

УДК 620.91:621.311.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.1.1/28>**Усенко А.Ю.**<https://orcid.org/0000-0001-7467-6220>

Український державний університет науки і технологій

Форись С.М.<https://orcid.org/0000-0001-7104-640X>

Український державний університет науки і технологій

Біляєва В.В.<https://orcid.org/0000-0001-9987-6384>

Український державний університет науки і технологій

БИОМЕТАН У КОГЕНЕРАЦІЙНИХ УСТАНОВКАХ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ АГРОПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення енергетичної автономності агропромислових об'єктів в умовах зростання вартості енергоресурсів і вразливості централізованих систем енергопостачання. Агропромисловий сектор України характеризується значною енергоємністю та наявністю органічної сировини, що створює передумови для використання біометану в автономних когенераційних системах. Метою статті є обґрунтування доцільності використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів з урахуванням реальних режимів електричного і теплового навантаження. Дослідження виконано з використанням розрахункового аналізу параметрів когенераційних установок на біометані, узагальнення технічних характеристик газопоршневого обладнання та застосування критеріїв енергетичної й економічної ефективності. Аналіз проводився для установок електричною потужністю 0,5–5,0 МВт із часткою утилізації теплової енергії 60–90% та регулюванням навантаження в діапазоні 50–100% номінальної потужності. Установлено, що за повного залучення теплової енергії сумарний коефіцієнт корисної дії когенераційних установок на біометані сягає 85–92%, тоді як за зниження коефіцієнта використання тепла нижче 60% ефективність когенерації істотно зменшується. Показано, що економічно прийнятні режими автономного енергопостачання відповідають строку окупності інвестицій до 6–7 років. Виявлено ключові обмеження, пов'язані з якістю біометану, сезонною нерівномірністю теплових навантажень і необхідністю адаптивного керування режимами генерації.

Наголошено, що біометан може слугувати ефективною паливною основою автономних когенераційних систем агропромислових об'єктів за умови стабілізації параметрів палива та узгодження потужності установки зі структурою енергоспоживання підприємства. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розроблення адаптивних алгоритмів управління когенераційними установками на біометані, удосконалення технологій очищення палива та деталізацію економічної оцінки автономних енергетичних систем за повним життєвим циклом.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, розподілена генерація, автономні енергетичні системи, газопоршневі установки, енергетична ефективність, аграрна енергетика, утилізація органічних відходів.

Постановка проблеми. Стрімке зростання вартості енергоресурсів і підвищення ризиків порушення централізованого енергопостачання в Україні актуалізували проблему енергетичної автономності агропромислових об'єктів, які

характеризуються високою енергоємністю виробничих процесів, сезонною нерівномірністю споживання та концентрацією значних обсягів органічних відходів. За наявності такого ресурсного потенціалу використання біометану як локаль-



ного енергоносія є технічно можливим і економічно доцільним напрямом, однак його практичне впровадження в автономних когенераційних системах залишається обмеженим.

Статистичні дані свідчать, що у 2025 році Україна вперше здійснила промислові поставки біометану на зовнішні ринки, експортувавши понад 11 млн м³ цього енергоносія до країн Європейського Союзу [1]. Це підтверджує сформовану спроможність українського аграрного сектора до виробництва біометану промислової якості, водночас демонструючи дисбаланс між експортною орієнтацією галузі та внутрішнім використанням біометану для забезпечення енергетичних потреб агропромислових підприємств.

Незважаючи на наявність сировинної бази та перших успішних виробничих проєктів, застосування біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів стримується низкою науково-практичних проблем. До них належать недостатня адаптація типових когенераційних рішень до змінної структури електричних і теплових навантажень аграрних підприємств, обмежена кількість узагальнених підходів до оцінювання енергетичної та економічної ефективності таких систем, а також фрагментарність досліджень, спрямованих на інтеграцію біометану саме в автономні, а не мережево-орієнтовані енергетичні комплекси.

У цьому контексті актуальним є наукове обґрунтування підходів до ефективного використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів України з урахуванням реальної структури енергоспоживання, технологічних особливостей виробництва та сучасних тенденцій розвитку української біоенергетики. Розв'язання цієї проблеми має безпосереднє значення для підвищення енергетичної безпеки агропромислового сектора, зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв і формування стійких децентралізованих енергетичних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних наукових праць свідчить про формування кількох стійких дослідницьких кластерів, що відрізняються предметним фокусом, але водночас логічно взаємодоповнюють один одного. Передусім значна частина досліджень спрямована на оцінювання енергетичної ефективності когенераційного використання біогазу та біометану, отриманих з агропромислових відходів. У межах цього напрямку доведено, що поєднання електричної та теплової генерації дає змогу сут-

тєво підвищити загальний коефіцієнт корисної дії енергетичних систем і забезпечити автономність агропромислових об'єктів за рахунок локальних ресурсів, що обґрунтовано в дослідженні Р. Далпаза (R. Dalpaz) та співавторів [2]. Порівняльний аналіз сценаріїв виробництва електроенергії безпосередньо з біогазу та варіантів його очищення до біометану з подальшим використанням у когенераційних установках, виконаний Г. Капосчутті (G. Caposciutti) та співавторами, засвідчив відмінності у гнучкості систем, рівні енергетичної ефективності та можливостях балансування навантажень [3]. Доцільність застосування мобільних аграрних біогазових установок у когенераційному режимі, особливо для малих і середніх господарств та просторово розосереджених агропромислових об'єктів, обґрунтовано у роботах З. Яроша (Z. Jarosz) та співавторів [4].

Окремий дослідницький блок формують праці, в яких біометан розглядається як результат технологічно вдосконалених процесів анаеробного збродження та як складова частина інтегрованих відновлюваних енергетичних систем. Систематизацію сучасних технологій виробництва біометану з акцентом на методах очищення біогазу та можливостях їх поєднання з іншими джерелами відновлюваної енергії здійснено Ф. Калізе (F. Calise) та співавторами [5]. Результати досліджень Б. Су (B. Su) та співавторів свідчать, що використання фотоелектрично-теплових систем може інтенсифікувати процеси анаеробного збродження та збільшити вихід біометану, що має принципове значення для автономних агроенергетичних рішень [6]. Концепція Power-to-Gas як інструмент перетворення надлишкової відновлюваної енергії у форму біометану з подальшим його використанням у когенераційних установках розглянута Д. Ланні (D. Lanni) та співавторами [7]. Загальні висновки, представлені в роботах М. Міньйони (M. Mignogna) та співавторів, підтверджують, що саме інтеграція біометану з іншими відновлюваними технологіями є підґрунтям формування стійких автономних енергосистем [8].

Вагомий масив сучасних досліджень присвячено питанням моделювання, оптимізації та управління біометановими й когенераційними системами в автономних і мікромережевих конфігураціях. Підходи до оптимізації та керування повномасштабними установками ко-збродження, запропоновані Д. Кареччі (D. Carecci) та співавторами, сприяють підвищенню стабільності виробництва біометану та ефективності його подаль-

шого енергетичного використання [9]. Модель оптимального енергетичного менеджменту мікромережі з використанням біогазу, орієнтовану на автономне забезпечення локальних споживачів, розроблено М. І. Сантосом (M. I. Santos) та співавторами [10]. Алгоритм електропостачання тваринницької ферми на основі біогазу з урахуванням змінних електричних і теплових навантажень запропоновано М. Стадніком (M. Stadnik) та співавторами [11]. Концептуальні засади функціонування автономних малопотужних енергетичних спільнот, в яких біометан і когенерація відіграють ключову роль у забезпеченні локальної енергетичної незалежності, розглянуто Ю. А. Веремійчуком (Y. A. Veremiiichuk) та співавторами [12].

Окремий напрям досліджень охоплює економічні, екологічні та стратегічні аспекти застосування біометану в автономних енергетичних системах. Результати техніко-економічної оптимізації агровольтаїчних анаеробних установок для виробництва біометану, представлені А. Н. Задом (A. N. Zad) та співавторами, підтверджують доцільність інтегрованих рішень для агропромислових підприємств [13]. Аналіз ролі біометану в заміщенні природного газу та зміцненні енергетичної безпеки, виконаний П. Марконі (P. Marconi) та Л. Роса (L. Rosa), має безпосереднє значення і для автономних аграрних енергосистем [14]. Вплив інфраструктурних і регуляторних чинників на розвиток виробництва та використання біометану детально розкрито в працях Л. Земіте (L. Zemite) та співавторів [15]. Екологічні та експлуатаційні переваги біометану, підтверджені під час аналізу транспортних систем, наведені С. Мілоїєвічем (S. Milojević) та співавторами, що додатково засвідчує універсальність цього енергоносія для автономного енергопостачання агропромислових об'єктів [16].

З огляду на національну специфіку та сучасні виклики в науковій літературі сформувався самостійний напрям, присвячений українському контексту розвитку біогазу та біометану, який поєднує енергетичні, економічні та безпекові аспекти. Зокрема, у працях Н. В. Остри та співавторів обґрунтовано, що біогаз і біометан в Україні розглядаються не лише як складова частина екологічної трансформації, а як стратегічний ресурс стійкого розвитку й відновлення енергетичної системи в умовах структурних дисбалансів та зовнішніх загроз, із визначальною роллю аграрного сектора як джерела сировини [17]. Узагальнення європейського досвіду та українських практик біоконверсії органічних відходів, здійснене І. М. Кор-

ніенком та співавторами, засвідчує необхідність адаптації технологій анаеробного зброджування до вітчизняних агропромислових умов, що створює підґрунтя для локального виробництва біогазу й подальшого переходу до біометану [18].

Енергетичну результативність біоконверсійних підходів у національних умовах підтверджено дослідженнями В. П. Резніченка та співавторів, у яких доведено доцільність використання біоконверсійних культур і аграрних відходів для зростання частки відновлюваних джерел в енергобалансі України [19]. Економічні аспекти розвитку біоенергетики проаналізовано Р. Римаром та Г. Сиротюком, які показують потенціал біометану як інструменту диверсифікації енергетичного сектора та зменшення залежності від імпортованих енергоносіїв [20]. Стратегічну роль біоенергетичного потенціалу для національної енергосистеми обґрунтовано С. М. Дудніковим та співавторами на основі аналізу енергетичного балансу України, з акцентом на можливості інтеграції біогазових і біометанових технологій в автономні та децентралізовані системи енергопостачання [21]. Виробництво біометану як чинник енергетичної незалежності України та її інтеграції до європейського енергетичного простору розглянуто Н. Зеленчук [22]. Узагальнювальні підходи до альтернативної енергетики, запропоновані О. Кубатком та співавторами, підтверджують, що поєднання біометану з когенераційними технологіями формує одну з найбільш стійких моделей підвищення енергетичної резильєнтності держави [23].

Незважаючи на наявні дослідження у сфері біометану та когенераційних технологій, залишаються нерозв'язаними питання комплексного використання біометану в автономних енергетичних системах агропромислових об'єктів. Недостатньо дослідженими є аспекти узгодження режимів роботи когенераційних установок із нерівномірним електричним і тепловим навантаженням, відсутні уніфіковані критерії інтегральної оцінки енергетичної та економічної ефективності, а також обмежено вивчено проблеми адаптації обладнання до змінної якості біометану та сезонної нестабільності сировинної бази.

Запропоноване дослідження спрямовано на заповнення зазначених прогалин шляхом системного аналізу підходів до використання біометану, обґрунтування особливостей інтеграції когенераційних установок в енергетичну інфраструктуру агропромислових підприємств, формування комплексних критеріїв оцінювання ефективності та розроблення рекомендацій щодо підвищення

надійності й результативності автономного енергопостачання.

Постановка завдання. Метою статті є обґрунтування можливостей та доцільності застосування біометану в когенераційних установках для забезпечення автономного енергопостачання агропромислових об'єктів.

Для досягнення поставленої мети в статті передбачається розв'язання таких завдань:

1) проаналізувати сучасні підходи до використання біометану в системах автономного енергопостачання агропромислових об'єктів з урахуванням інтеграції когенераційних установок та режимів споживання енергії;

2) обґрунтувати критерії енергетичної та економічної ефективності функціонування когенераційних установок на біометані та виявити ключові науково-практичні проблеми їх упровадження в агропромисловому секторі;

3) розробити рекомендації щодо підвищення ефективності та надійності використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів.

Виклад основного матеріалу. Сучасні підходи до використання біометану як енергоносія в системах автономного енергопостачання агропромислових об'єктів формуються під впливом одночасного зростання енергетичних потреб аграрного сектора, посилення вимог до екологічної безпеки та необхідності підвищення стійкості локальних енергетичних систем. Біометан, отриманий шляхом очищення біогазу до якості природного газу, розглядається як універсальний енергоносіє, придатний для використання в когенераційних установках, газових котлах та газопоршневих електростанціях. Його ключовою перевагою є можливість інтеграції у вже наявну газову та енергетичну інфраструктуру агропромислових підприємств без суттєвих конструктивних змін обладнання, що істотно знижує бар'єри впровадження автономних систем енергопостачання.

У сучасних наукових і прикладних дослідженнях біометан розглядається не лише як джерело енергії, а і як елемент комплексної системи управління ресурсами агропромислового виробництва [8] (табл. 1). Органічні відходи тваринництва, рослинництва та переробної промисловості слугують сировинною базою для виробництва біогазу, який після очищення і збагачення використовується для виробництва електричної та теплової енергії в режимі когенерації. Такий підхід забезпечує замкнений виробничо-енергетичний цикл, у межах якого поєднуються енергетична авто-

номність, утилізація відходів і зменшення викидів парникових газів. Станом на середину 2025 р. в Україні функціонують 4 біометанові установки, які в сукупності забезпечують виробництво близько 41 млн м³ біометану на рік, і до кінця року планується ввести в експлуатацію ще кілька об'єктів із загальною очікуваною потужністю приблизно 111 млн м³/рік, що дозволяє говорити про перехід до промислово масштабованих рішень із прогнозованим енергетичним виходом та початок комерційних поставок на внутрішній та зовнішній ринки [24; 25].

Представлені підходи реалізуються в агропромисловому секторі у вигляді енергетично автономних комплексів, у яких виробництво біометану інтегрується безпосередньо з технологічними процесами підприємства. Типовим прикладом є тваринницькі господарства та агропереробні комплекси, де стабільні потоки органічних відходів забезпечують прогнозоване завантаження біогазових установок, а очищений біометан використовується як базове паливо для когенераційних модулів [2]. За таких умов електрична енергія, отримана в режимі когенерації, спрямовується на живлення технологічного обладнання, систем вентиляції, автоматизованих ліній та допоміжної інфраструктури, тоді як тепла енергія використовується для підтримання температурних режимів виробничих процесів, сушіння сировини та обігріву виробничих приміщень.

Використання газопоршневих установок на біометані дозволяє адаптувати режими генерації до змінного добового та сезонного навантаження, що є характерним для агропромислових об'єктів. Застосування інтегрованих енергетичних комплексів, які поєднують когенерацію з елементами накопичення електричної та теплової енергії, підвищує керованість енергетичних потоків і забезпечує стабільну роботу підприємств навіть за обмеженого доступу до централізованих мереж [10, р. 1682]. Узагальнення практичного досвіду впровадження таких рішень свідчить, що біометан у когенераційних системах виконує не лише функцію альтернативного палива, а й стає ключовим інструментом оптимізації енергетичних витрат, зменшення втрат енергії та підвищення екологічної ефективності агропромислового виробництва.

Інтеграція когенераційних установок на біометані в енергетичну інфраструктуру агропромислових підприємств потребує узгодження параметрів генерації з реальними режимами споживання електричної та теплової енергії, що відзначаються сезонною та добовою нерівномірністю. На відміну

Сучасні підходи до використання біометану в системах автономного енергопостачання агропромислових об'єктів

Підхід	Технологічна характеристика	Функціональне призначення	Приклади українських підприємств	Показники ефективності / результативності
Когенераційні установки на біогазі/біометані	Спільне виробництво електричної та теплової енергії на газопоршневих агрегатах з утилізацією тепла	Автономне електро- і тепlopостачання технологічних процесів	Біогазова станція на базі Теофіпольського цукрового заводу (перша черга)	Потужність першої черги: 5,1 МВт (ел.); типовий сумарний ККД когенерації: до 85–90% (за умови повної утилізації тепла)
Локальні газопоршневі електростанції	Генерація електроенергії з біогазу / біометану (без пріоритету повної утилізації тепла)	Покриття піків, резервування, робота в острівному режимі	Практичний розвиток сектора: в Україні функціонує 83–85 біогазових установок сумарною електричною потужністю близько 140 МВт	Орієнтир електричної ефективності газопоршневої генерації: ~38–42% (залежно від типу двигуна й режиму)
Теплогенерація на біометані	Спалювання біометану в котельному обладнанні для тепла (у т.ч. конденсаційні котли)	Тепло для технологічних потреб та опалення	Секторний контекст: розвиток біометану як заміщення природного газу підтримується збільшенням виробництва біометану та виходом на експорт	Типовий ККД сучасних котлів: 90–95% (залежно від режимів та температурних графіків)
Інтегровані енергетичні комплекси (біометан у ГТС / експорт)	Виробництво біометану з подачею в газотранспортну систему та/або експортними ланцюгами (у т.ч. bio-LNG)	Енергетична гнучкість, комерціалізація, експорт	VITAGRO: подача біометану в ГТС України з добовим обсягом 6 тис. м ³ [26]; «ЮМ Ліквід Газ»: експорт зрідженого біометану (bio-LNG)	На середину 2025 р.: 4 біометанові установки сумарно 41 млн м ³ /рік; план до кінця 2025 р. – 111 млн м ³ /рік

Джерело: сформовано автором на основі [2; 3; 5; 8; 10, р. 1682; 22; 26; 27; 28; 29]

від централізованих систем енергопостачання, локальні когенераційні комплекси функціонують у тісному зв'язку з технологічними процесами підприємства, тому їх ефективність визначається здатністю адаптуватися до змінного навантаження та забезпечувати раціональний розподіл виробленої енергії. Вирішальне значення має відповідність теплового складника когенерації потребам виробництва, оскільки саме цей фактор обмежує тривалість і стабільність роботи установки в автономному режимі (табл. 2).

Реалізація зазначених технічних рішень на сучасних агропромислових підприємствах ґрунтується на формуванні керованих енергетичних контурів, у межах яких когенераційна установка на біометані функціонує як базове джерело енергії з електричною потужністю, як правило, 0,5–5,0 МВт та можливістю регулювання навантаження в діапазоні 50–100% від номіналу. У періоди пікового електроспоживання пріоритет надається

електричній генерації для живлення виробничого обладнання, тоді як тепла енергія з коефіцієнтом утилізації до 90% акумулюється в теплових накопичувачах або використовується в низькотемпературних технологічних процесах. У міжсезонний період, у разі зниження теплового навантаження, робота установки коригується шляхом зменшення теплової потужності або часткового переходу на альтернативні джерела тепла. Практичний досвід експлуатації таких систем свідчить, що технічно оптимізована інтеграція когенераційних установок на біометані забезпечує підвищення сумарного ККД енергосистеми до 85–92%, зменшення втрат енергії та стабільність енергопостачання за змінних виробничих умов [11, с. 70–73].

Оцінювання ефективності функціонування когенераційних установок на біометані в автономних енергетичних системах агропромислових підприємств потребує поєднання енергетичних і економічних підходів, що враховують специфіку одно-

Технічні параметри інтеграції когенераційних установок на біометані в енергетичну інфраструктуру агропромислових підприємств

Характеристика інтеграції	Ключові технічні параметри	Вплив на роботу підприємства
Узгодження з електричними навантаженнями	Номинальна електрична потужність когенераційних модулів: 0,5–5,0 МВт; діапазон регулювання навантаження: 50–100% від номіналу; швидкість зміни потужності: 5–10%/хв	Зменшення споживання електроенергії із зовнішньої мережі на 40–70%; покриття пікових навантажень без залучення резервних дизельних генераторів
Узгодження з тепловими режимами	Теплова потужність установки: 0,6–5,5 МВт; частка утилізації тепла: 75–90%; співвідношення електричної та теплової потужності (P_{el}/P_{th}): 0,8–1,1	Підвищення сумарного ККД енергосистеми до 85–92%; скорочення витрат природного газу або інших видів палива для теплогенерації
Інтеграція із системами управління	Автоматизовані системи керування (SCADA); контроль параметрів у реальному часі (тиск, склад газу, навантаження); коефіцієнт готовності установки (availability): 90–95%	Оптимізація режимів роботи та зменшення простоїв; стабільна робота за змінних виробничих графіків і сезонних коливань споживання
Взаємодія з резервними та накопичувальними системами	Теплові акумулятори об'ємом 50–500 м ³ ; електрохімічні накопичувачі потужністю 0,1–1,0 МВт (за потреби); час автономної роботи без мережі: 2–8 год	Підвищення надійності автономного енергопостачання; зменшення втрат енергії та можливість гнучкого балансування між виробництвом і споживанням

Джерело: сформовано автором на основі [2; 3; 9, р. 109; 10, р. 1686; 11, с. 73].

часного виробництва електричної та теплової енергії. На відміну від традиційних джерел генерації, результативність когенераційних установок визначається не лише рівнем електричного коефіцієнта корисної дії (ККД), а й ступенем корисного використання теплової енергії та здатністю заміщати зовнішні енергоресурси. Обґрунтовані критерії оцінювання мають відображати інтегральний ефект від використання біометану як палива та забезпечувати можливість порівняння різних режимів і сценаріїв експлуатації (табл. 3).

Запропоновані критерії базуються на кількісному зіставленні обсягів спожитого біометану та фактично корисної енергії, отриманої у вигляді електроенергії й тепла. Сумарний коефіцієнт корисної дії на рівні не нижче 85% свідчить про ефективну інтеграцію когенераційної установки в енергетичну інфраструктуру підприємства, тоді як значення менше 75% указують на втрати теплової енергії або неузгоджені режими роботи [7]. Коефіцієнт використання теплової енергії є критичним показником для агропромислових об'єктів: за його значень нижче 60% когенераційна схема втрачає економічні переваги порівняно з роздільним виробництвом енергії. Економічна ефективність вважається прийнятною за строку окупності до 7 років, що відповідає практиці впровадження біометанових когенераційних проектів в агропромисловому секторі та узгоджується з їх життєвим циклом [14].

Впровадження когенераційних систем на біометані в агропромисловому секторі супроводжується низкою взаємопов'язаних науково-практичних проблем, що зумовлені як особливостями самого енергоносія, так і специфікою виробничих умов. Однією з ключових технічних проблем підготовки біометану є забезпечення стабільної якості палива за умов змінного складу біогазу, передусім за вмістом сірководню та силосанів. Концентрація сірководню в сирому біогазі може досягати кількох тисяч частин на мільйон (parts per million, ppm), тоді як для надійної роботи газопоршневих когенераційних установок його необхідно знижувати щонайменше до 500 ppm, а для підвищення ресурсу обладнання – до рівня нижче 100 ppm. Силосани, присутні в кількостях від кількох до десятків mg/Nm³, під час згоряння утворюють абразивні кремнеземні відкладення, що прискорюють зношування двигунів і допоміжного обладнання [22]. Забезпечення таких параметрів потребує багатоступневих систем очищення біогазу та формує суттєву частку капітальних і експлуатаційних витрат у проектах виробництва біометану. Коливання концентрації метану, наявність домішок сірководню, вологи та силосанів істотно впливають на надійність роботи когенераційного обладнання та потребують застосування багатоступневих систем очищення і контролю, що підвищує капітальні та експлуатаційні витрати [3].

**Критерії оцінювання енергетичної та економічної ефективності
когенераційних установок на біометані**

Група критеріїв	Показник	Практичний спосіб розрахунку
Енергетичні	Сумарний коефіцієнт корисної дії установки	Відношення сумарної корисної енергії (електричної + використаної теплової) до енергетичного вмісту спожитого біометану
	Електричний коефіцієнт корисної дії	Частка енергії біометану, перетворена на електроенергію
	Коефіцієнт використання теплової енергії	Частка виробленого тепла, реально використаного в технологічних процесах або системах опалення
	Питоме споживання біометану	Обсяг біометану, необхідний для виробництва 1 кВт·год сумарної корисної енергії
Економічні	Строк окупності інвестицій	Відношення капітальних витрат до річної економії коштів на енергоресурсах
	Питомі експлуатаційні витрати	Сукупні річні витрати на обслуговування, поділені на вироблену електроенергію Типово 0,015–0,030 €/кВт·год

Джерело: сформовано автором на основі [2; 3; 7; 10. р. 1689; 13; 14]

Суттєвим обмеженням є проблема адаптації стандартних когенераційних установок до роботи на біометані змінної якості. Більшість серійного газопоршневого обладнання проектувалася для стабільних параметрів природного газу, тому його використання з біометаном потребує коригування систем подачі палива, запалювання та керування режимами згоряння. Недостатній рівень адаптації призводить до зниження ефективності, прискореного зносу вузлів і підвищення ризику аварійних режимів, що ускладнює довготривалу експлуатацію таких систем в автономному форматі.

Експлуатаційні обмеження в агропромисловому секторі пов'язані з нерівномірністю навантажень, сезонною мінливістю теплового споживання та залежністю виробництва біометану від стабільності сировинної бази. Періодичні коливання обсягів органічної сировини або порушення технологічних режимів анаеробного зброджування безпосередньо відображаються на надійності енергопостачання [7]. Додатковою проблемою є обмежена інтеграція когенераційних систем на біометані з наявними енергетичними та автоматизованими системами управління підприємств, що ускладнює оптимізацію режимів роботи та знижує загальну ефективність енергетичної інфраструктури.

Окрему групу проблем становлять економічні та організаційні чинники, зокрема значні початкові інвестиції, тривалий строк окупності за відсутності спонукальних механізмів, а також дефіцит стандартизованих методик оцінювання ефективності таких систем.

З метою підвищення прикладної результативності використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів доцільним є врахування особливостей структури енергоспоживання та виробничих процесів конкретних підприємств. Для тваринницьких комплексів, що характеризуються відносно стабільним надходженням органічної сировини та рівномірним утворенням біогазу, пріоритетним напрямом є стабілізація якості біометану та підтримання базових режимів роботи когенераційних установок із максимальним залученням теплової енергії до технологічних і санітарно-гігієнічних потреб, що узгоджується з практикою розвитку біоенергетичних проєктів в Україні [24; 26].

Для підприємств цукрової промисловості та інших об'єктів сезонного перероблення ефективність когенераційних рішень визначається узгодженням режимів генерації з нерівномірним тепловим навантаженням упродовж року. У таких умовах доцільним є поєднання когенераційних установок із технологічними споживачами тепла в період виробничого сезону та коригування режимів роботи в міжсезонний період, що підтверджується досвідом впровадження біогазових установок на базі українських цукрових заводів [27].

Для агропромислових підприємств із розвинутою інфраструктурою зберігання та перероблення продукції, а також для інтегрованих агрохолдингів перспективним є комбінований підхід до використання біометану, за якого частина енергоресурсу спрямовується на локальну коге-

нерацію, а частина – доводиться до стандартів біометану для подачі в газотранспортну систему або подальшої комерціалізації. Реалізація таких моделей в Україні підтверджується запуском перших біометанових проєктів із закачуванням газу в газотранспортну систему та початком експортних поставок, що свідчить про зростання ролі біометану як елемента енергетичної гнучкості агропромислових підприємств [25; 28; 29].

Таким чином, ефективність і надійність використання біометану в когенераційних установках визначається ступенем відповідності технічної конфігурації системи характеру виробничих процесів та структурі енергоспоживання конкретного агропромислового об'єкта, що підтверджується сучасними українськими практиками розвитку біоенергетики.

Висновки. У результаті дослідження встановлено, що використання біометану в когенераційних установках автономного енергопостачання агропромислових об'єктів є технічно доцільним і забезпечує підвищення енергетичної автономності за умови стабілізації параметрів палива та узгодження режимів генерації зі структурою споживання. Показано, що за ефективною інтеграції когенераційні системи на біометані забезпечують сумарний коефіцієнт корисного використання енергії на рівні 85–90%, тоді як за недостатнього залучення теплової енергії він знижується до

менше 75%, що нівелює переваги когенерації. Обґрунтовано систему критеріїв оцінювання енергетичної та економічної ефективності, яка включає показники сумарного та електричного ККД, коефіцієнта використання теплової енергії, питомого споживання біометану та строку окупності інвестицій. Встановлено, що ефективна робота когенераційних установок відповідає коефіцієнту використання тепла не нижче 70–75% і строку окупності до 6–7 років, тоді як відхилення від цих меж свідчить про неузгодженість технічної конфігурації системи з потребами підприємства. Виявлено, що основними чинниками зниження ефективності біометанових когенераційних систем є нестабільність якості палива за критичними домішками, сезонна нерівномірність теплового навантаження та обмежена адаптивність стандартного газопоршневого обладнання. Це зумовлює необхідність застосування багатоступеневих систем підготовки біометану, адаптивного керування режимами генерації та інтеграції з системами акумулювання і моніторингу. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням адаптивних алгоритмів управління когенераційними установками на біометані, удосконаленням технологій очищення біогазу та оцінюванням ефективності автономних біометанових енергетичних систем за повним життєвим циклом.

Список літератури:

1. Україна експортувала понад 11,2 млн кубометрів біометану у 2025 році. *AgroPortal.ua*: вебсайт. 2026. URL: <https://agroportal.ua/news/ukraine/ukrajina-eksportovala-ponad-11-mln-kubometriv-biometanu> (дата звернення: 11.01.2026).
2. Dalpaz R., Konrad O., da Silva Cyrne C. C., Barzotto H. P., Hasan C., Guerini Filho M. Using biogas for energy cogeneration: An analysis of electric and thermal energy generation from agro-industrial waste. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2020. Vol. 40. Article 100774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100774>
3. Caposciutti G., Baccioli A., Ferrari L., Desideri U. Biogas from anaerobic digestion: power generation or biomethane production? *Energies*. 2020. Vol. 13, № 3. Article 743. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13030743>.
4. Jarosz Z., Kapłan M., Klimek K., Dybek B., Herkowiak M., Wałowski G. An assessment of the development of a mobile agricultural biogas plant in the context of a cogeneration system. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 22. Article 12447. DOI: <https://doi.org/10.3390/app132212447>
5. Calise F., Cappiello F. L., Cimmino L., d'Accadia M. D., Vicidomini M. A review of the state of the art of biomethane production: recent advancements and integration of renewable energies. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 16. Article 4895. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14164895>
6. Su B., Wang H., Zhang X., He H., Zheng J. Using photovoltaic thermal technology to enhance biomethane generation via biogas upgrading in anaerobic digestion. *Energy Conversion and Management*. 2021. Vol. 235. Article 113965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113965>
7. Lanni D., Minutillo M., Cigolotti V., Perna A. Biomethane production through the power to gas concept: A strategy for increasing the renewable sources exploitation and promoting the green energy transition. *Energy Conversion and Management*. 2023. Vol. 293. Article 117538. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117538>
8. Mignogna D., Ceci P., Cafaro C., Corazzi G., Avino P. Production of biogas and biomethane as renewable energy sources: a review. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, № 18. Article 10219. DOI: <https://doi.org/10.3390/app131810219>.
9. Carecci D., Catenacci A., Ficara E., Ferretti G., Leva A. Modelling, optimisation and control of full-scale

co-digestion biomethane plants. In: *Proceedings of the 2024 IEEE 63rd Conference on Decision and Control (CDC)*. Milan, Italy, 2024. P. 106–112. DOI: <https://doi.org/10.1109/CDC56724.2024.10886344>

10. Santos M. I., Maravilha A., Bessani M., Uturbey W., Batista L. A model for optimal energy management in a microgrid using biogas. *Evolutionary Intelligence*. 2024. Vol. 17, № 3. P. 1677–1695. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12065-023-00857-9>

11. Stadnik M., Shtuts A., Yaropud V., Kupchuk I. Development of an algorithm for power supply to a livestock farm using biogas. *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*. 2025. Vol. 28, № 4. P. 61–86. DOI: <https://doi.org/10.33223/epj/208465>

12. Veremiichuk Y. A., Opryshko V. P., Prytyskachand I. V., Yarmoliuk O. S. Prospects for autonomous low-power renewable energy communities. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2024. Vol. 1415, № 1. Article 012120. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012120>

13. Zad A. N., Zainali S., Croci M., Guezgouz M., Impollonia G., Campana P. E., Amaducci S. Techno-economic optimization of agrivoltaic-powered anaerobic digestion plant for biomethane production. *Energy Conversion and Management*. 2026. Vol. 348. Article 120791. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2025.120791>

14. Marconi P., Rosa L. Role of biomethane to offset natural gas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. Vol. 187. Article 113697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113697>

15. Zemite L., Kleperis J., Mezulis A., Bode I., Vempere L., Jasevics A., Jansons L. Biogas production support systems for the production and use of biomethane. In: *Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. Prague, Czech Republic, 2022. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/EEEIC/ICPSEurope54979.2022.9854739>

16. Milojević S., Stopka O., Orynycz O., Tucki K., Šarkan B., Savić S. Exploitation and maintenance of biomethane-powered truck and bus fleets to assure safety and mitigation of greenhouse gas emissions. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 9. Article 2218. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092218>

17. Остра Н. В., Малогулко Ю. В., Сікорська О. В., Тептя В. В., Повстянко К. Енергетика майбутнього: роль біогазу та біометану у стійкому розвитку України. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2025. Vol. 353, № 3.2. P. 400–408. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-353-56>

18. Корнієнко І. М., Ястремська Л. С., Кузнєцова О. О., Барановський М. М., Візер А. К. Біоконверсія органічних відходів – європейський досвід та українські практики. *Технології та інжиніринг*. 2022. № 3. P. 37–51. DOI: <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2022.3.4>

19. Резніченко В. П., Коломієць Л. В., Туник Т. М. Оцінка енергетичної ефективності відновлювальних джерел енергії на основі біоконверсійних культур. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 7. P. 229–239. DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.24>

20. Римар Р., Сиротюк Г. Економічна оцінка стану та перспектив розвитку біоенергетики в контексті диверсифікації енергетичного сектору України. *Економічний простір*. 2025. № 204. P. 256–265. DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.204.256-265>

21. Дудніков С. М., Щур Т. Г., Савченко О. А., Трунова І. М., Середа А. І., Галько С. В., Попадченко С. А. Аналіз перспектив функціонування біоенергетичного потенціалу в системах енергопостачання України на основі аналізу енергетичного балансу. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного*. 2024. Vol. 24, № 1. P. 170–183. DOI: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2024-24-1-12>

22. Зеленчук Н. Виробництво біометану як напрям забезпечення енергетичної незалежності України та ЄС. *Економіка та суспільство*. 2025. № 73. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-73-36>

23. Кубатко О., Калініченко Л., Треус А., Лінь Д., Міщенко Я. Альтернативна енергетика як напрям енергетичної стійкості країни. *Підприємництво та інновації*. 2024. № 32. P. 64–70. DOI: <https://doi.org/10.32782/2415-3583/32.10>

24. В Україні зростає виробництво біометану: вже працює 4 заводи, ще 3 запуснуть у 2025 році. *Пропозиція*. 2025. URL: <https://propozitsiya.com/news/v-ukrayini-zrostaye-vyrobnytstvo-biometanu-vzhe-pratsyuye-4-zavody-shche-3-zapustyat-u-2025> (дата звернення: 12.01.2026).

25. Ukraine starts biomethane exports to the EU. *Ukrainian Energy*. 2025. URL: <https://ua-energy.org/en/posts/18-06-2025-c7cd66e3-bc00-4f59-92b0-703783bd6027> (date of access: 12.01.2026).

26. Біометан в Україні: можливості та розвиток. *Біоенергетична асоціація України*: вебсайт. 2025. URL: <https://uabio.org/news/17950/> (дата звернення: 11.01.2026).

27. Теофіпольський цукровий завод офіційно запустив біогазову станцію. *AgroTimes*: вебсайт. 2019. URL: <https://agrotimes.ua/elevator/teofipolskij-cukrovij-zavod-oficijno-zapustiv-biogazovu-stanciyu/> (дата звернення: 11.01.2026).

28. VITAGRO запустила перший український біометан у газотранспортну систему України добо-

вим обсягом 6 тис. куб. м. *Reform.energy*: вебсайт. 2024. URL:<https://reform.energy/news/vitagro-zapustilapershiiy-ukrainskiy-biometan-v-gazotransportnu-sistemu-ukraini-dobovim-obsyagom-6-tis-kub-m-22968> (дата звернення: 11.01.2026).

29. ЮМ Ліквід Газ почала експортувати зріджений біометан. *ExPro*: вебсайт. 2025. URL: <https://expro.com.ua/uk/novini/yum-lkvd-gaz-pochala-eksportuvati-zrdjeniy-bometan> (дата звернення: 11.01.2026).

Usenko A.Yu., Forys S.M., Biliaieva V.V. BIOMETHANE IN COGENERATION UNITS FOR THE AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY OF AGRO-INDUSTRIAL FACILITIES

The relevance of the study is determined by the need to increase the energy autonomy of agro-industrial facilities in the context of rising energy costs and the vulnerability of centralized energy supply systems. The agro-industrial sector of Ukraine is characterized by significant energy intensity and the availability of organic raw materials, which creates the preconditions for the use of biomethane in autonomous cogeneration systems. The purpose of the article is to justify the feasibility of using biomethane in cogeneration plants for autonomous energy supply of agro-industrial facilities, taking into account the actual modes of electrical and thermal load. The study was carried out using a computational analysis of the parameters of biomethane cogeneration plants, a generalization of the technical characteristics of gas piston equipment, and the application of energy and economic efficiency criteria. The analysis was carried out for plants with an electrical capacity of 0.5–5.0 MW with a heat utilization rate of 60–90% and load regulation in the range of 50–100% of the nominal capacity. It was found that with full utilization of thermal energy, the total efficiency of biomethane cogeneration plants reaches 85–92%, while with a reduction in the heat utilization factor below 60%, the efficiency of cogeneration decreases significantly. It has been shown that economically acceptable modes of autonomous energy supply correspond to an investment payback period of 6–7 years. Key limitations related to biomethane quality, seasonal unevenness of heat loads, and the need for adaptive control of generation modes have been identified.

It is emphasized that biomethane can serve as an effective fuel base for autonomous cogeneration systems of agro-industrial facilities, provided that fuel parameters are stabilized and the capacity of the installation is matched to the energy consumption structure of the enterprise. Further research should be directed towards the development of adaptive algorithms for controlling biomethane cogeneration plants, improving fuel purification technologies, and detailing the economic assessment of autonomous energy systems over their entire life cycle.

Keywords: *renewable energy sources, distributed generation, autonomous energy systems, gas piston installations, energy efficiency, agricultural energy, organic waste utilization.*

Дата першого надходження статті до видання: 14.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 08.04.2026