільних мереж, так і безпосередньо до газотранспортної системи. Вибір оптимальної точки приєднання визначається технічними характеристиками мереж та особливостями споживання газу в регіоні. Окрім подачі у газові мережі, важливими напрямками є виробництво біо-CNG та біо-LNG для використання як моторного палива чи транспортування на великі відстані. Ці рішення створюють додаткові шляхи реалізації біометану, підвищують гнучкість його збуту та сприяють розвитку внутрішнього й експортного ринку біометану в Україні.

Виробництво біометану в Україні:
можливості та виклики

4

ЕКОНОМІЧНИЙ
ПОТЕНЦІАЛ
БІОМЕТАНУ

4.1

Економіка біометанових проєктів

У цьому розділі розглядається виробництво біометану з біогазу, отриманого шляхом анаеробного зброджування. Такий напрям передбачає функціонування біогазової станції, де утворюється сирий біогаз, та станції очищення та збагачення, де цей біогаз доводиться до якості біометану.

Обидві станції можуть бути об'єднані в єдиний виробничий комплекс, або ж просторово розділені, коли сирий біогаз транспортується до станції збагачення спеціально прокладеним газопроводом — залежно від технічної та економічної доцільності.

Основні складові вартості біометану

Ланцюг створення вартості біометану (рис. 26) може включати наступні основні ланки:

- Вирощування сировини (охоплює енергетичні та покривні і проміжні культури);
- Збір та заготівля сировини;
- Зберігання сировини (за потреби);
- Транспортування сировини до біогазової станції;
- Попередня обробка сировини (за потреби);
- Подача сировини в технологічний процес;
- Виробництво біогазу в біореакторах;

Попередня очистка біогазу від парів вологи, сірководню та інших домішок;

Збагачення біогазу до біометану (видалення CO₂ та інших домішок);

Кондиціювання біометану (нормування енергетичного вмісту та одоризація – за потреби);

Компримування біометану (за потреби);

Транспортування біометану до кінцевого споживача (ГРМ, ГТС, мобільні контейнери для перевезення стисненого біометану (bio-CNG), криостерни для перевезення скрапленого біометану (bio-LNG)).

Окрім власне біогазу, у процесі його виробництва утворюється також дигестат. Його об'єм зазвичай становить 80–95 % від обсягу вхідної сировини. Дигестат є цінним органічним добривом і, у більшості випадків, вноситься на сільськогосподарські поля, що знаходяться поруч із біогазовою станцією.

Дигестат є цінним органічним добривом

Рис. 26. Ланцюги створення вартості біометану



Для зручності в подальшому використанні дигестат зазвичай розділяють на рідку та тверду фракції, найчастіше за допомогою шнекових сепараторів. Проте можуть застосовуватись і інші системи розділення, наприклад, декантерні центрифуги. Вибір відповідного обладнання залежить від загального вмісту твердих часток, їх розмірів, а також від планованих шляхів утилізації або додаткової обробки дигестату.

Рідку фракцію зазвичай накопичують у лагунах і вносять у ґрунт двічі на рік. Тверду фракцію можна використовувати як органічне добриво.

Операції з розділення на фракції, зберігання, транспортування та внесення дигестату також можуть становити суттєву частку в загальній собівартості виробництва біометану.

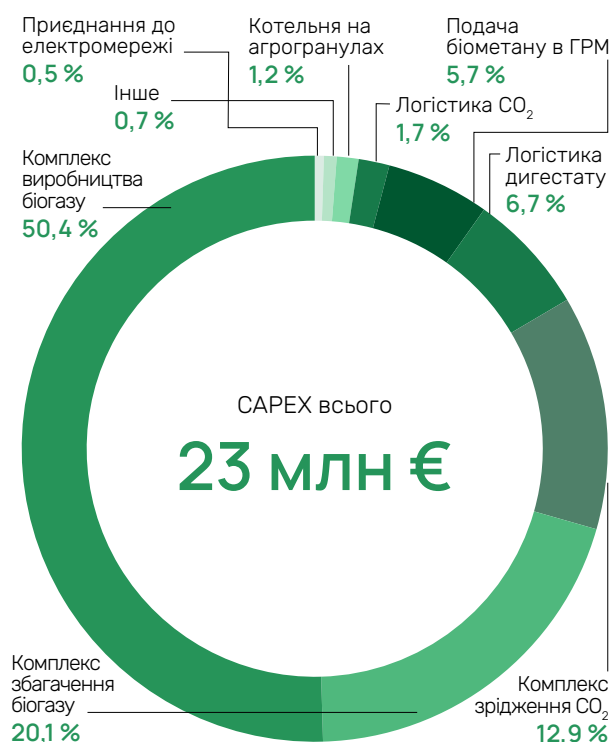
Інвестиційні витрати (CAPEX)

Основні статті інвестиційних витрат

у проєктах з виробництва біометану включають витрати на обладнання, машини та спеціальну техніку, а також витрати на вишукувальні, проєктні, підготовчі та будівельно-монтажні роботи, проведення пусконаладжувальних робіт і біологічний запуск, отримання дозвільної документації, ліцензій, технічних умов на приєднання до електричних та газових мереж тощо.

У структурі інвестиційних витрат біометанових проєктів **найбільш витратною частиною, як правило, є комплекс виробництва біогазу**. Наприклад, у проєкті з виробництва 8 млн м³ біометану на рік та 11 тис. тон скрапленого CO₂ на рік, із аграрного сировинного міксу, що включає курячий послід, кукурудзиння, гній свиней та покривні культури, частка витрат на комплекс виробництва біогазу становитиме близько 50 % загального капіталовкладення (CAPEX). Значну частку інвестицій також займають блок збагачення біогазу та установка зрідження CO₂ — разом вони складають близько третини загальних витрат (**рис. 27**).

Рис. 27. Приклад структури інвестиційних витрат в проєкт виробництва біометану та зрідженого CO₂



Згідно з опитуванням біометанових проєктів у Європі, проведеним у 2023 році Biomethane Industrial Partnership (BIP)¹⁸, питомі інвестиції у біогазовий комплекс варіювалися в залежності від типу сировини та масштабів проєкту. Так, для аграрних проєктів потужністю понад 2000 м³ біогазу на годину (категорія 4), інвестиції становили орієнтовно 900–1600 євро на 1 кВт (євро/кВт_{біометан}). Натомість для проєктів, що базуються на відходах

комунального господарства, з потужністю 500–1300 м³/год біогазу (категорія 2), питомі інвестиції були значно вищими — у межах 3700–5500 євро/кВт_{біометан} (див. рис. 28).

За результатами цього дослідження, витрати на біогазову станцію становили від 75 % до 90 % загального обсягу капіталовкладень (CAPEX) у комплекс виробництва біометану.

Рис. 28. Питомі інвестиції в станцію виробництва біогазу

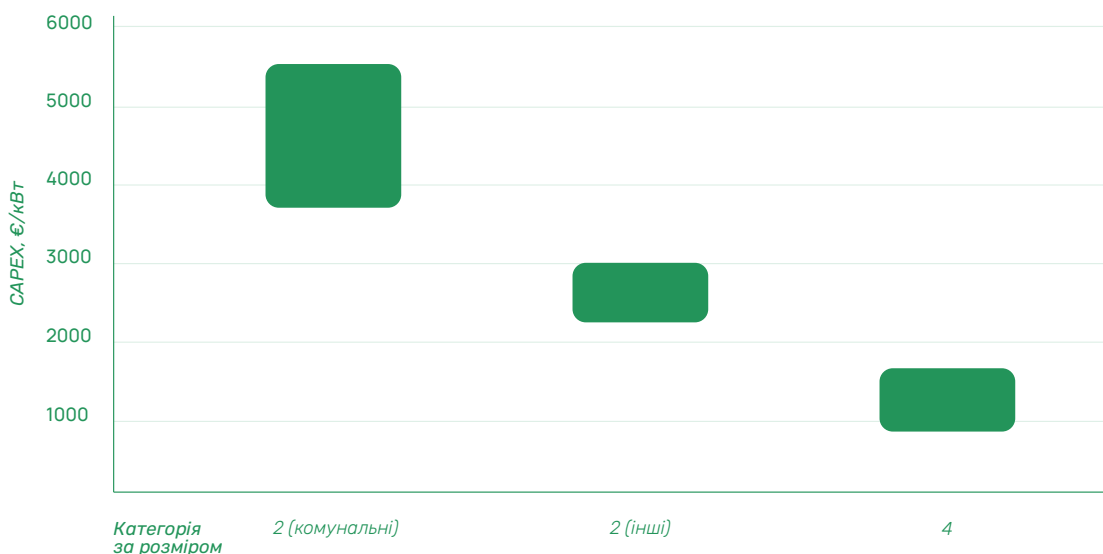
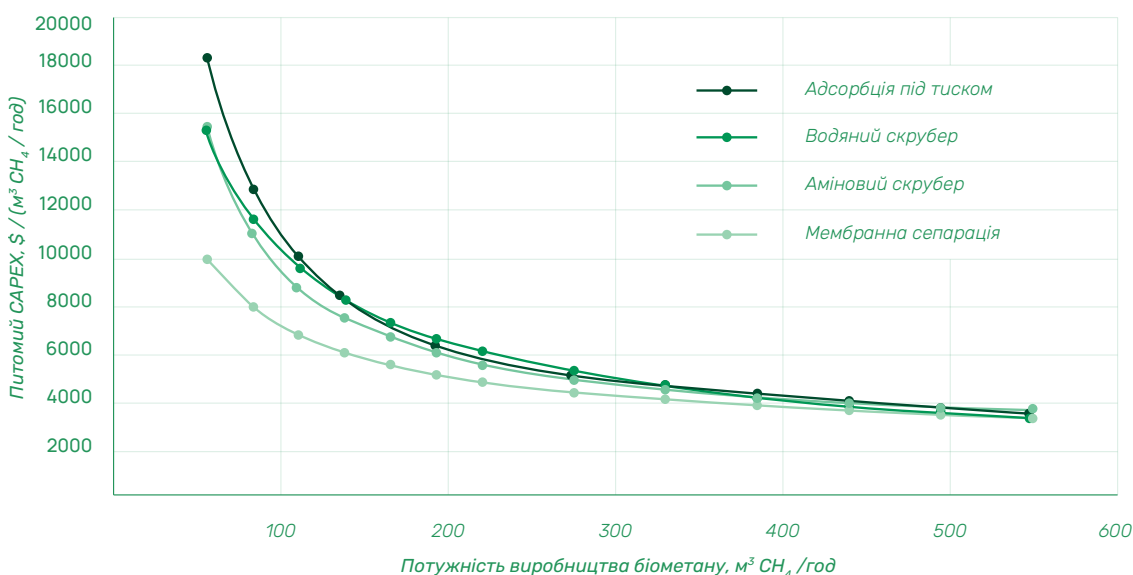


Рис. 29. Питомі капітальні затрати на станції очистки та збагачення біогазу



¹⁸ Biomethane Industrial Partnership. Insights into the current cost of biomethane production from real industry data: https://bip-europe.eu/wp-content/uploads/2023/10/BIP_TF4-study_Full-slidedeck_Oct2023.pdf

В Україні комплекс виробництва біогазу з аграрної сировини середнього масштабу, орієнтований на виробництво 1–5 млн м³ метану на рік, може коштувати від 1,6 до 4,6 млн євро. У свою чергу, більш масштабні проєкти, розраховані на 10–20 млн м³ CH₄ на рік, потребують інвестицій у розмірі 10–18 млн євро.

Капітальні витрати на станцію збагачення біогазу залежать від обраної технології очищення та насамперед масштабу проєкту. Водночас, починаючи з рівня продуктивності приблизно 400–500 м³ CH₄/год, різниця у вартості проєкту між різними технологіями значною мірою нівелюється (див. рис. 29). Для станції збагачення середньої потужності – на рівні 500 м³ CH₄/год, питомі капітальні витрати (CAPEX) становлять орієнтовно 3450–3775 доларів США на 1 м³ CH₄/год.

Питомі капітальні витрати на установки зі зрідження біометану можуть коливатися в широкому діапазоні – від 388 до 1962 доларів США/[тLNG/рік] (див. рис. 30). За середніми показниками питомих CAPEX, найбільш економною є технологія охолодження рідким азотом – приблизно 459 доларів США/[тLNG/рік], тоді як найдорожчою залишається технологія на основі циклу Лінде, з показником близько 1488 доларів США/[тLNG/рік].

Вартість станції трансферу біометану в газову мережу, обладнаної вузлом комерційного обліку та системою



одоризації, для проєктів середнього масштабу становить орієнтовно 75–86 тис. доларів США. Крім того, середні витрати на прокладання газопроводів внутрішнім діаметром 80–150 мм орієнтовно становлять 55–150 доларів США за погонний метр для сталевих, та 40–110 доларів США за погонний метр для пластикових трубопроводів.

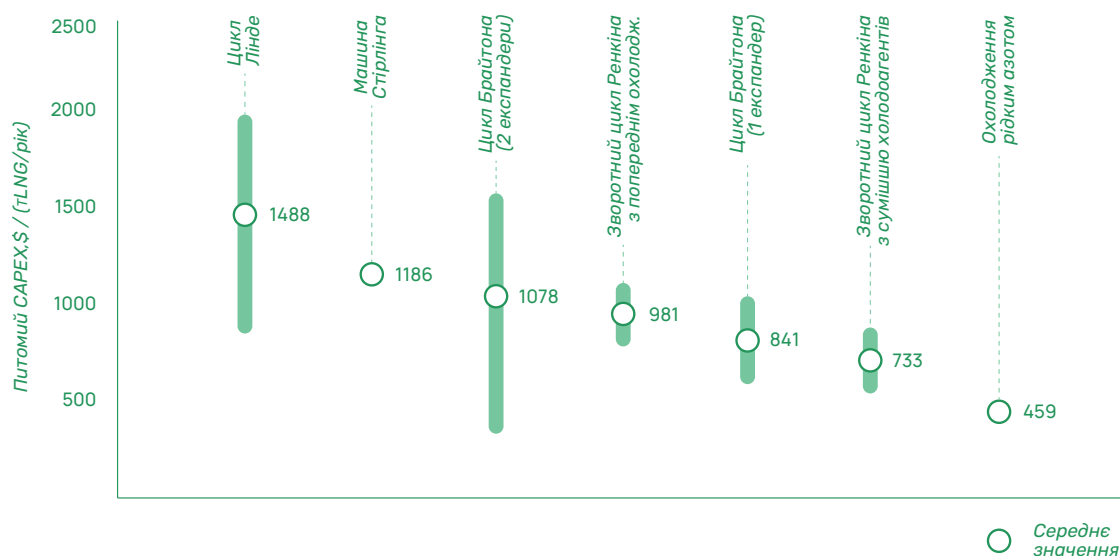


Рис. 30. Питомі капітальні витрати на станцію зрідження біометану до bio-LNG

Експлуатаційні витрати (ОРЕХ)

Щорічні експлуатаційні витрати на виробництво біометану включають широкий перелік статей, необхідних для стабільної роботи комплексу. Зокрема, це:

- витрати на сировину;
- заміна зношуваних частин обладнання;
- планові та позапланові ремонти;
- закупівля електроенергії з мережі;
- обігрів біореакторів;
- придбання витратних матеріалів (олив, присадок, мастил тощо);
- біологічний супровід (аналізи сировини, моніторинг і оптимізація біопроцесу);
- обслуговування техніки, якщо передбачено відповідними договорами;
- страхування, ліцензійні збори та інші операційні платежі;
- фонд оплати праці штатного персоналу.

Сировина є найбільш витратною складовою щорічних операційних витрат (ОРЕХ) у біогазових та біометанових проектах і може становити 50 % і більше від загального обсягу експлуатаційних витрат.

Сировина є найбільш витратною складовою щорічних операційних витрат

У практиці реалізації таких проектів існує два основних підходи до формування вартості сировини:

За першим підходом, у проекті враховується ринкова (конкурентна) вартість сировини, тобто ціна, яку її власник міг би отримати за реалізації цієї сировини іншим споживачам на комерційних умовах. Наприклад, гній великої рогатої худоби може реалізовуватись як органічне добриво, особливо в тих випадках, коли господарство не має власних полів поблизу ферми. У такій ситуації ціна гною ВРХ може становити 300–1000 грн/т (приблизно 7,3–24,2 доларів США/т), а іноді й більше. Ціна пташиного посліду на ринку органічних добрив, залежно від постачальника та обсягів, коливається у межах 150–400 грн/т (близько 3,6–9,7 доларів США/т).

За іншим підходом, власник сировини встановлює «нульову» вартість на вході в біогазовий комплекс, за умови, що ця сировина раніше вносилась на поля компанії, і що дигестат, отриманий після зброджування, також буде повернутий на ці ж поля.

У разі закупівлі сировини за ринковими цінами, передбачається, що утворений у процесі зброджування дигестат також має певну ринкову вартість. Його вартість розраховується за принципом еквівалентної вартості поживних елементів (азот — N, фосфор — P, калій — K), що містяться у вихідній сировині, з урахуванням поточних цін цих елементів в мінеральних добривах. Натомість, у разі, коли у проекті використовується сировина з «нульовою» вартістю (тобто та, що раніше вносилась на поля підприємства, і тепер дигестат повертається туди ж), вартість дигестату також може умовно оцінюватись як «нульова».

У таблиці 12 наведено орієнтовні ринкові ціни на окремі види сировини, що використовуються у біометанових проектах, а також подано розрахунок сировинної складової у собівартості виробництва 1 м³ метану (CH₄). Ці дані дозволяють оцінити вплив вибору сировини на загальну економіку проекту.

Таблиця 12. Сировинна складова собівартості 1 м³CH₄ з окремих видів сировини

№	Вид сировини	Питомий вихід CH ₄ , м ³ CH ₄ /т	Вартість сировини (конкурентна), USD/т	Сировинна складова собівартості CH ₄ USD/1000 м ³ CH ₄
#1	Жом (СР 25%)	83	1,5-4,8	18,1-57,8
#2	Послід курячий (СР 40%)	90	3,6-9,7	40,0-107,8
#3	Солома пшениці	220	6,9-21,1	17,7-95,9
#4	Гній ВРХ (СР 25%)	44	7,3-24,2	165,9-550,0
#5	Силос кукурудзи (СР 33%)	107	36,3-38,7	339,3-361,7
#6	Меляса	224	42,6-116	190,2-517,9

Вартість логістики сировини може включати, залежно від її типу, такі складові: вартість заготівлі, транспортування до біогазової станції, а також витрати на зберігання (див. таблицю 13). Наведені в таблиці орієнтовні показники відображають можливу повну логістичну вартість на вході сировини в біогазовий комплекс.

Таблиця 13. Складові вартості логістики окремих видів сировини для біогазу

Складова вартості	Питома вартість логістичних складових для сировини			
	Гній, послід	Солома (85% СР)	Кукурудзиння (70-75% СР)	Силос кукурудзи, силос жита озимого (30-35% СР)
Вартість заготівлі (USD/т)	—	19,4-23,7	21,6-27,0	15-17 (включає також вартість вирощування)
Вартість транспортування (USD/т/км)	0,11-0,13	0,15-0,17	0,13-0,15	0,10-0,12
Вартість зберігання (USD/т)	—	4,3-5,4	4,3-5,4	5,4-6,5

Виробництво біогазу та біометану супроводжується значним споживанням електричної та теплової енергії. Зокрема, потреба в електроенергії для виробництва біогазу становить орієнтовно 0,2–0,3 кВт·год на 1 м³ метану (CH₄), а теплової енергії — близько 1,0–1,2 кВт·год/м³ CH₄. У проєктах виробництва біометану сумарне споживання електроенергії може сягати 20 % і більше енергії виробленого біометану. Це залежить від конкретних технологічних рішень та типу обладнання, що використовується. Покриття потреб в електроенергії може здійснюватись як із зовнішньої електромережі, так і шляхом використання частини виробленого біогазу для комбінованого виробництва електроенергії та тепла, необхідних для функціонування самого комплексу.

Вартість щорічного обслуговування біогазової станції, включаючи заміни зношуваних деталей, ремонтні роботи та попередню підготовку біогазу, зазвичай становить 2–3 % від загальної суми інвестицій (CAPEX) у відповідний об'єкт. Цей показник дозволяє орієнтовно оцінити обсяг витрат на технічну підтримку комплексу протягом експлуатації.

Річні операційні витрати станцій збагачення біогазу з продуктивністю

500 м³ CH₄/год становлять орієнтовно 84–115 доларів США/1000 м³ метану (**див. рис. 31**). Технології водяного скрубера, адсорбції при змінному тиску та мембранної сепарації є співставними за рівнем питомих експлуатаційних витрат. Натомість, технологія амінового скрубера є відчутно дорожчою в обслуговуванні, що слід враховувати при виборі технологічного рішення.

Річні експлуатаційні витрати на обслуговування установок зі зрідження біометану зазвичай становлять 2,5–3,0 % від їх вартості ¹⁹. **При потужності установки 5 тLNG/добу, приведена собівартість процесу зрідження становить орієнтовно:**

108 USD на 1000 м³ CH₄

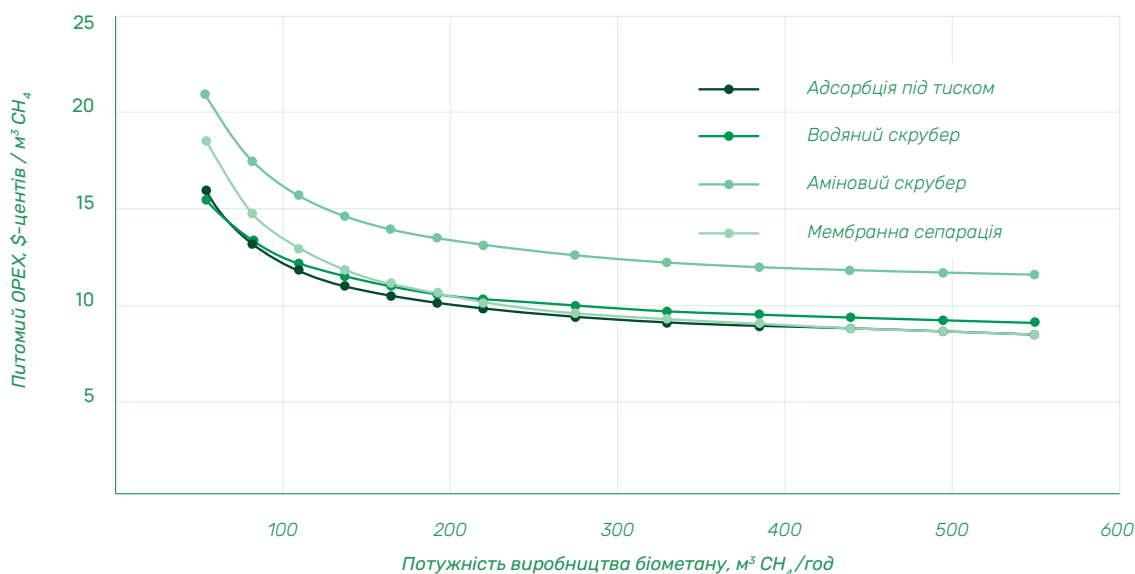
для систем зі змішаним холодильним циклом;

270 USD на 1000 м³ CH₄

для систем з випаровуванням азоту.

Системи охолодження рідким азотом є простішими в експлуатації та дешевшими, однак потребують значних витрат рідкого азоту. Середнє споживання рідкого азоту становить приблизно 1,8 кг на 1 м³ зрідженого біометану.

Рис. 31. Питомі річні операційні витрати на очистку та збагачення біогазу

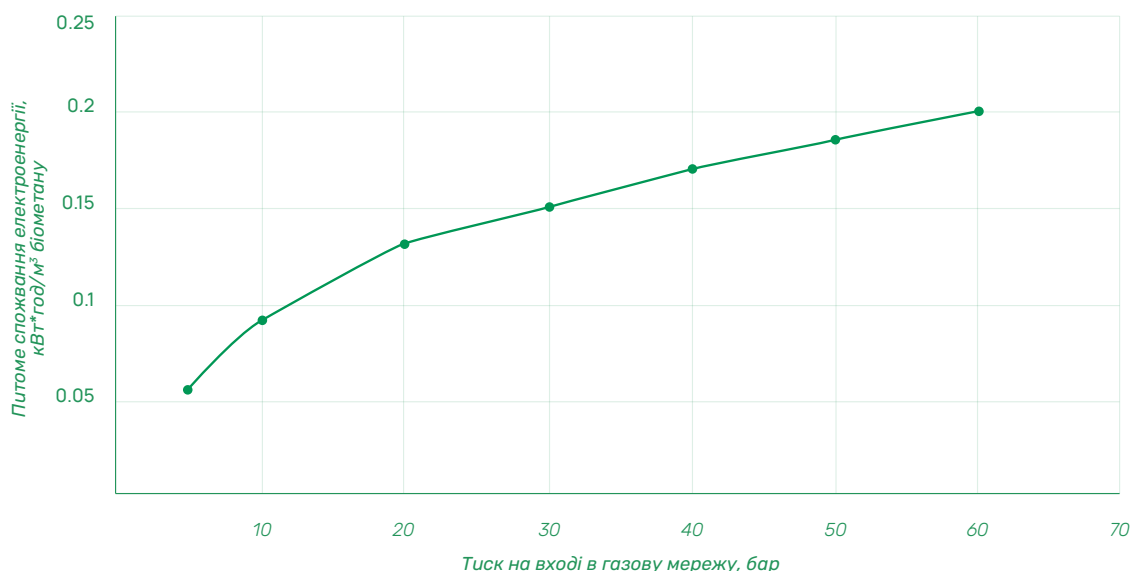


¹⁹ Börjesson P., Lantz M., Andersson J., Björnsson L. et al., 2016, Methane As Vehicle Fuel—A Well-To-Wheel Analysis: https://f3centre.se/app/uploads/f3_2016-06_borjesson-et-al_final_170111-1.pdf

Споживання електричної енергії при компримуванні біометану до тиску 5–60 бар становить від 0,055 до 0,2 кВт·год/м³ біометану (див. рис. 32).

У відсотковому співвідношенні це відповідає 0,55–2,0 % енергії біометану.

Рис. 32. Залежність питомої витрати електроенергії від тиску подачі біометану в мережу²⁰



У разі необхідності транспортування біометану газотранспортною системою України за межі України виникають відповідні транспортні витрати, які визначаються тарифами, встановленими Оператором ГТС. На період 2025–2029 років тарифи на транспортування природного газу через міждержавні з'єднання становлять:

для точок входу — 11,44 USD за 1000 м³/добу (без ПДВ);

для точок виходу — від 2,78 до 17,34 USD за 1000 м³/добу (без ПДВ), залежно від конкретного маршруту²¹. Ці тарифи можуть застосовуватись і до біометану, що транспортується через ГТС, відповідно до режиму доступу до системи та чинного регулювання.

Оператором ГТС України встановлено тарифи не лише на транскордонне, а й на внутрішнє транспортування газу в межах країни²².

Зокрема:

на вході в ГТС газовидобувному підприємству необхідно сплатити 464,37 грн (11,22 USD) за 1000 м³/добу (без ПДВ);

у точках відбору газу тариф становить 501,97 грн (12,13 USD) за 1000 м³/добу (без ПДВ).

²⁰ Theißing, M. et al. 2006. Biogas. Einspeisung und Systemintegration in bestehende Gasnetze. Berichte aus Energie- und Umweltforschung. Wien: BMVIT: https://na-chhaltigwirtschaften.at/resources/edz_pdf/0815_decentralised_generation_smart_grids.pdf

²¹ Тарифи на послуги транспортування природного газу для транскордонних точок входу і точок виходу в/з газотранспортну(ю) систему(и) для ТОВ «Оператор ГТС України»: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/prirodniy-gaz/tarifi-dlya-pidpriyemstv-naftogazovoyi-sferi/tarifi-na-poslugi-transportuvannya-prirodnogo-gazu-dlya-transkordonnih-tochok-vhodu-i-tochok-vihodu-vz-gazotransportn-uoyi-sistemui-dlya-tov-operator-gts-ukrayini>

²² Тарифи на послуги транспортування природного газу для внутрішніх точок входу і точок виходу в/з газотранспортну(ю) систему(и) для ТОВ «Оператор ГТС України»: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/prirodniy-gaz/tarifi-dlya-pidpriyemstv-naftogazovoyi-sferi/tarifi-na-poslugi-transportuvannya-prirodnogo-gazu-dlya-vnutrishnih-tochok-vhodu-i-tochok-vihodu-vz-gazotransportn-uoyi-sistemui-dlya-tov-operator-gts-ukrayini>

У разі зберігання біометану в підземних сховищах газу (ПСГ) діють такі тарифи:

зберігання — 0,4 грн (0,0097 USD)
за 1000 м³/добу;

закачування в ПСГ — 243,52 грн
(5,89 USD);

відбір із ПСГ — 253,03 грн (6,12 USD),
усі тарифи без ПДВ, розраховані за
1000 м³/добу.

Крім того, до всіх послуг транспортування та зберігання можуть застосовуватись підвищувальні або понижувальні коефіцієнти, передбачені регуляторною методикою.

Дохідність та окупність біометанових проєктів

Доходи біометанового проєкту можуть формуватись із кількох джерел, що забезпечують комплексну монетизацію технологічного процесу. Основні з них — це продаж біометану як товару, продаж або корисне використання CO₂, що утворюється в процесі збагачення біогазу, продаж або облік еквівалентної вартості дигестату. Такий підхід дозволяє підвищити економічну ефективність проєкту за рахунок максимального використання продуктів біометанового виробництва.

На сьогоднішній день існують дві основні схеми реалізації товарного газоподібного біометану, а саме:

1. Реалізація на внутрішньому ринку — шляхом укладення договорів постачання між виробником біометану та іншим суб'єктом господарювання.
2. Віртуальний та/або фізичний експорт біометану — через газотранспортну систему України до європейських країн або у формі bio-LNG.

З урахуванням того, що собівартість виробництва біометану може сягати 500–700 євро за 1000 м³, за поточного рівня цін на природний газ в Україні

виробництво біометану з метою його прямого заміщення природного газу на внутрішньому ринку є економічно нерентабельним.

При експорті біометану його ціна буде формуватись за формулою:

Ціна біометану = Біржова ціна ПГ + Премія

Біржові ціни на природний газ на майданчику TTF (Нідерланди) протягом останніх п'яти років коливались у широкому діапазоні — від 4 до 339 євро/МВт•год. Винятковим був 2022 рік, що характеризувався різким зростанням цін у зв'язку з військовою агресією РФ та запровадженням санкцій щодо російського трубопроводного газу. Починаючи з 2023 року, ціни відносно стабілізувалися та утримуються в межах 24–54 євро/МВт•год.

У контрактах із трейдерами біометану ціна природного газу може бути визначена як фіксована, так і змінювана — залежно від умов, узгоджених між сторонами.

Премія за біометан є предметом договірних умов між виробником і трейдером та визначається індивідуально для кожного проєкту. Розмір цієї премії суттєво залежить від двох ключових чинників:

1. Виду сировини, з якої вироблено біометан. Перевага надається сировині, що включена до Додатку IX Директиви ЄС RED II/RED III, яка передбачає стимулювання використання відходів та залишків.
2. Обсягу викидів парникових газів по всьому ланцюгу створення вартості біометану — так званого карбонового сліду, що вимірюється в грам еквіваленту CO₂ на мегаджоуль енергії біометану (гCO₂екв/МДж).



Чим нижчий вуглецевий слід і більш стале походження сировини, тим вищою може бути премія, що закладається в ціну біометану. Варто також зазначити, що розмір премії та загальна контрактна ціна на біометан, навіть за однакового рівня карбонового сліду, можуть суттєво відрізнятися залежно від ринку збуту та країни експорту. Це пояснюється різним рівнем попиту, регуляторної підтримки, наявності систем сертифікації сталості та умовами роботи трейдерів у конкретних країнах. На сьогодні орієнтовна ринкова ціна біометану може становити 800–900 євро за 1000 м³, що значно перевищує середню вартість природного газу і відображає його додану екологічну та кліматичну цінність.

**Чим нижчий
вуглецевий слід
і більш стале
походження
сировини, тим
вищою може
бути премія, що
зкладається
в ціну біометану**

Ринок збуту CO₂, що утворюється під час збагачення біогазу до біометану в Україні, поки що перебуває на стадії формування. Відтак, ціна реалізації CO₂ наразі може орієнтуватися на існуючі ринкові тенденції у сегментах харчового та технічного вуглекислого газу. Орієнтовна ціна продажу CO₂ на сьогодні становить близько 50 євро за тонну.

Варто наголосити, що реалізація CO₂, який заміщує викиди вуглекислого газу з викопного палива, дозволяє знизити загальний карбоновий слід біометану. Це, у свою чергу, підвищує премію на біометан при його реалізації на зовнішніх ринках. Таким чином, продаж CO₂ забезпечує для біометанового проєкту як прямий дохід, так і непрямий економічний ефект, сприяючи підвищенню загальної рентабельності.

Дигестат може стати додатковим джерелом доходу для біометанового проєкту, за умови врахування його еквівалентної вартості при внесенні на поля як замітника частини мінеральних добрив. Оцінка еквівалентної вартості базується на вмісті поживних елементів (NPK) у дигестаті та ринкових цінах на відповідні мінеральні добрива. Наприклад, на сьогодні:

орієнтовна ціна азоту в аміачній селітрі — 1,4 євро/кг N,

фосфору в суперфосфаті — 1,8 євро/кг P,

калію в калій-магnezії — 1,1 євро/кг K.

Удобрювальна цінність дигестату значною мірою залежить від типу використаної сировини та вмісту в ній поживних речовин (NPK). У **таблиці 14** наведено типовий склад поживних речовин у дигестаті, отриманому на біогазових станціях, що працюють з аграрною сировиною.

Таблиця 14. Вміст NPK в типовому дигестаті ²³

Форма дигестату	CP, %	$N_{\text{зорг}}$, кг/м ³	NH_4 , кг/м ³	NH_4 , % $N_{\text{зорг}}$	P_2O_5 , кг/м ³	K_2O , кг/м ³
Сирий дигестат	6,5	5,1	3,2	62,7	2,3	5,5
Рідка фракція дигестату	5,7	4,9	3,1	63,3	2,0	5,4
Тверда фракція дигестату	24,3	5,8	2,7	46,5	5,0	5,8

З урахуванням наведених у таблиці 14 показників, еквівалентна вартість дигестату може становити:

- для сирого дигестату – 10,9 євро/м³,
- для рідкої фракції – 10,4 євро/м³,
- для твердої фракції – 13,9 євро/м³.

При реалізації біометану за ціною 900 євро за 1000 м³, на його частку припадає основна частина доходу проекту – близько 80–90 %, що робить саме ціну біометану ключовим фактором впливу на окупність біометанових проектів. За такого рівня цін, дисконтований термін окупності проекту в Україні може становити 6–8 років, при внутрішній нормі прибутковості (IRR) у межах 20–25 %.

Натомість при цінах на біометан 700–800 євро за 1000 м³, рентабельність суттєво знижується, і IRR опускається нижче 15 %, що може зробити проект менш привабливим для інвестора.

²³ Дані Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft: <https://www.biogas-forum-bayern.de/media/files/0001/Gulle-und-Garrestransport-Teil-1.pdf>

4.2

Сфери застосування біометану: виробництво електричної та теплової енергії, експорт, застосування у промисловості

Біометан як відновлюваний газ може використовуватися у різних напрямках, насамперед як повноцінна альтернатива природному газу. Це дозволяє ефективно замінювати імпортований природний газ і рідкі нафтопродукти, скорочуючи залежність від викопного палива та підвищуючи енергетичну безпеку. Далі розглянемо деякі сфери застосування біометану більш детально.

Виробництво електроенергії та тепла з використанням газової мережі. Такий підхід дозволяє виробляти електричну та теплову енергію безпосередньо поруч із кінцевим споживачем, що підвищує ефективність використання палива завдяки можливості повноцінного залучення тепла, особливо в міських системах централізованого теплопостачання.

Зберігання та подальше виробництво електроенергії у періоди пікових навантажень. У цьому варіанті біометан використовується в моменти найбільшого попиту на електроенергію, що дозволяє ефективно виконувати функцію регулювання енергосистеми.

Окремо варто зазначити простішу альтернативу виробництва електроенергії — це генерація електричної енергії безпосередньо з біогазу на біогазовому заводі, без стадії збагачення до біометану. Такий варіант дозволяє суттєво скоротити витрати на технологічні процеси очищення та збагачення газу. Саме цей спосіб був найбільш поширеним до останнього

часу, забезпечуючи задовільні економічні показники завдяки застосуванню «зеленого» тарифу на рівні 12,39 євроцентів за кВт•год, який діятиме до кінця 2029 року. Додатково перевагою було те, що виробники електроенергії працювали в балансуєчій групі Гарантованого покупця, який брав на себе реалізацію всієї виробленої електроенергії та знижував витрати на покриття небалансів (різниці між прогнозованим і фактичним виробництвом) завдяки великій кількості учасників групи.

Законодавство України дозволяє виробникам «зеленої» електроенергії продавати її не лише за «зеленим» тарифом, але й за двосторонніми договорами (ДД), а також на організованих сегментах ринку — на ринку «на добу наперед» (РДН), внутрішньодобовому ринку (ВДР) та балансуєчому ринку (БР).

Ціни на РДН і ВДР є вільними й формуються на основі заявок та пропозицій учасників ринку. Продавати електроенергію на цих сегментах виробники можуть як самостійно, так і через спеціалізованих трейдерів. Для самостійної участі на РДН та ВДР виробник повинен укласти договір з Оператором ринку та дотримуватися вимог, визначених «Правилами ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку»²⁴.

²⁴ Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 №308 «Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку»: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text>



Поступово робота за «зеленим» тарифом стала менш привабливою для виробників електроенергії. Це пояснюється кількома факторами: по-перше, ринкові ціни на електроенергію наблизилися до рівня «зеленого» тарифу, а по-друге, виникли проблеми із затримками виплат від Гарантованого покупця, що накопичив значні борги перед виробниками за відпущену електроенергію. Крім того, для нових об'єктів, введених в експлуатацію після 1 січня 2024 року, вже неможливо отримати «зелений» тариф на електроенергію, вироблену з біогазу²⁵.

Усе це стимулює зростання інтересу виробників біогазу до самостійної роботи на ринку електроенергії. Водночас такий підхід вимагає від них самостійної участі в торгах на ринку електроенергії та покриття власних небалансів, що додає нових організаційних і фінансових викликів.

Натомість **входження до агрегованої групи** (так званої одиниці агрегації) може стати вигідним рішенням для виробників електроенергії. Це дозволяє отримувати оптимальний дохід і водночас уникати значних витрат часу та коштів на самостійне управління навантаженнями на складному й динамічному ринку електроенергії. Агрегатор (енергопостачальник, що керує такою групою) бере на себе комерційну диспетчеризацію та складання погоджених режимів роботи обладнання, які враховують як ситуацію на ринку, так і технологічні потреби самого виробника. Крім того, агрегатор може ефективно оптимізувати небаланси електроенергії, що є важливою статтею витрат для кожного учасника ринку. При цьому варто пам'ятати, що до складу одиниці агрегації не можуть входити електроустановки для виробництва електроенергії із встановленою потужністю понад 20 МВт. Також для виробників електроенергії з біогазу потужністю від 1 МВт існує можливість приєднуватися до балансуючих груп.

²⁵ Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо удосконалення умов підтримки виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії»: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/810-20#Text>

Це дозволяє суттєво знизити витрати на покриття небалансів, оскільки такі групи розподіляють ризики між багатьма учасниками та загалом формують більш прогнозовані графіки генерації. Основні відмінності між роботою електрогенеруючих установок у складі одиниці агрегації та балансуючої групи наведено **в таблиці 15**.

Таблиця 15. Основні відмінності одиниці агрегації та балансуючої групи

Характеристики	Одиниця агрегації	Балансуюча група
Структура та управління	Це об'єднання електроустановок, яке функціонує як єдина віртуальна електростанція. Управління здійснює агрегатор, який відповідає за баланс усіх учасників групи	Учасники групи об'єднуються для спільного виконання балансуючих зобов'язань, але кожен учасник може зберігати певну автономію
Функціональні можливості	Забезпечує оптимізацію купівлі-продажу електроенергії, надання допоміжних послуг та перенесення енергії в часі	Основна мета — мінімізація небалансів шляхом спільного виконання графіків виробництва та споживання
Відповідальність за небаланси	Агрегатор несе відповідальність за небаланси всієї групи	Відповідальність за небаланси може бути розподілена між учасниками
Ліцензування	Діяльність агрегатора потребує ліцензування, хоча є винятки	Ліцензування залежить від потужності та типу діяльності учасників

Для роботи на ринку електричної енергії виробник електроенергії з біогазу може обирати різні підходи до організації своєї діяльності. Деякі з таких варіантів наведено **в таблиці 16**.

Таблиця 16. Можливі підходи до вибору режиму роботи при виробництві електричної енергії

Режим роботи	Переваги	Недоліки
Комбінування виробництва біометану або електроенергії в залежності від ринкових умов	Гнучкість, можливість оптимізації доходів	Додаткові капітальні витрати через необхідність мати два комплекти обладнання – для виробництва електроенергії та біометану, кожен розрахований на повну виробничу потужність, а також приєднання до газових мереж
Виробництво та реалізація електричної енергії рівномірним графіком протягом доби	Робота обладнання в рівномірному режимі, легкість прогнозування виробництва, зменшення небалансів	Отримання лише «середньої» ринкової ціни електроенергії
Виробництво та реалізація електричної енергії лише в пікові години, коли ціна найвища	Можливість реалізації електроенергії за вищою ціною	Необхідність активного відслідковування ринкових тенденцій, участь в торгах, підлаштування режиму генерації. Додаткові капітальні витрати на газгольери для створення запасу біогазу, поки він не використовується та збільшену встановлену потужність електрогенеруючого обладнання

На **рис. 33** показано, як змінювалися погодинні ціни, усереднені за півріччя, на РДН у 2023–2025 роках. У цей період через недостатню пропозицію електроенергії на РДН у певні години доби, а також для стабілізації ринку та покращення умов використання міждержавних перетинів для імпорту електроенергії, Регулятор двічі переглядав граничні ціни на РДН/ВДР – спочатку з 1 липня 2023 року, а потім з 1 червня 2024 року.

Як видно з графіків, це призвело до зростання цін на електроенергію, особливо у пікові години споживання. У результаті різниця між середньодобовими цінами та цінами у години пікових навантажень стала ще більш помітною. Це підвищує економічну доцільність для виробників електроенергії організовувати роботу таким чином, щоб максимальна генерація припадала саме на години найвищого попиту.

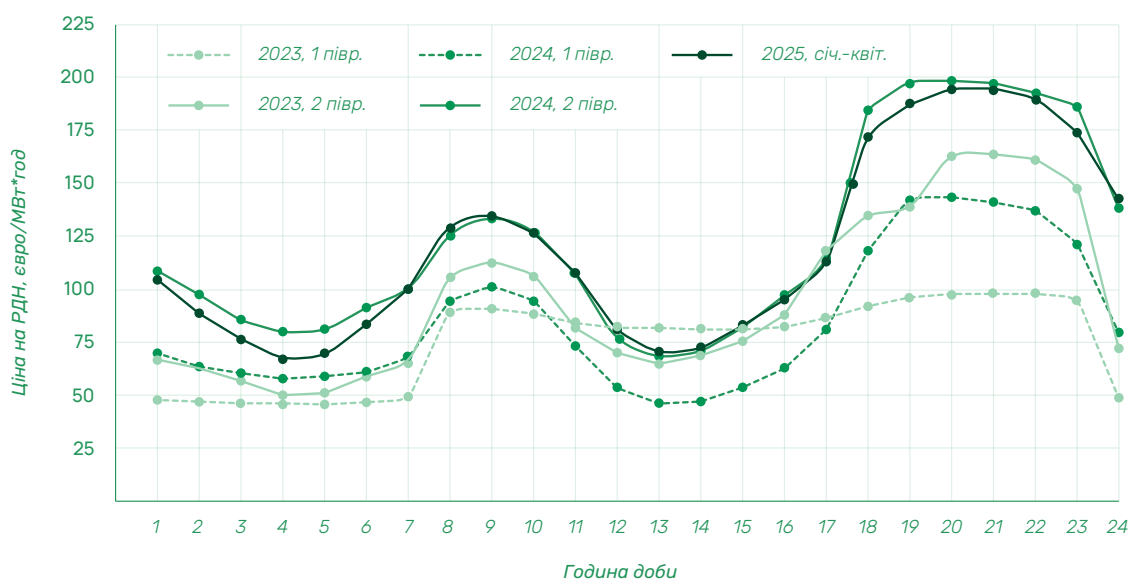
При застосуванні когенераційних установок на біогазі, окрім електричної енергії, додатково виробляється і тепла енергія, яку можна ефективно використовувати для різних потреб, зокрема для опалення. Найчастіше теплотою від КГУ забезпечують роботу

самих біогазових установок, підтримуючи необхідний температурний режим процесів зброджування.

Однак виробленої КГУ теплової енергії зазвичай достатньо й для опалення інших об'єктів – таких як виробничі приміщення чи адміністративні будівлі. Якщо біогазову установку з КГУ планують будувати в місцевості, де немає споживачів тепла (наприклад, поблизу немає тваринницьких комплексів), можна розглянути можливість створення тепличного господарства, яке споживатиме теплову енергію від КГУ. Такий підхід має додаткову перевагу: тепличні комплекси, на відміну від багатьох інших споживачів, потребують тепла майже протягом усього року, що забезпечує стабільне й ефективне використання виробленої теплової енергії.

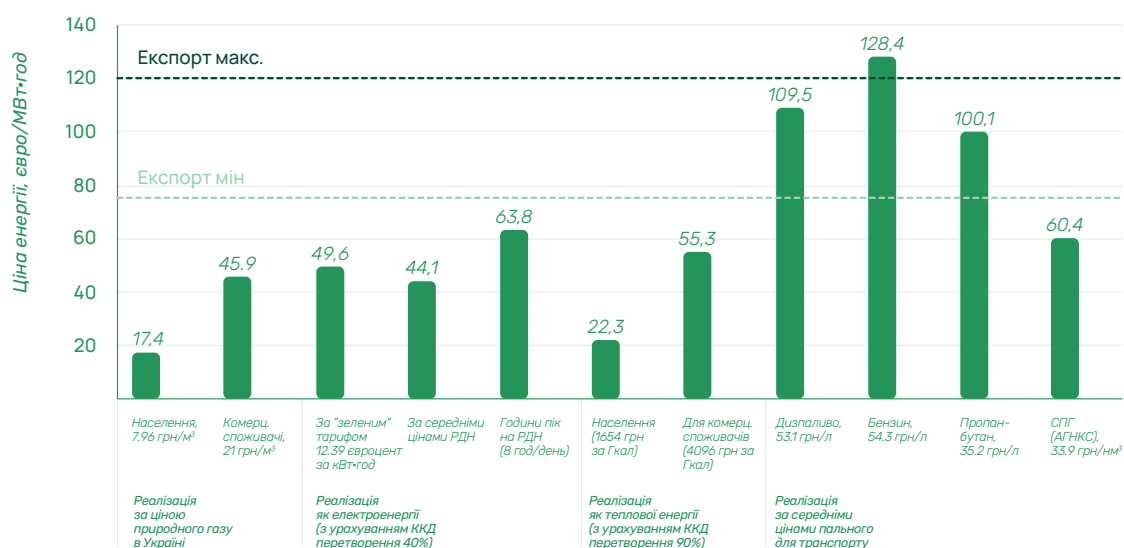
Загалом вибір тієї чи іншої виробничої та ринкової моделі для біогазового чи біометанового проекту значною мірою залежить від актуальної ринкової кон'юнктури. Наразі досить привабливою виглядає можливість експорту біометану до європейських країн, де покупці готові сплачувати додаткову ринкову премію за його відновлюване походження, що робить біометан дорожчим за звичайний природний газ.

Рис. 33. Погодинні ціни електроенергії за результатами торгів на РДН (2023–2025 р.р.)²⁶



²⁶ Вебсайт АТ «Оператор ринку»: <https://www.oree.com.ua/>

Рис. 34. Порівняння цін для різних варіантів реалізації енергії біометану.

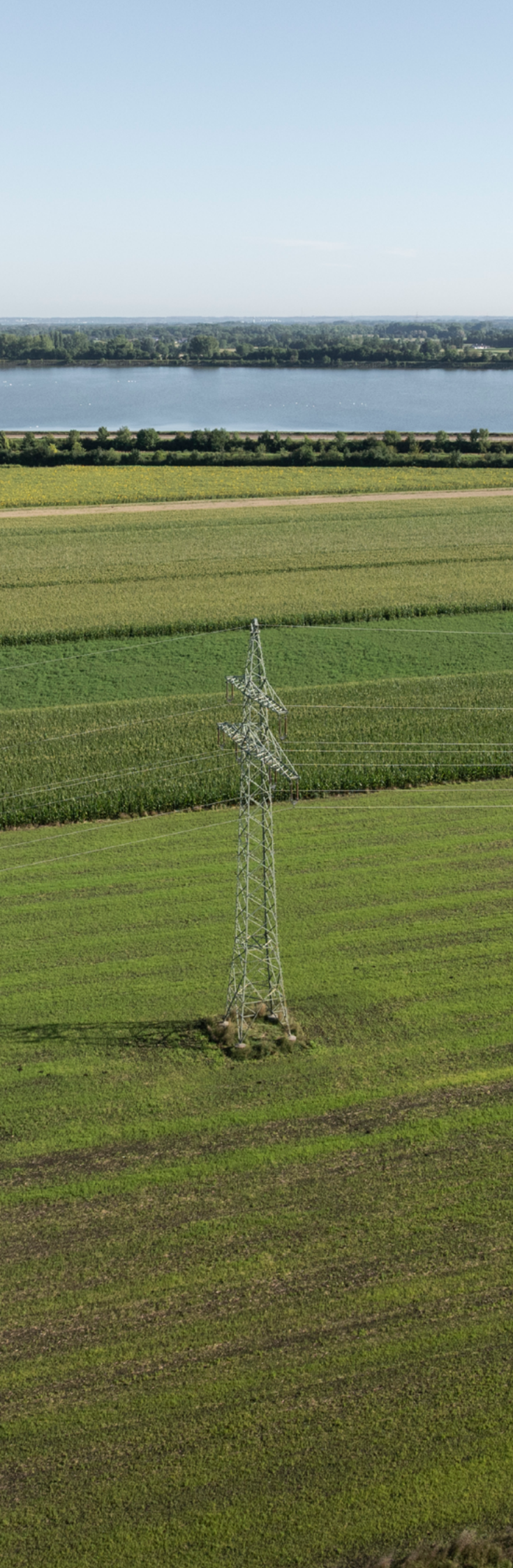


На **рис. 34** наведено порівняння цін для різних варіантів реалізації енергії біометану. У випадках експорту, реалізації біометану за ціною природного газу або за цінами транспортного пального прийнято, що реалізується 100 % енергії біометану. Натомість для реалізації електроенергії враховано коефіцієнт корисної дії газопоршневого двигуна, із 100% енергії біометану отримуємо лише 40% енергії у вигляді електричної енергії²⁷. Відповідно, якщо ми реалізуємо 40% енергії біометану за ціною електричної енергії, це еквівалентно тому, що ми реалізували б 100% початкової енергії біометану за ціною, що становить 40% від ціни електроенергії. Такий же підхід прийнято при реалізації у вигляді теплової енергії, для якої коефіцієнт перетворення прийнято 90%.

З наведених даних видно, що найвищий дохід від реалізації біометану можна очікувати у разі його експорту, а також реалізації в Україні як транспортного пального та для виробництва електричної енергії у години пікового навантаження. Реалізація біометану за ціною природного газу або у вигляді теплової енергії є менш привабливою, особливо з урахуванням тарифів для населення.

Найвищий дохід від реалізації біометану можна очікувати у разі його експорту, а також реалізації в Україні як транспортного пального та для виробництва електричної енергії у години пікового навантаження

²⁷ ККД газопоршневих генераторів можуть варіюватись в залежності від їх марки та потужності



Використання біометану промисловими підприємствами

в Україні може отримати додатковий стимул завдяки перспективі впровадження системи торгівлі викидами. Пілотний етап цієї системи заплановано не раніше 2028 року, а її повноцінне функціонування можливе щонайменше через три роки після припинення або скасування воєнного стану. Цей процес є складовою зобов'язань України щодо наближення до європейських стандартів та боротьби зі зміною клімату. Очікується, що запровадження механізму торгівлі квотами на викиди парникових газів, подібного до чинної системи в ЄС, створить додатковий попит на відновлювані джерела енергії, зокрема на біометан та інші відновлювані гази, а також сприятиме зростанню їх ринкової ціни.

Іншим чинником є запровадження в Україні механізму прикордонного вуглецевого коригування (СВАМ), що пов'язане з адаптацією до європейських екологічних стандартів. Очікується, що повноцінне впровадження СВАМ для українських експортерів розпочнеться з 2026 року, коли імпортери до ЄС будуть зобов'язані сплачувати вуглецеве мито. На початковому етапі СВАМ охоплюватиме такі товари, як сталь, чавун, алюміній, цемент, мінеральні добрива, електроенергію та водень. Українські компанії, що експортують ці товари до ЄС, повинні будуть отримувати СВАМ-сертифікати, які відображатимуть обсяги викидів парникових газів, пов'язаних із виробництвом продукції. При цьому паливо з біомаси, сталий характер якого буде підтверджено відповідною сертифікацією, вважатиметься вуглецево-нейтральним, а його використання відповідно знижуватиме викиди парникових газів у процесі виробництва товарів. Найбільш перспективними сферами використання біометану в цьому контексті можуть стати металургія, виробництво цементу та азотних мінеральних добрив.



Потенційне застосування біометану в металургії охоплює енергоємні процеси, що потребують високотемпературного горіння та дозволяють замінити викопний природний газ, зокрема:

1. доменне виробництво — часткова заміна природного газу для нагрівання повітря, що подається в доменну піч;
2. електродугові печі — підтримка необхідного температурного режиму;
3. термічна обробка металів (гартування, відпал, цементація) як джерело тепла;
4. виробництво феросплавів — стабільне енергозабезпечення для плавки;
5. газополуменеве різання та зварювання — екологічна альтернатива традиційним газам.

У виробництві мінеральних добрив біометан може використовуватися як сировина і джерело енергії у ключових процесах:

1. синтез аміаку — замість природного газу для отримання аміаку, основи азотних добрив;
2. виробництво карбаміду та нітратних добрив;
3. сушіння та грануляція — теплопостачання для формування добрив;
4. каталітичні процеси — як джерело водню для складних хімічних реакцій.

У виробництві цементу біометан має значний потенціал для заміщення викопного газу в таких процесах:

1. кальцинація вапняку — нагрівання печей для отримання оксиду кальцію;
2. клінкеризація — ефективне теплопостачання для утворення клінкеру, основи цементу;
3. сушіння сировини перед подрібненням;
4. живлення допоміжних систем і генераторів.

Біометан є універсальним відновлюваним енергоресурсом

Отже, біометан є універсальним відновлюваним енергоресурсом, що відкриває широкі можливості для використання в Україні та за її межами. Його можна ефективно застосовувати для виробництва електричної та теплової енергії, експортувати до країн ЄС, а також використовувати у промислових процесах — насамперед у металургії, хімічній промисловості та цементному виробництві. Це дозволяє не лише замінювати викопні енергоносії, а й скорочувати викиди парникових газів, сприяючи переходу до сталої енергетики та економіки.

4.3

Експортний потенціал українського біометану і його конкурентоспроможність на міжнародних ринках

Експортний потенціал українського біометану є значним і має перспективи для успішної конкуренції на міжнародних ринках, особливо в Європейському Союзі. Україна володіє

потужним аграрним сектором, що генерує велику кількість органічних залишків, придатних для виробництва біометану. Як було зазначено раніше, загальний енергетичний потенціал виробництва біогазу та біометану в Україні оцінюється приблизно у 21,8 млрд м³ на рік (що відповідає 18,7 млн тон нафтового еквівалента на рік).

Види вхідної сировини охоплюють як потоки відходів та побічних продуктів, що утворюються в різних галузях за наявної потужності виробництв, так і енергетичні рослини (переважно силос кукурудзи), які потенційно можуть бути вирощені на площі до 1 млн га. В Європейському Союзі енергетичні рослини вважають конкуруючими з продуктами харчування та кормами, тому вони не відповідають критеріям сталості, визначеним Директивою ЄС RED II. Через це перспективи їхнього залучення для виробництва біометану, особливо для експорту, залишаються неочевидними. Потенціал виробництва передового біометану в Україні, який відповідає вимогам сталості і не включає біогаз із силосу кукурудзи, становить принаймні 17,8 млрд м³ метану на рік.

У середньостроковій перспективі сектор біометану є одним із ключових елементів стратегії REPowerEU, яка передбачає

забезпечення виробництва 35 млрд м³ сталого метану щороку до 2030 року. Це спрямовано на пом'якшення змін клімату та посилення стратегічної енергетичної автономії Європейського Союзу.

Загальне виробництво біогазу та біометану в Європейському Союзі у 2023 році становило 22,1 млрд м³, що еквівалентно 234 ТВт•год енергії²⁸. Виробництво біогазу залишається важливим і відносно стабільним сегментом ринку, тоді як біометан демонструє найшвидший темп зростання. У 2022 році європейські країни виробили 4,2 млрд м³ біометану (44 ТВт•год), а у 2023 році цей показник зріс до 4,9 млрд м³ (52 ТВт•год), що відповідає збільшенню на 18%. Виробничі потужності з виробництва біометану в Європі зросли з 5,5 млрд м³ на рік у 2022 році до 6,1 млрд м³ на рік у 2023 році та до 6,4 млрд м³ на рік у першому кварталі 2024 року.

Загальний потенціал виробництва біометану в Європі, отриманого виключно за допомогою анаеробного зброджування, у 2040 році оцінюється у 74 млрд м³, з яких 68 млрд м³ припадає на країни ЄС-27. До п'ятірки провідних виробників увійшли Німеччина, Франція, Іспанія, Італія та Польща²⁹.

²⁸ European Biogas Association Statistical Report 2024. Brussels, Belgium, December 2024: <https://www.europeanbiogas.eu/wp-content/uploads/2024/12/EBA-Statistical-Report-2024-unveiled.pdf>

²⁹ Biogases towards 2040 and beyond. Guidehouse, EBA, 2024 April 2024. <https://www.europeanbiogas.eu/biogases-towards-2040-and-beyond/>



Таблиця 17. Прогноз БАУ щорічного виробництва та споживання українського біометану до 2050 року

	2027	2030	2035	2040	2045	2050
Виробництво біометану , млрд м ³	0,25	1,00	2,1	4,5	9,5	20,0
Експорт біометану , млрд м ³	0,13	0,50	1,05	2,25	4,8	10,0
Споживання на внутр. ринку , млрд м ³	0,13	0,50	1,05	2,25	4,8	10,0
Кількість біометанових заводів , од.	50	200	420	900	1900	4000
Необхідні інвестиції , млрд €	0,5	2,0	4,2	9,0	19,0	40,0
Зниження емісії ПГ , млн т CO ₂ -екв.	0,6	2,5	5,3	11,3	23,8	50,0
Створені робочі місця , од.	3 100	12 500	26 200	56 200	118 700	250 000

Основними сировинними ресурсами у 2040 році будуть покривні культури, які складатимуть 43% загального обсягу, а також сільськогосподарські відходи – 20% та гній тварин – 19%.

Цілі стратегії REPowerEU можуть бути досягнуті не лише за рахунок внутрішнього виробництва, а й шляхом імпорту біометану. Україна має значний потенціал завдяки доступній та дешевій сировині для його виробництва і здатна конкурувати з будь-якою країною у цьому секторі.

Основними покупцями українського біометану в Європі можуть стати споживачі та промислові підприємства, які прагнуть знизити викиди CO₂, особливо в галузях, де природний газ складно замінити електроенергією – наприклад, у металургійній промисловості.

У **таблиці 17** наведено прогнозні показники виробництва та споживання біометану на внутрішньому та європейських ринках, орієнтовну кількість біометанових заводів, необхідні інвестиції для їх будівництва, очікуване зниження викидів парникових газів, а також загальну кількість створених прямих і опосередкованих робочих місць.



Оскільки в європейських країнах існує значний інтерес до розвитку біометанового сектору та потенційного імпорту, особливо з країн, які мають спільну газотранспортну систему з ЄС, можна припустити, що до половини виробленого в Україні біометану буде спрямовано на експорт.

Кількість біометанових заводів розрахована виходячи зі середньої одиничної потужності 5 млн м³ біометану на рік, при цьому вартість будівництва одного заводу становить приблизно 10 млн євро. Варто відзначити, що при будівництві біометанового заводу не менше 50% інвестицій припадатиме на закупівлю українського обладнання та послуг.

Фізичний експорт біометану може бути організований через газотранспортну систему України, а також шляхом доставки автомобільним або залізничним транспортом у вигляді зрідженого біометану (біо-LNG).

Розвинена газотранспортна система та газорозподільні мережі України можуть ефективно використовуватися для транспортування та постачання біометану на європейські ринки через існуючі інтерконектори із сусідніми країнами ЄС. Це дозволяє мінімізувати потребу у значних інвестиціях для будівництва нової газової інфраструктури. Україна успішно здійснила перші експортні поставки біометану до країн ЄС у 2025 році. Ці пілотні поставки підтвердили технічну можливість експорту, а також відповідність біометану європейським стандартам сталості та вимогам простежуваності.

Уряд України активно підтримує розвиток виробництва та експорту біометану, запроваджуючи необхідне законодавство та регуляторні механізми, включно з процедурами митного оформлення. Для посилення співпраці з Європейським Союзом було підписано Меморандум про взаєморозуміння щодо стратегічного партнерства у сферах біометану, водню та інших синтетичних газів. Зростання цін на викиди вуглецю в межах системи торгівлі викидами ЄС (EU ETS) сприяє підвищенню конкурентоспроможності біометану як низьковуглецевої альтернативи традиційному природному газу.

Для успішного масштабного експорту українського біометану необхідно інтегрувати український реєстр біометану з європейською базою даних (UDB), що забезпечить визнання та прозорість поставок.

Ключовими факторами успіху є створення визнаного в ЄС та інших європейських країнах українського реєстру біометану та гармонізація національних вимог із стандартами ЄС. Виробництво біометану відкриває для України унікальну можливість започаткувати новий прозорий, інноваційний, експортно-орієнтований сектор економіки з потенціалом виробництва до 20 млрд м³ біометану на рік, експортною виручкою до 9 млрд євро щорічно (за умови експорту 50% обсягів виробленого біометану), а також створенням до 250 тисяч нових робочих місць.

ВИСНОВКИ

Біометан є ключовим елементом переходу до сталої енергетики

Він поєднує екологічні переваги, такі як декарбонізація та ефективне управління відходами, з перевагами для енергетичної безпеки – локальним виробництвом та сумісністю з існуючими газовими мережами, а також відкриває економічні можливості, включаючи створення робочих місць та розвиток сільських територій. Завдяки цьому біометан є незамінним складником для формування чистішого, більш стійкого та циркулярного енергетичного майбутнього.

Біометан може бути прямою заміною викопного природного газу – його можна подавати в існуючі газові мережі та використовувати у традиційних сферах застосування (опалення, виробництво електроенергії, промисловість, транспорт) без суттєвих змін у інфраструктурі. Це дозволяє оперативно декарбонізувати сектори, які важко електрифікувати.

Виробництво та використання біометану суттєво знижує викиди парникових газів

1

за певних умов, особливо при використанні гною, може призводити до «негативних викидів», коли загальне скорочення парникових газів перевищує їх викиди

2

запобігає викидам метану при розкладанні органічних відходів (сміттєзвалища, гній), який є потужним парниковим газом

3

CO₂, що утворюється при спалюванні біометану, є біогенним – він раніше був поглинений рослинами, що робить паливо вуглецево-нейтральним за життєвим циклом

4

заміщує викопне паливо, що зменшує викиди CO₂

Біометан виробляється з різноманітної органічної сировини:

сільськогосподарських залишків, твердих побутових і харчових відходів, стічних вод, таким чином його виробництво перетворює відходи на цінний енергетичний ресурс, зменшуючи навантаження на полігони та покращуючи управління відходами.

Виробництво біометану ілюструє принцип циркулярної

економіки: органічні відходи не захоронюються, а трансформуються в енергію, а побічний продукт — дигестат — слугує біодобривом, що знижує потребу в синтетичних добривах і повертає поживні речовини в ґрунт.

Біометан може вироблятися локально з різноманітної, широко доступної сировини, що підвищує енергетичну незалежність та безпеку поставок. Як гнучке, контрольоване та накопичуване відновлюване газове паливо, біометан доповнює нестабільні джерела енергії (сонячну та вітрову електроенергію), стабілізуючи енергомережі. Його сумісність з існуючими газопроводами, розподільними мережами та сховищами мінімізує потребу у дорогих інвестиціях у нову інфраструктуру.

Індустрія біометану формує робочі місця по всьому ланцюгу

створення вартості, від збору сировини та експлуатації установок до технічного обслуговування та розподілу, особливо в сільських районах. Виробництво біометану може стати додатковим джерелом доходу для фермерів і громад через послуги з утилізації відходів та продаж енергії. Крім того, використання органічних відходів суттєво знижує витрати муніципалітетів і підприємств на їх утилізацію.

Біометан має перспективи реалізації як на внутрішньому ринку

України, так і на експорт до країн ЄС. На внутрішньому ринку він допоможе зменшити імпорт природного газу з Європи та частково замінити власний видобуток.

Україна має значний потенціал стати важливим експортером біометану до ЄС,

сприяючи енергетичній безпеці та досягненню кліматичних цілей Європи, одночасно отримуючи економічні вигоди. Незважаючи на помірну нинішню конкурентоспроможність і виклики масштабування експорту, політичні ініціативи та зростаючий попит на відновлювані гази в ЄС відкривають багатообіцяючі довгострокові перспективи.

Виробництво біометану створює унікальний шанс

започаткувати новий прозорий, інноваційний, експортно-орієнтований сектор економіки з можливістю виробництва до 20 млрд м³ біометану на рік, потенційною експортною виручкою до 9 млрд євро при експорті половини продукції та створенням до 250 тисяч нових робочих місць.

Потенціал виробництва біометану становить принаймні 21,8 млрд nm^3 CH_4 на рік

Значна частина потенціалу виробництва біометану припадає на проміжні та покривні культури (майже 45%). Ще майже 24% можуть бути забезпечені за рахунок пожнивних решток, а 17% — із силосу кукурудзи, вирощеної на площі близько 1 млн га. Відходи тваринництва здатні забезпечити лише близько 4% потенціалу, що зумовлено суттєвим і тривалим скороченням поголів'я тварин — насамперед великої рогатої худоби та свиней — в Україні з 1990 року. Внесок побічних продуктів і відходів харчової промисловості оцінюється на рівні 3,6%, тоді як побутові відходи (органічна фракція ТПВ та осади стічних вод) разом можуть додати ще близько 2,5% до загального потенціалу.

На регіональному рівні майже половина загального потенціалу виробництва біометану зосереджена у Вінницькій, Київській, Дніпропетровській, Полтавській та Кіровоградській областях. Загальний діапазон потенціалу за регіонами становить від 0,14 до 1,96 млрд nm^3 CH_4 на рік, при середньому значенні 0,91 млрд nm^3 CH_4 /рік.

Сталість виробництва біометану є ключовою умовою для інтеграції українського біометану на європейський ринок. Відповідність цим вимогам гарантує зниження викидів парникових газів, уникнення негативного впливу на навколишнє середовище. В Україні нормативна база та тимчасові механізми підтримують цей процес і створюють основу для успішного експорту біометану до ЄС, що сприяє сталому розвитку галузі та підвищенню її конкурентоспроможності.

Наразі найбільші обсяги біометану виробляються з біогазу, отриманого шляхом анаеробного зброджування різних видів органічних матеріалів. Такі технології використовуються переважно в агросекторі, а також в комунальному господарстві, харчовій та целюлозо-паперовій промисловості. Меншою мірою біометан отримують з біогазу, зібраного з полігонів ТПВ в результаті їх організованої дегазації.

Технології анаеробного зброджування можуть відрізнятися стадійністю, періодичністю, температурним режимом, конструктивними особливостями біореакторів, наявністю окремого вузла попередньої підготовки сировини тощо. Ключовим фактором, що визначає потребу чи доцільність застосування тої чи іншої технології, є тип та склад використовуваної сировини. Гетерогенні види сировини, як то підстилковий гній, енергетичні або покривні культури, солома, тощо, як правило, зброджують в системах проточного типу з використанням біореакторів типу CSTR.



Технології очищення біогазу є ключовим етапом для отримання біометану з високим вмістом метану та відповідною якістю для подачі в газові мережі. Основні методи включають адсорбцію, абсорбцію, мембранну та кріогенну сепарації, кожен з яких має свої переваги та обмеження щодо ефективності, вартості та масштабованості. Мембранна сепарація сьогодні є найбільш популярною технологією завдяки простоті, екологічності та можливості адаптації під різні обсяги виробництва. Вибір конкретної технології залежить від якості вихідного біогазу, вимог до кінцевого продукту та економічних аспектів проекту.

В Україні існують широкі можливості для використання біометану завдяки розгалуженій системі газових мереж

Це дозволяє подавати його як до газорозподільних мереж, так і безпосередньо до газотранспортної системи. Окрім подачі у газові мережі, важливими напрямками є виробництво біо-CNG та біо-LNG для використання як моторного палива чи транспортування на великі відстані. Ці рішення створюють додаткові шляхи реалізації біометану, підвищують гнучкість його збуту та сприяють розвитку внутрішнього й експортного ринку біометану в Україні.

Україна має всі умови, щоб стати ключовим експортером біометану до ЄС, що сприятиме посиленню енергетичної безпеки та виконанню цілей декарбонізації в Європі, водночас забезпечуючи суттєві економічні вигоди для країни. Хоча нинішня конкурентоспроможність біометану України є помірною, а процес масштабування експорту пов'язаний з певними складнощами, активні політичні ініціативи та зростаючий попит на відновлювані гази в ЄС відкривають широкі перспективи для довгострокового розвитку сектору.

UABIO

Завантажити
брошуру:



Укладено в партнерстві:

